

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia

André Almeida Dias

Projeto e Análise Experimental de um Secador de Grãos de Leite
Fixo em Escala Laboratorial

Belo Horizonte
2019

André Almeida Dias

Projeto e Análise Experimental de um Secador de Grãos de Leito Fixo
em Escala Laboratorial

Dissertação apresentada 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: Prof. Dr^o. José Leôncio Fonseca de Souza

Coorientador: Prof. Dr^o. André Guimarães Ferreira

Belo Horizonte

2019

D541p Dias, André Almeida
Projeto e análise experimental de um secador de grãos de leite
fixo em escala laboratorial. / André Almeida Dias. -- Belo Horizonte,
2019.
242f. : 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. André Guimarães Ferreira

Bibliografia

1. Termodinâmica. 2. Energia – Exergia – Avaliação. 3. Milho –
Secagem. I. Souza, José Leôncio Fonseca de. II. Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 621.4021

André Almeida Dias

Projeto e Análise Experimental de um Secador de Grãos de Leito Fixo
em Escala Laboratorial

Dissertação apresentada 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.

Aprovado em ____ de _____ de ____.

Banca Examinadora

Prof. Dr^o. _____

José Leôncio Fonseca de Souza

Prof. Dr^o. _____

André Guimarães Ferreira

Prof. Dr^o. _____

Paulo Eduardo Lopes Barbieri

Prof. Dr^o. _____

Rafael Pinheiro Amantéa

Prof. Dr^o. _____

Raphael Nunes de Oliveira

Dedico este trabalho aos
meus pais
meus irmãos
minha família
meus amigos
e ao maior de todos os cursos
a vida.

André Almeida Dias

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Francisco e Daisy e meus irmãos Thiago e Francisco por sempre estarem ao meu lado em qualquer ocasião fornecendo apoio e força para seguir em frente apesar das dificuldades.

Agradeço aos meus professores, em especial aos meus orientadores José Leôncio Fonseca de Souza e André Guimarães Ferreira, pela paciência e disponibilidade em transmitir seus conhecimentos e fornecer seu auxílio da melhor maneira possível a fim de realizar esse trabalho.

Agradeço também ao CEFET-MG pela estrutura humana e física fornecida e pelo suporte financeiro sem o qual não seria possível realizar este trabalho.

Agradeço também aos meus colegas de trabalho, em especial Leonardo Alves da Costa pelo auxílio fundamental em todas as etapas do trabalho.

Agradeço a EMBRAPA Milho e Sorgo de Sete Lagoas e todos os seus profissionais que tiveram a disponibilidade de conversar comigo, representada especialmente pela pessoa de Marco Aurélio Guerra Pimentel, que além de fornecer o milho *in natura*, possibilitou nossa visita aos espaços da EMBRAPA onde podemos aprender mais sobre a tecnologia prática de processamento de milho.

Por fim, agradeço a Raquel pela sua atenção, carinho e amor que tem afastado a dureza de meu coração.

A todos vocês muito obrigado por fazerem parte de minha história.

RESUMO

O processo de secagem térmica é o mais utilizado para remoção de umidade de produtos agrícolas e gera melhorias na colheita, no armazenamento e na qualidade do produto. Entretanto, a secagem possui um alto consumo energético, representando 50% do consumo total de energia envolvida no processamento do milho, que é o grão mais produzido no mundo. Dessa forma, é essencial o avanço nos estudos sobre esse processo, a fim da utilização mais eficiente dos recursos energéticos globais. Este trabalho, portanto, visa construir um secador experimental de leito fixo com controle de velocidade e temperatura do ar de secagem, a fim de realizar estudos sobre a dinâmica de secagem do milho em camada espessa, bem como analisar as eficiências energéticas e exergéticas do equipamento desenvolvido. O projeto do secador foi detalhado e seguiu as recomendações observadas na literatura. Os experimentos de secagem do milho, tiveram duração de 120 minutos e foram realizados em camada espessa com leito cilíndrico de 130mm de diâmetro e 200 milímetros de altura, utilizando as temperaturas de 40°C, 50°C e 60°C, e as velocidades de 0,8 e 1,3ms⁻¹ para o ar de secagem. O milho utilizado foi colhido nos campos da EMBRAPA Milho e Sorgo em Sete Lagoas e armazenados em ambiente refrigerado. Dentre os parâmetros variados de temperatura e velocidade do ar de secagem, apenas a temperatura gerou diferenças expressivas no ponto de vista da retirada da umidade média do leito de grãos, sendo que quanto maior a temperatura mais umidade foi retirada do leito. O experimento que apresentou maior eficiência energética real de secagem foi o teste com temperatura de 50°C e velocidade de entrada de 0,8ms⁻¹, cuja eficiência energética média real foi de 8%. Ao passo que a maior eficiência exergética média obtida foi de 0,69% e ocorreu no experimento com temperatura de entrada de 60°C e velocidade de 0,8ms⁻¹.

Palavras Chave: Milho, Secador de Leito Profundo, Cinética de Secagem, Análise Energética, Análise Exergética, Análise Experimental.

ABSTRACT

The thermal drying process is most commonly used to remove moisture from agricultural products and generates improvements in harvesting, storage and product quality. However, drying has a high energy consumption, representing 50% of the total energy consumption involved in the processing of corn, which is the most produced grain in the world. In this way, progress in studies on this process is essential to make more efficient use of global energy resources. This work, therefore, aims to construct an experimental fixed bed dryer with speed and temperature control of the drying air to perform studies of the drying dynamics of corn in a deep bed layer and to analyze the energetic and exergetic efficiencies of the equipment developed. The dryer design was detailed and followed the recommendations observed in the literature. The deep bed corn drying experiments lasted 120 minutes and were performed in a cylindrical bed of 130mm in diameter and 200mm in height, using temperatures of 40, 50 and 60°C, and the velocities of 0,8 and 1,3ms⁻¹ for the incoming drying air. The corn used was harvested in the fields of EMBRAPA in Sete Lagoas and stored in a refrigerated environment. Among the different parameters of drying air temperature and velocity, only the temperature causes a significant difference in the removal of the average moisture content of the grain bed, so the higher the temperature is, more moisture was removed of the grains. The experiment that presented the highest real energy efficiency of drying was the with a temperature of 50°C and an input velocity of 0,8ms⁻¹, whose actual average energy efficiency was 8%. While the highest exergetic efficiency obtained was 0,69% and occurred in experiment with an inlet temperature of 60°C and a velocity of 0,8ms⁻¹.

Keywords: Corn, Deep-bed Dryer, Drying kinetics, Energy Analysis, Exergy Analysis, Experimental Analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curvas de secagem e períodos de secagem. _____	27
Figura 2 – Zonas de secagem em leito profundo de grãos. _____	32
Figura 3 – Esquema básico de um secador de leito fixo. _____	34
Figura 4 – Esquema básico de um secador convectivo. _____	36
Figura 5 – Esquema de movimentação do ar e de distribuição de canaletas em um secador de cascata. _____	37
Figura 6 – Esquema do fluxo de ar em secadores contínuos. _____	38
Figura 7 – Esquema de um secador intermitente de fluxo cruzado. _____	39
Figura 8 – Gráfico qualitativo da relação entre eficiência exergética, impacto ambiental e sustentabilidade. _____	41
Figura 9 – Esquema básico do secador desenvolvido. _____	60
Figura 10 – Balanço de Energia no Sistema de aquecimento. _____	61
Figura 11 – Esquema do controle de temperatura. _____	63
Figura 12 – Esquema de posicionamento dos sensores pelo secador. _____	68
Figura 13 – Volume de controle. _____	72
Figura 14 – Balança digital Toledo modelo 9094/4. _____	77
Figura 15 – Estufa de secagem nova técnica. _____	78
Figura 16 – Termo anemômetro de fio quente da testo modelo 405i. _____	78
Figura 17 – Umidade de termo higrômetro digital. _____	79
Figura 18 – Termopar tipo J de haste de inox 100mm. _____	79
Figura 19 – Termômetro digital TMC-902C. _____	80
Figura 20 – Transdutor de pressão Huba Control 694. _____	80
Figura 21 – Módulo de aquisição de dados Agilent 34980A. _____	81
Figura 22 – Banho termostático. _____	81
Figura 23 – Termômetro de bulo de mercúrio. _____	82
Figura 24 - Wattímetro digital. _____	82
Figura 25 – Secador de grãos desenvolvido no trabalho. _____	83
Figura 26 – Representação tridimensional do secador desenvolvido. _____	86
Figura 27 – Resistência aletada de 1kW selecionada. _____	89
Figura 28 – Esquema de distribuição das resistências na câmara de aquecimento. _____	89

Figura 29 – Câmara de aquecimento fabricada. _____	90
Figura 30 – <i>Plenum</i> e encaixe da câmara de secagem. _____	91
Figura 31 – Câmara de secagem fabricada. _____	92
Figura 32 – Conexão de engate rápido dos termopares. _____	92
Figura 33 – Posicionamento dos sensores. _____	93
Figura 34 – Isolamento de fibra cerâmica, peças de PVC e suportes. _____	94
Figura 35 – Gráfico de Sheed para determinação da pressão estática imposta pelos principais produtos agrícolas. _____	95
Figura 36 – Curvas dos ventiladores Siroco da IBRAM. _____	97
Figura 37 – Ventilador siroco Varivelox. _____	97
Figura 38 – Flange de conexão do ventilador ao secador. _____	98
Figura 39 – Itens da parte elétrica do secador. _____	98
Figura 40 – Esquema elétrico do secador desenvolvido. _____	99
Figura 41 – Projeto CAD e secador construído. _____	100
Figura 42 – Teor de umidade instantâneo em base seca e temperatura média do leito de grãos dos experimentos de secagem. _____	104
Figura 43 – Razão de umidade pelo tempo de acordo com a temperatura de entrada dos experimentos. _____	106
Figura 44 - Razão de umidade pelo tempo de acordo com a velocidade de entrada dos experimentos. _____	109
Figura 45 – Taxa de secagem dos experimentos com incerteza e probabilidade de enquadramento de 95%. _____	110
Figura 46 – Temperatura do leito de grãos pelo tempo de experimento. _____	112
Figura 47 – Umidade final do leito em estufa, com a profundidade para cada experimento. _____	114
Figura 48 – Efeito da velocidade na eficiência energética e exergética de secagem dos experimentos realizados. _____	117
Figura 49 – Efeito da temperatura na eficiência energética de secagem dos experimentos realizados. _____	120
Figura 50 - Efeito da temperatura na eficiência exergética de secagem dos experimentos realizados. _____	121
Figura 51 - Efeito da velocidade e da temperatura na eficiência energética teórica de secagem dos experimentos realizados. _____	124

Figura 52 – Quantidade total de energia consumida e teor de umidade médio final do leito de grãos para cada experimento de secagem.	128
Figura 53 – Quantidade de energia consumida e tempo para atingir 17,3% de teor de umidade médio do leito de grãos na base seca.	130
Figura 54 – Porcentagens do consumo energético térmico e mecânico do secador para cada experimento.	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Temperaturas limite de secagem para diferentes destinos do milho.	31
Tabela 2 - Resumo do estado da arte parte 1.	57
Tabela 3 – Grandezas e incertezas máximas observadas no experimento.	85
Tabela 4 – Propriedades psicrométricas do ar ambiente e do ar de secagem, para a cidade de Belo Horizonte/MG, considerando altitude local de 852m.	87
Tabela 5 – Detalhamento do cálculo da potência elétrica necessária para o processo de aquecimento do ar de secagem.	88
Tabela 6 – Pressão imposta pela coluna de 200mm de trigo.	96
Tabela 7 - Pressão imposta pela coluna de 200mm de milho.	96
Tabela 8 – Quantidade de milho utilizado nos experimentos de secagem.	101
Tabela 9 – Resumo dos experimentos de determinação do teor de umidade inicial de cada experimento.	101
Tabela 10 – Teor de umidade inicial das embalagens com incerteza e probabilidade de enquadramento de 95%.	102
Tabela 11 – Teor de umidade inicial dos experimentos com incerteza e probabilidade de enquadramento de 95%.	102
Tabela 12 – Parâmetros de entrada e do ambiente dos experimentos de secagem com incerteza e probabilidade de enquadramento de 95%.	103
Tabela 13 – Variação da temperatura média do leito nos primeiros 10 minutos de experimento.	105
Tabela 14 – Teor de umidade inicial, final e variação do teor de umidade total dos experimentos de secagem com incerteza e probabilidade de enquadramento de 95%.	105
Tabela 15 – Temperatura e umidade relativa do ar ambiente, temperatura e umidade relativa do ar de entrada e teor de umidade de equilíbrio médio para cada experimento com incerteza e probabilidade de enquadramento de 95%.	108
Tabela 16 – Diferença de temperatura entre as extremidades do leito de grãos para 20 e 120 minutos para cada experimento.	113

Tabela 17 – Variação do teor de umidade entre os extremos do leito e erro entre o teor de umidade médio final do leito e a média do teor de umidade final realizada em estufa.

115

Tabela 18 – Valores de eficiência energética e exergética de pico e média para os experimentos com incerteza e probabilidade de enquadramento de 95%. _____ 122

Tabela 19 – Eficiências médias de secagem teórica e real, eficiências térmicas médias do secador e produto das eficiências teórica e térmica. _____ 125

Tabela 20 – Exergia destruída média a cada 10 minutos de experimento, total e comparação entre a energia total consumida e a quantidade de exergia destruída.

126

LISTA DE SIGLAS

CAD	<i>Computer-Aided Manufacturing</i> (Desenho assistido por computador)
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnologia de Minas Gerais
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
DEMAT	Departamento de Engenharia de Materiais
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i> (Modelagem por depósito de material fundido)
INMET	Instituto Nacional de Metrologia
PET	Polietileno tereftalato
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PVC	Policloreto de Polivinila
SSR	<i>Solid state relay</i> (Rele de estado sólido)
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i> (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos)

LISTA DE SIMBOLOS

a	Constante específica do produto [-]
A_{cs}	Área da câmara de secagem [m ²]
b	Constante específica do produto [-]
C_c	Correção [unidade correspondente a variável corrigida]
C_p	Calor específico [kJ/(kg·K)]
DR	Taxa de secagem [-]
E_e	Energia de entrada do secador [kJ]
E_T	Energia total do ar de secagem [kJ]
E_V	Energia de vaporização da umidade dos grãos [kJ]
dE_{VC}/dt	Variação da taxa de energia no volume de controle [kW]
$E_{x_{destruída}}$	Exergia destruída [kJ]
E_{x_e}	Exergia de entrada do secador [kJ]
$E_{x_{fornecida}}$	Exergia fornecida ao secador [kJ]
E_{x_V}	Exergia utilizado para evaporar a umidade dos grãos [kJ]
FC	Fator de correção [-]
G	Função da grandeza indireta medida [unidade correspondente a grandeza medida]
g	Gravidade [m ² /s]
h	Entalpia específica [kJ/kg]
h_{lv}	Entalpia específica de vaporização da água [kJ/kg]
$k_{95\%}$	Coeficiente de Student com 95% de enquadramento [-]
L	Altura do leito de grãos [m]
\bar{M}	Teor de umidade médio dos grãos [%]
\dot{m}	Vazão mássica [kg/s]
M	Teor de umidade dos grãos [%]
m	Massa [kg]
M_{eq}	Teor de umidade de equilíbrio dos grãos [%]

\overline{M}_i	Média das indicações [unidade correspondente a variável estudada]
dm_{VC}/dt	Taxa de variação de massa no interior do secador [kg/s]
\overline{P}	Pressão média absoluta [kPa]
P	Pressão absoluta [kPa]
p_{ar}	Pressão de vapor d'água no ar ambiente [kPa]
ΔP_g	Queda de pressão devido à resistência do produto [mmca]
p_g	Pressão de vapor d'água na superfície do produto [kPa]
Q	Fluxo de ar que passa pelo leito [m ³ /(min·m ²)]
Q_{resist}	Calor trocado pelas resistências elétricas [kJ]
\dot{Q}_{VC}	Taxa de calor transferida pela fronteira do volume de controle [kW]
R_a	Constante dos gases ideais [kJ/(kg·K)]
RM	Razão de Umidade [-]
RdM	Resultado de medição [unidade correspondente a variável estudada]
\overline{T}	Temperatura média [K]
T	Temperatura [K]
t	Tempo [s]
u	Incerteza de medição [unidade correspondente a variável estudada]
$U_{95\%}$	Incerteza expandida com 95% de enquadramento [-]
$u_c(G)$	Incerteza combinada da medição indireta [unidade correspondente a variável estudada]
UR	Umidade relativa do ar [-]
\overline{V}	Velocidade média [m/s]
V	Velocidade [m/s]
\dot{V}	Vazão Volumétrica [m ³ /s]
\dot{W}_{ele}	Potência Elétrica [kW]
W_{vent}	Energia consumida pelo ventilador [kJ]
\dot{W}_{VC}	Trabalho realizado pelo ventilador [kW]
Z	Altura [m]

Letras Gregas

η_e	Eficiência energética [-]
η_{ex}	Eficiência exergética [-]
$\eta_{térmica}$	Eficiência térmica do secador [-]
$\eta_{ex,térmica}$	Eficiência exergética térmica do secador [-]
ν	Grau de liberdade [-]
ν_{esp}	Volume específico do ar [m ³ /kg _{ar seco}]
Ψ	Parcela física e química do fluxo de exergia específica [kJ/kg]
ω	Umidade absoluta [kg _{água} / kg _{ar seco}]

Subscritos e sobrescritos

0	Inicial
00	Estado Morto
1	Instante 1
2	Instante 2
<i>a</i>	Ar seco
<i>amb</i>	Ambiente
<i>bs</i>	Base seca
<i>bu</i>	Base úmida
<i>e</i>	Entrada
<i>ef</i>	Efetivo
<i>eva</i>	Evaporada
<i>f</i>	Final
<i>g</i>	Grãos
<i>i</i>	Instantânea

<i>k</i>	Fronteira do volume de controle
<i>l</i>	Leito de secagem
<i>lv</i>	Vaporização
<i>m</i>	Medição
<i>max</i>	Máximo
<i>min</i>	Mínimo
<i>s</i>	Saída
<i>se</i>	Secos
<i>t</i>	Instante t
<i>t + Δt</i>	Instante após um intervalo de tempo
<i>teórico</i>	Teórico
<i>u</i>	Úmidos
<i>v</i>	Vapor d'água
<i>w</i>	Água

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	19
1.1. Justificativa	22
1.2. Objetivos	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1. Fundamentação teórica	25
2.1.1. <i>Secagem de Grãos</i>	25
2.1.2. <i>Classificação dos secadores</i>	33
2.1.3. <i>Análise energética e exérgica de secadores</i>	39
2.2. Estado da Arte	43
2.2.1. <i>Estudos experimentais de secagem</i>	43
3. METODOLOGIA	59
3.1. Projeto do secador experimental.	60
3.2. Construção e montagem do secador	64
3.3. Experimentos de secagem do milho	65
3.4. Análise energética e exérgica	71
3.5. Instrumentos de medição e equipamentos	77
3.6. Análise de incertezas	83
4. RESULTADOS	86
4.1. Projeto e Construção	86
4.2. Experimentos de secagem	100
4.3. Análise Energética e Exérgica	117
5. CONCLUSÕES	134
5.1. Sugestão para trabalhos futuros	138
REFERÊNCIAS	139
APÊNDICE A – MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO AGILENT 34980A	145
APÊNDICE B – PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES	172
APÊNDICE C – RELATÓRIO DE CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES	183
APÊNDICE D – PROCEDIMENTO DE DETERMINAÇÃO DA UMIDADE INICIAL DO PRODUTO EM ESTUFA	192
APÊNDICE E – DESENHOS DE FABRICAÇÃO DO SECADOR	199
APÊNDICE F – TABELA DE CUSTOS DO SECADOR	204
APÊNDICE G – RELATÓRIOS DA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE INICIAL DO MILHO PARA CADA EMBALAGEM	205
APÊNDICE H – RELATÓRIOS DOS EXPERIMENTOS DE SECAGEM	211

**APÊNDICE I – PROGRAMAS DE CÁLCULO DE VARIÁVEIS E ERRO DE
MEDIÇÕES DESENVOLVIDOS NO EES _____ 230**

ANEXO A – CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS _____ 236

1. INTRODUÇÃO

A secagem por definição é o processo de remoção de umidade de um produto e pode ser realizada de diversas formas dependendo do material e seu estado, ou da finalidade de utilização do produto. Assim, essa remoção de umidade pode ser realizada por dessecantes químicos, decomposição química, congelamento, compressão, gravidade e força centrípeta. No entanto, o método de secagem mais comum, especialmente para produtos agrícolas, é a secagem térmica, que envolve transferência simultânea de calor e massa. Dessa forma, a secagem térmica é um processo essencial tanto para a agricultura, na preservação de cultivos agrícolas, quanto para diversos setores da indústria, como a produção têxtil, o processamento de laticínios, a produção de cimento, tijolos e telhas, o processamento e tratamento de madeira (PIRASTEH *et al.*, 2014).

A importância da secagem térmica como etapa do pré-processamento de produtos agrícolas aumenta à medida que cresce a produção uma vez que permite antecipar a colheita, disponibilizando a área para novos cultivos, minimiza a perda do produto no campo, aumenta o período de armazenagem sem deterioração do produto, mantém o poder germinativo por mais tempo e impede o desenvolvimento de micro-organismos e insetos (SILVA, 2008; KRIBS e SPOLEK, 1997).

Na secagem, a retirada de umidade do grão ocorre devido a movimentação de água pelo processo de capilaridade, decorrente da diferença da pressão parcial de vapor d'água entre a superfície do grão e o ar que o envolve (BROOKER *et al.*, 1974). Sendo assim, quando a pressão parcial do vapor d'água sobre a superfície do grão for maior que a pressão de vapor d'água do ar de circundante, o grão perderá umidade para o ar, caracterizando a secagem. Caso contrário ele ganhará umidade e por fim se houver equilíbrio entre as pressões não haverá troca de massa (SOUZA, 1996).

A secagem pode ser natural ou artificial, dependendo das condições da utilização do ar. Sendo natural quando o produto está em ambiente atmosférico relativamente seco e exposto ao sol, permitindo-se que ocorra perda do excesso de umidade do grão para o ar. Por outro lado, é considerado artificial quando o produto é submetido a movimentação artificial de ar quente, obtida através de uma fonte térmica de calor antes de entrar no secador (SOUZA, 1996). Nos setores comerciais a

secagem artificial é a mais utilizada uma vez que ela acelera e melhora o processo, além de permitir controle das variáveis do processo dependendo do produto ou finalidade (SILVA, 2008).

Os diferentes modos de secagem artificial podem ser classificados de acordo com a direções de fluxo de grãos e de ar dentro do secador (SOUZA, 1996; SILVA, 2008). Assim, a secagem em camada estacionaria, ou em leito fixo, ocorre quando o fluxo de ar é forçado através de uma camada de produto que permanece estática no interior do secador. Dessa forma, a secagem se processa em camadas, com a formação de três zonas de secagem. A primeira zona, mais próxima a entrada de ar, é onde os grãos estão secos pois já entraram em equilíbrio higroscópico com o ar de secagem e se encontram a uma temperatura mais elevada, a segunda zona é chamada de frente de secagem e é nela em que os grãos sofrem de forma mais efetiva a perda de umidade. Por fim tem-se a zona de grãos úmidos e baixa temperatura, onde o ar de secagem já perdeu a capacidade de transferir calor e de retirar umidade dos grãos.

As principais variáveis que afetam o processo de secagem são a temperatura, a vazão e a umidade relativa do ar de entrada, o tempo de secagem, a geometria e o tipo do secador, além do tamanho e a umidade inicial dos grãos (SHARON, PRIYA E SUBHASHINI, 2016). Assim, uma vez que o nível de qualidade do grão depende de sua finalidade, as condições e limites para as variáveis do processo estão relacionadas às características desejadas para o produto. Dessa maneira, o principal objetivo da secagem é alcançar a distribuição final adequada de umidade no leito de grãos com o mínimo de consumo de energia e no menor tempo, sem perder a qualidade do grão de acordo com sua finalidade (FARKAS *et al.*, 2000).

No âmbito da globalização e da integração comercial a segurança alimentar é um tema que faz parte do cotidiano. Segundo dados da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) cerca de 850 milhões de pessoas passam fome no mundo. A alta dos preços alimentícios, em conjunto com o contexto da insegurança alimentar, tem provocado diversos debates que influenciam o cenário do comércio internacional. A agricultura é o setor mais crítico nas negociações, influenciando diretamente mercados como o de grãos (BAMPI *et al.*, 2016).

O milho é o grão mais produzido no mundo, sendo o segundo alimento mais produzido, perdendo apenas para a cana de açúcar (FAO, 2017). Dessa forma, o

milho é considerado um produto estratégico para a segurança alimentar mundial. O cereal é utilizado para a nutrição humana e alimentação animal, principalmente na avicultura, suinocultura e bovinocultura (produção de rações). Além dessas finalidades, o milho é cultivado para a extração do bioetanol, principalmente nos Estados Unidos. Dessa forma, o aumento do consumo mundial de milho, em suas diversas formas, contribui para que o mesmo obtenha importância no contexto da produção em esfera global. Fato comprovado pela tendência geral de crescimento observado nas exportações de milho brasileiro em virtude das condições externas favoráveis (BAMPI *et al.*, 2016).

Quanto a produção nacional, a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2019), em seu sétimo levantamento para a safra brasileira de grãos, prevê uma produção nacional de 229,5 milhões de toneladas para 2017/18, das quais 88,6 milhões de toneladas são de milho, representando 39% do total de grãos produzidos no Brasil, perdendo apenas para a soja que representa 50% da produção de grãos nacional. No cenário mundial, o levantamento mensal da produção mundial de grãos de novembro de 2018, divulgado pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), aponta o Brasil como terceiro maior produtor mundial de milho com uma produção de 82 milhões de toneladas, atrás apenas dos EUA (371 milhões de toneladas) e da China (259 milhões de toneladas) (USDA, 2018).

A secagem do milho pode ser realizada de forma natural ou artificial. No Brasil o principal método de secagem utilizado é o natural, o que ocorre, principalmente, pela facilidade, economia e falta de equipamentos de secagem artificial nas propriedades. Estima-se que de 20 a 30% da produção nacional de grãos é submetida a secagem artificial e de 70 a 80% da produção é secada em campo, de forma natural, permanecendo na lavoura até atingir o percentual de umidade ideal ao armazenamento, ou seja, 13% de umidade (EMBRAPA, 2015).

A secagem do milho na planta é uma alternativa interessante para agricultores que não dispõem de secadores na propriedade ou mesmo para aqueles agricultores que plantam o milho para consumo na propriedade na alimentação de animais. Contudo, a manutenção das espigas por tempo excessivo na planta, para secagem naturalmente, prejudica a qualidade do milho pela exposição das espigas a intempéries climáticas, ao ataque de pragas de grãos armazenados e fungos (EMBRAPA, 2015).

A secagem artificial é utilizada principalmente por produtores de grande e médio porte, entretanto ainda representa pouco do percentual total da produção do país. Esse fato, demonstra o vasto campo de atuação desse processo no Brasil. A redução do seu custo poderia viabilizar sua utilização por mais produtores, visando o aumento de produção e da qualidade, visto o aumento crescente da demanda mundial de milho.

1.1. Justificativa

A secagem térmica é um processo muito comum na indústria e possui um alto consumo de energia devido à necessidade do aquecimento e movimentação de grandes volumes de ar. Assim, no caso específico da secagem de milho, esse consumo de energia pode representar até 50% do consumo total de energia envolvido em todo o processamento do milho (SILVA, 2008). Além disso, o processo de secagem representa um consumo de 10 a 25% do consumo total de energia das indústrias em países desenvolvidos, especialmente no setor agrícola e de processamento de alimentos. Entretanto, mesmo sendo um processo de alto consumo de energia, os equipamentos ainda possuem eficiências térmicas relativamente baixas na faixa de 25-50% (ERBAY e HEPBASLI, 2013).

Dessa forma, a secagem é um grande consumidor de energia mundial e impacta diretamente nos problemas atuais de escassez de combustíveis fósseis e poluição ambiental. Hoje em dia, a principal fonte de energia do mundo advém dos combustíveis fósseis, e como diversos secadores de grãos ainda trabalham com aquecimento do ar por gás natural, ou fornalha a lenha, cada vez mais, é preciso trabalhar na melhoria da eficiência dos secadores a fim de otimizar o consumo energético (ERBAY e HEPBASLI, 2013).

Por isso, estudos que aprofundem a compreensão e o entendimento acerca do processo de secagem são importantes para melhoria da eficiência dos equipamentos de secagem. De forma geral, esses estudos são conduzidos pelos pesquisadores através de simulações numéricas validadas por resultados experimentais presentes na bibliografia ou realizadas pelos próprios autores dos modelos matemáticos. Esses

modelos, portanto, possibilitam o desenvolvimento de equipamentos, a otimização e a determinação da viabilidade comercial do equipamento (CORREA *et al.* 2007). Assim, diante da importância do tema, diversos estudos dentro dessa área têm sido conduzidos no CEFET-MG criando uma necessidade de validar os modelos matemáticos desenvolvidos na instituição.

Atualmente, esses modelos numéricos, são comparados com dados experimentais de outros trabalhos, que além de não terem os detalhes do experimento completamente elucidados, muitas vezes não estão atualizados, deixando os trabalhos desenvolvidos reféns de questionamentos e impossibilitados de avaliar de forma mais profunda as origens dos erros encontrados. Além disso, o uso desses dados é limitado as condições experimentais em que os dados foram obtidos e as características dos materiais utilizados, dessa forma, os modelos ficam presos a essas condições, impossibilitados de extrapolar ou investigar de forma segura outras formas ou alternativas. Outra prática de validação é a comparação com outros modelos matemáticos já validados, entretanto novamente, essa forma de comparação deixa o modelo desenvolvido refém de erros acumulados, fato que pode atrapalhar o processo de melhoria e desenvolvimento de modelos de secagem cada vez mais representativos e fidedignos ao fenômeno físico estudado.

Para isso é fundamental ter condições de realizar experimentos com condições de processo controladas, seja a fim de diminuir erros e embasar os trabalhos, ou para compreender melhor esses modelos e identificar pontos de melhoria. Além disso, diante de uma comunidade científica cada vez mais exigente quanto a dados experimentais atualizados, ter a capacidade de realizar esses experimentos dentro do próprio CEFET-MG é muito importante para o aumento da qualidade dos trabalhos de secagem aqui desenvolvidos. Dentro desse tema, o milho foi tomado como objeto de estudo por ser o grão mais produzido no mundo e o segundo mais produzido no Brasil, além de sua importância econômica e estratégica no mercado do agronegócio internacional. Portanto, esse trabalho, apresenta a construção de um secador de leito fixo e fluxo contínuo em escala laboratorial e realiza medições de temperatura e umidade do milho durante a secagem.

1.2. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo geral construir um secador de leito fixo e fluxo contínuo de baixo custo e de escala laboratorial para fins experimentais.

Os objetivos específicos são:

1. Realizar medições de temperatura e umidade do milho durante a secagem no equipamento desenvolvido, variando velocidade e temperatura do ar de entrada;
2. Medir o gradiente de umidade ao final da secagem em três alturas diferentes.
3. Realizar um estudo energético e exegético do secador através dos dados experimentais coletados, propondo melhorias para aumento das eficiências energéticas e exegética.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi dividida em fundamentação teórica e estado da arte. O primeiro dedicado à teoria que descreve os princípios básicos da secagem, seus mecanismos e equipamentos. Já o segundo descreve os principais estudos experimentais realizados pelos pesquisadores na área.

2.1. Fundamentação teórica

Este item apresenta, uma revisão a respeito da secagem de grãos com objetivo de caracterizar e compreender as principais variáveis envolvidas, assim serão abordados o processo, o mecanismo, os principais modelos matemáticos de forma geral. Em seguida são apresentados os tipos de equipamentos de secagem e suas vantagens e desvantagens e por fim será apresentado estudos sobre a análise de energia e de exergia no processo de secagem.

2.1.1. Secagem de Grãos

Segundo Bortolaia (2011), os grãos de cereais têm como uma de suas características a higroscopia, ou seja, eles têm a capacidade de estar em permanente troca de água com o ar ambiente, absorvendo ou cedendo umidade de acordo com a diferença de pressão de vapor de água entre a superfície do produto e o ar que o envolve. Dessa forma, se a pressão de vapor sobre a superfície do produto for maior que a pressão de vapor de água no ar ambiente tem-se perda de umidade do grão e, portanto, a secagem do produto. Por outro lado, quando o inverso ocorrer, tem-se umedecimento do produto e por fim, quando as pressões forem iguais ocorrerá o equilíbrio higroscópico (BROOKER, BAKKER-ARKEMA e HALL, 1974).

Entretanto essa troca de umidade com o ambiente, além de outros fatores, está diretamente ligada as características individuais do grão. Segundo Silva (2008) em geral, para os grãos pequenos, a perda de umidade é mais fácil que para os grãos de grandes dimensões. Além disso, grãos desprovidos de camadas protetoras (sementes nuas) secam mais rapidamente do que aqueles que apresentam estrutura integral (casca). Isso ocorre porque a umidade se distribui no grão de formas diferentes e, portanto, dependendo da região onde a umidade se encontra, tem-se uma maior ou menor dificuldade de retirada de umidade.

De acordo com Bortolaia (2011) o grão é composto basicamente por matéria seca e úmida, sendo que a água (parte úmida) pode se apresentar de três formas básicas:

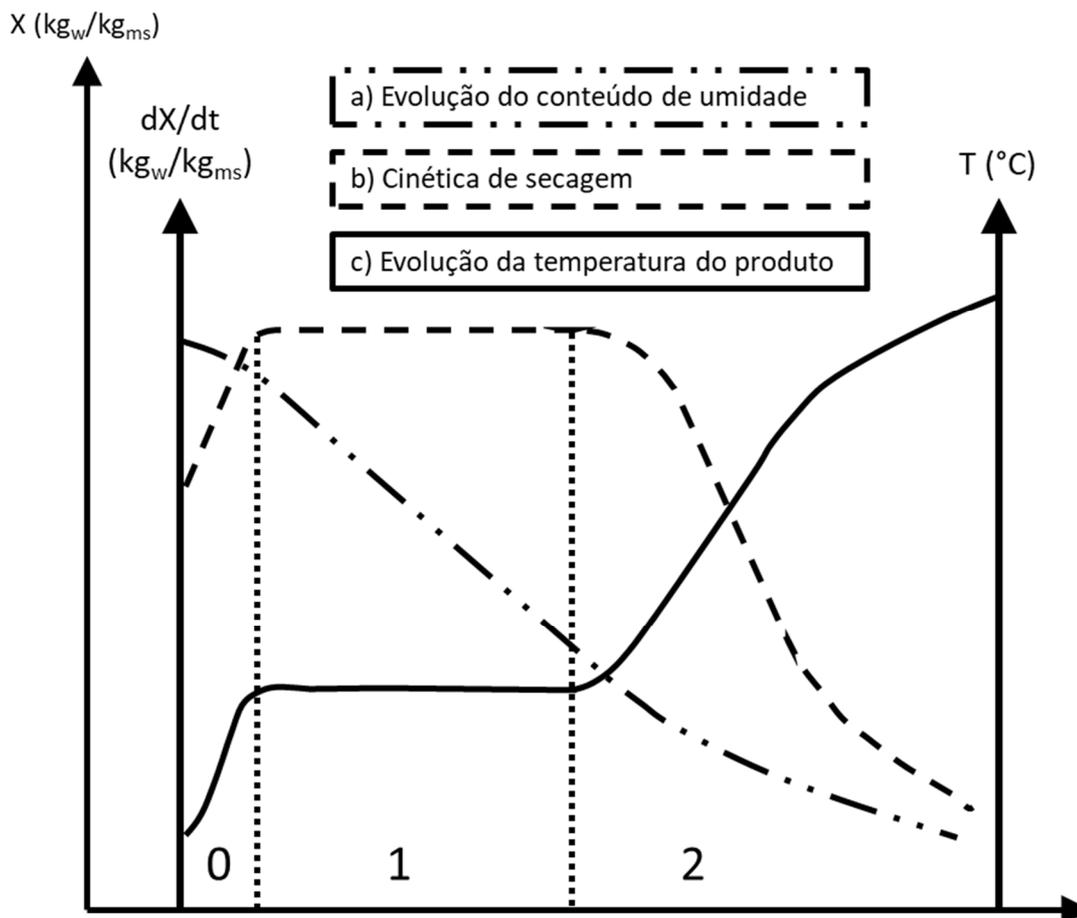
1. Umidade superficial: é a umidade localizada na parte externa do grão e que se encontra no estado líquido. Caracteriza-se pela fácil remoção através da evaporação;
2. Umidade intersticial: é a umidade livre no interior dos grãos, denominados canais intersticiais. Na secagem é estabelecido um gradiente de pressão osmótica entre as partes interna e externa do grão, forçando o aumento da pressão interna e a saída da umidade do mesmo. Esta umidade é também de remoção relativamente fácil;
3. Umidade de constituição: localizada nas células, encontra-se quimicamente ligada aos componentes dos grãos (vitaminas, proteínas, carboidratos, enzimas e gorduras). Não é removida durante a secagem.

No processo de secagem é possível remover a umidade superficial e reduzir a intersticial, permanecendo a umidade de constituição, que representa cerca de 8 a 10% da umidade total (WEBER, 2005). Entretanto para fins práticos de armazenagem de grãos o conteúdo de umidade adequado a ser atingido é da ordem de 10 a 13%, dependendo do tipo e a finalidade do grão.

A secagem é um processo simultâneo de transferência de calor e massa. Uma vez que o produto é colocado em contato com ar quente, ocorre transferência de calor do ar para o produto devido a diferença de temperatura. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor d'água existente entre o ar e a superfície do produto determina a transferência de massa na forma de vapor de água. Ao mesmo tempo, à medida que a umidade da superfície do produto é reduzida, a umidade interna do grão

se movimenta para a superfície por difusão e escoamento tanto na forma líquida quanto na de vapor. No decorrer da secagem, as variações das transferências de calor e de massa caracterizam a ocorrência três períodos distintos de secagem conforme Figura 1 (PARK *et al.*, 2007).

Figura 1 - Curvas de secagem e períodos de secagem.



Fonte: Adaptado de PARK *et al.*, 2007.

No primeiro período, tido como período 0, o produto geralmente está mais frio do que o ar de secagem, assim, devido à baixa pressão parcial de vapor de água na superfície do produto, tanto a transferência de massa quanto a velocidade de secagem são baixas. Entretanto o calor em excesso gera uma elevação da temperatura do produto, que por sua vez eleva a pressão e a velocidade de secagem. Este fenômeno continua até que a transferência de calor compense exatamente a transferência de massa. A duração desse período é insignificante em relação ao período total de secagem.

No segundo período, ou período 1, tem-se um equilíbrio entre a transferência de calor e a transferência de massa, o que resulta em uma velocidade constante de secagem. Isso ocorre porque a grande disponibilidade de umidade livre dentro do grão, permite que o movimento de migração do interior para a superfície seja suficiente para manter uma condição de umidade saturada na superfície do produto. Assim, esse período permanece enquanto essa condição for mantida.

No período 2, observa-se uma taxa decrescente de secagem, fato decorrente da impossibilidade de manter uma condição de água saturada na superfície do produto. Durante esse período a troca de calor não é mais compensada pela transferência de massa e a temperatura do produto tende à temperatura do ar. Assim, o processo de secagem é finalizado quando a velocidade de secagem é nula, uma vez que o grão atingiu a umidade de equilíbrio com o ar de secagem.

Segundo Brooker, Bakker-Arkema e Hall (1974), o comportamento dos grãos durante a secagem ocorre de maneira distinta dependendo da espessura da camada de produto. Dessa forma, o processo de secagem é dividido em dois modelos diferentes: os modelos de camada fina e os modelos de camada espessa.

Bortolaia (2011) define que os modelos de camada fina são aqueles que consideram a variável temporal e desconsideram a variável espacial. Uma vez que, nesse modelo as temperaturas e os teores de umidade do ar e do grão em todo o volume são iguais, em cada instante de tempo. Por outro lado, o mesmo autor, define os modelos de camada espessa como modelos que consideram simultaneamente as variáveis temporal e espacial. Podendo ser de uma, duas ou três dimensões, com a temperatura e o teor de umidade, para o grão e para o ar, variando de acordo com a posição espacial.

Segundo a norma ASAE S448 (1998) a camada fina é definida como uma camada de material totalmente exposta a corrente de ar durante a secagem. A profundidade, ou espessura da camada deve ser homogênea e não ultrapassar três camadas de grãos. Chen e Wu (2001) definiram camada fina como a camada cuja espessura tem como requisito a estabilidade da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem após a passagem pela camada de grãos.

Parti (1993) dividiu as equações de secagem para camada fina em três categorias: teóricos, semi-empíricos e empíricos. Segundo Bortolaia (2011), os modelos teóricos consideram os diferentes mecanismos de transporte de umidade e

consistem na solução das equações da transferência de massa e de calor dentro do grão. Enquanto, os modelos semi-empíricos são os que se baseiam na Lei de resfriamento de Newton, aplicada para a transferência de massa e secagem isotérmica. E por fim, os modelos empíricos fornecem relações diretas entre o teor de umidade e o tempo de secagem, obtidas através do ajuste de curvas resultantes de dados provenientes de experimentos.

De maneira geral, as equações dos modelos de camada fina são utilizadas para a obtenção da cinética de secagem, estabelecendo equações de teor de umidade em função do tempo para determinadas condições do processo de secagem (BORTOLAIA, 2011). Dessa forma, testes de camada fina são fundamentais, sendo usado principalmente para encontrar os valores de constantes das equações empíricas de secagem e validar equações de equilíbrio de transferência de calor e massa (MISRA E BROOKER, 1980).

Segundo Cenkowski, Jayas e Pabis (1993) o modelo de camada espessa se refere a um leito de grãos, com ou sem movimento, secado por convecção e no qual existe um gradiente de temperatura e umidade. Modelos de secagem em camada fina por definição não possuem gradientes de temperatura e umidade.

Dessa forma, quando aplicados diretamente não descrevem adequadamente os processos de transferência em leito profundo, embora, como mencionado, os modelos de camada fina possam fornecer dados úteis para a previsão de taxas de secagem, que por sua vez podem ser utilizadas em simulações de leito profundo (PARRY, 1985).

Assim, as equações de secagem em camada fina podem formar um sistema de equações capaz de descrever um modelo de camada espessa, o que fez com que muitos autores descrevessem os modelos de leito profundo como uma série de camadas finas sucessivas (BROOKER *et al.*, 1974; SHARP, 1982; LIU E BAKKER-ARKEMA, 2001; MADHIYANON, SOPONRONNARIT e TIA, 2001; SITOMPUL, ISTADI e WIDIASA, 2001; SRIVASTAVA e JOHN, 2002; TANG, CENKOWSKI e MUIR, 2004; KASHANINEJAD *et al.*, 2007).

Os modelos de camada espessa, de maneira geral, são divididos em três tipos: os modelos de não equilíbrio (BROOKER, BAKKER-ARKEMA e HALL, 1974), os de equilíbrio (SOPONRONNARIT, 1988) e os modelos logaritmos (HUKIL, 1947) (TIRAWANICHAKUL *et al.*, 2003). Os modelos de não equilíbrio assumem que não

existe equilíbrio de calor e massa entre o ar de secagem e os grãos do leito. Assim, um sistema de equações diferenciais parciais é formulado com base nas leis de transferência de calor e massa, nas teorias de secagem de corpos sólidos únicos e nas teorias gerais de secagem, a fim de representar o modelo de secagem (CENKOWSKI, JAYAS e PABIS, 1993). Esses modelos são os mais precisos dentre os três modelos por apresentarem menos restrições e simplificações que os outros. Por esse motivo, o seu custo computacional é consideravelmente mais alto que os anteriores, entretanto com o aumento da capacidade computacional, a implementação desse tipo de modelo tem sido viabilizada cada vez mais, tanto para pesquisas quanto para projetos (BORTOLAIA, 2011).

Os modelos de equilíbrio são baseados nas condições de equilíbrio entre o ar de secagem e o grão, obtidos sobre uma camada fina de grãos, na qual se assume que as condições são constantes ao longo de um determinado incremento de tempo. Assim o leito profundo se compõe de uma série de camadas finas que interagem entre si cada qual com seu balanço. A exatidão alcançável das previsões feitas usando tais modelos é, no entanto, um pouco restrito pelas suposições feitas em sua derivação (PARRY, 1985). Dessa forma, esses modelos são mais aplicados em condições onde o ar de secagem possui baixa vazão e baixa temperatura de secagem, até 5°C acima da temperatura ambiente, isso porque nessas condições a secagem de leito profundo estacionária ocorre próxima a condição de equilíbrio, aproximando as hipóteses desse modelo as condições reais da secagem (CENKOWSKI, JAYAS e PABIS, 1993).

Por fim os modelos logaritmos apresentado por Hukil, em 1947, considera que a taxa de variação espacial da temperatura do ar com relação a profundidade do leito é proporcional à taxa de variação do teor de umidade do produto com relação ao tempo. O que equivale a assumir que a energia térmica sensível perdida pelo ar fornece apenas calor latente de vaporização ao grão, negligenciando o aquecimento sensível do mesmo. A utilização dos modelos logaritmos na simulação da secagem de grãos foi desenvolvida e aplicada em muitas pesquisas (BARRE, BAUGHMAN e HAMDY, 1971; SABBAH, KEENER e MEYERS, 1979) principalmente envolvendo secagem em leito profundo estacionário com baixa temperatura de entrada. Sua aplicação também está ligada à sua simplicidade de aplicação e baixo custo computacional.

Sharon, Priya e Subhashini (2016) fizeram uma revisão sobre os modelos de secagem de leito fino e profundo, destacando os principais fatores que influenciam o processo como sendo a temperatura, a vazão e a umidade do ar de secagem, além da umidade, temperatura e a profundidade do leito de grãos, o tipo, a variedade e o tamanho do grão e o tempo de secagem. A temperatura do ar de secagem é diretamente proporcional a taxa de secagem, assim quanto maior a temperatura do ar, menor o tempo de secagem, porém isso também aumenta o consumo de energia utilizada para o aquecimento do ar e eleva o risco de dano ao produto. Quanto a umidade de equilíbrio esse fator é inversamente proporcional, assim, quanto maior a temperatura menor a umidade de equilíbrio do grão. Dependendo da aplicação final do grão a temperatura de secagem é limitada devido a qualidade necessária do produto. Os limites de temperatura do grão de milho para algumas aplicações, segundo a EMBRAPA (2015), podem ser encontrados na Tabela 1.

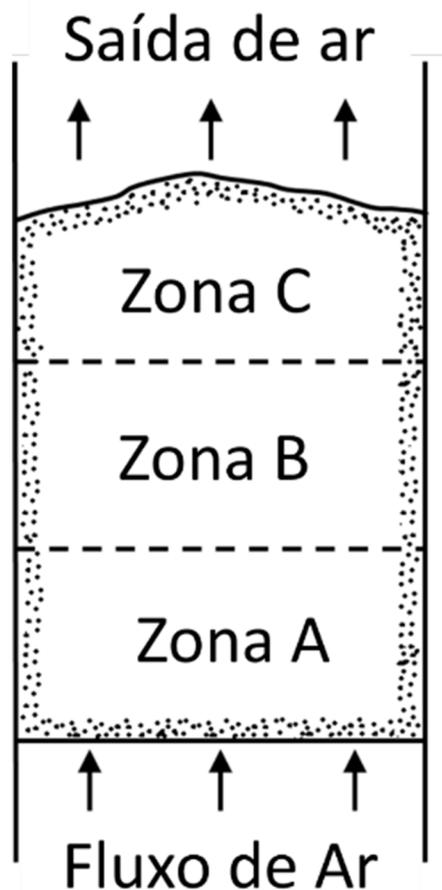
Tabela 1 – Temperaturas limite de secagem para diferentes destinos do milho.

Destino	Temperatura Limite	Consequências do não respeito ao limite
Semente	44°C	Comprometimento do vigor e germinação das sementes
Indústria de moagem e derivados para alimentação humana	55°C	Comprometimento da qualidade do grão e aumento do percentual de grãos quebrados
Fabricação de ração animal	82°C	Comprometimento da qualidade do grão e aumento do percentual de grãos quebrados

Fonte: Elaborado pelo autor a partir da EMBRAPA, 2015.

Segundo Sharon, Priya e Subhashini (2016), o tempo de secagem aumenta com a profundidade do leito de leito de grãos, porque a medida que o ar de secagem passa através do leito, a sua umidade relativa (UR) sobe até atingir 100%, quando não é possível mais secar o grão. A secagem de grãos em leito fixo, portanto, ocorre em camadas, com a formação de zonas de secagem conforme a Figura 2.

Figura 2 – Zonas de secagem em leito profundo de grãos.



Fonte: Adaptada de SHARON, PRIYA e SUBHASHINI, 2016.

Na zona "A" a pressão de vapor de água dos grãos e do ar ambiente atingiram equilíbrio, dessa forma a temperatura do grão e do ar de secagem é a mesma e o grão é considerado seco, uma vez que sua umidade já se tornou a menor possível nas condições do ar de secagem. Na zona "B", tem-se a zona de secagem propriamente dita, onde a secagem do grão ocorre devido a diferença de pressão de vapor de água entre o grão e o ar. Por fim na zona "C", o ar de secagem já atingiu 100% de UR e não é capaz de absorver mais umidade, além disso a temperatura do ar é a mesma do grão e não há troca de calor. Ou seja, nessa região a temperatura e a umidade dos grãos não foram alteradas ainda pelo processo de secagem (SHARON, PRIYA E SUBHASHINI, 2016).

2.1.2. Classificação dos secadores

O método de secagem pode ser natural ou artificial, dependendo das condições de manejo do produto e utilização do ar. Na secagem natural o produto está em ambiente atmosférico relativamente seco ou exposto ao sol, permitindo-se assim perda de umidade para o ambiente, e na secagem artificial são utilizados processos manuais ou mecânicos, tanto no manejo do produto quanto na passagem de ar através da massa de grãos (SILVA,2008).

Para grandes volumes de produção a secagem natural não é adequada devido à dependência do processo a fatores atmosféricos e às limitações do meio onde é realizada. Dessa forma, os estudos de secagem se concentram nas formas de secagem artificiais (SILVA, 2008). Assim, os equipamentos desenvolvidos para a secagem de produtos agrícolas, denominados secadores, são por sua origem equipamentos de secagem artificial. Esses equipamentos são fabricados sob diversas formas construtivas e operacionais, visando eficiência do processo e manutenção da qualidade do produto durante e após a secagem (MARTINS, 2015).

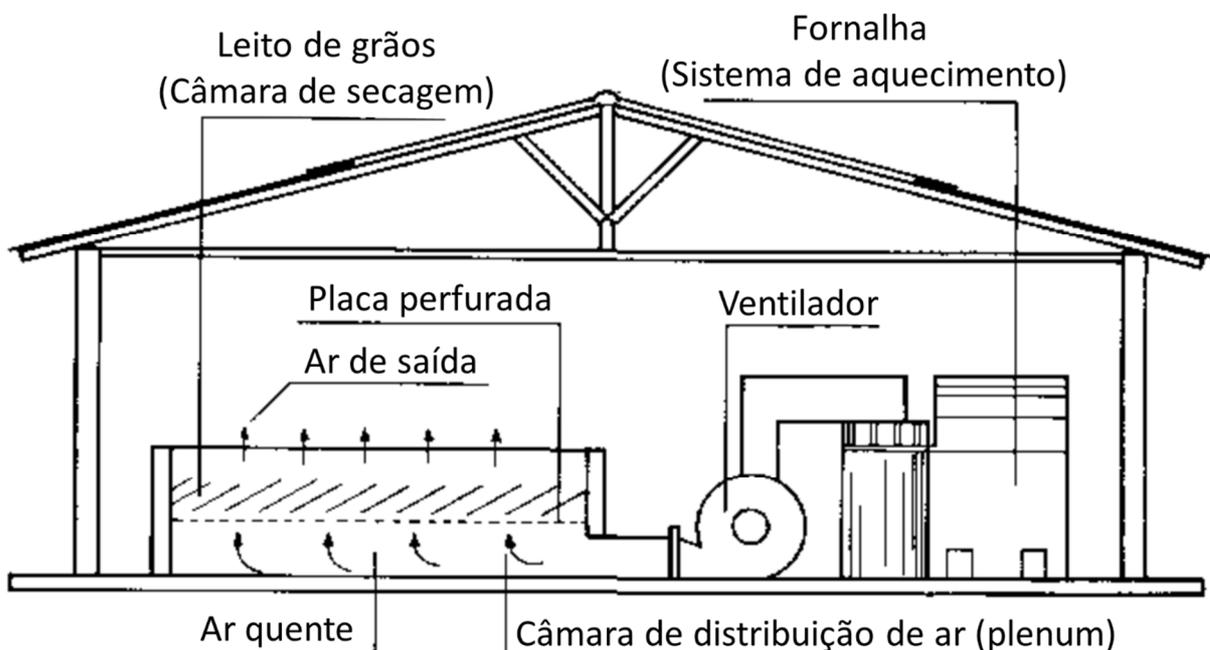
Portanto, os secadores podem ser classificados de diversas maneiras, conforme suas características particulares (BORTOLAIA, 2011). Dalpasquale (1991) classifica os secadores de acordo com o fluxo de produto como sendo:

- Estacionário:
 - Secador de leito fixo;
 - Secador de convecção natural.
- Contínuo:
 - Cascata ou calhas;
 - Secador de fluxo cruzado;
 - Secador de fluxo contracorrente;
 - Secador de fluxo concorrente.
- Intermitente.

Os secadores estacionários de leito fixo são os secadores onde o ar avança pelo leito de grãos sem que haja movimento dos mesmos. De maneira geral esse tipo de secador é composto por quatro elementos principais: o sistema de aquecimento de ar, o ventilador, a câmara de distribuição de ar ou “*plenum*” e a câmara de secagem.

Na Figura 3 estão destacados os quatro elementos principais de um secador de leito fixo.

Figura 3 – Esquema básico de um secador de leito fixo.



Fonte: Adaptada de DALPASQUALE, 1991.

O sistema de aquecimento pode ser de qualquer tipo, desde que seja capaz de aumentar a temperatura do ar até os limites recomendados para o produto a ser secado e que não haja contaminação do ar proveniente da fonte de calor. O ventilador deve ser suficientemente potente para conseguir vencer a resistência da coluna de grãos com a vazão desejada, portanto deve conseguir impor uma boa pressão estática. A câmara de distribuição de ar ou pleno tem como função transformar a pressão dinâmica do ar em pressão estática, uniformizando a distribuição de ar dentro do secador. Por fim, a câmara de secagem é um recipiente com um fundo de chapa de metal perfurada, capaz de suportar o peso do produto úmido sem bloquear o ar de secagem e sem permitir passagem do produto (DALPASQUALE, 1991).

Os secadores de leito fixo também realizam a secagem por batelada, portanto na maioria dos casos, são projetados para secar um lote por dia, uma vez que a secagem pode demorar várias horas. Após a secagem o produto pode ser resfriado dentro do próprio secador, através da utilização do ventilador sem fornecimento de

energia para o aquecimento do ar. As principais variáveis do sistema de secagem em leito fixo são a espessura do leito, teor de umidade inicial, vazão de ar, temperatura do ar e tempo de secagem (BROOKER, BAKKER-ARKEMA e HALL., 1974). Quanto mais espesso o leito de grãos maior a diferença de umidade entre os grãos do fundo do leito e os da superfície para uma dada velocidade e temperatura do ar. Dessa forma, para leitões mais profundos a tendência é que seja utilizado temperaturas do ar mais elevadas a fim de minimizar essa diferença (DALPASQUALE,1991).

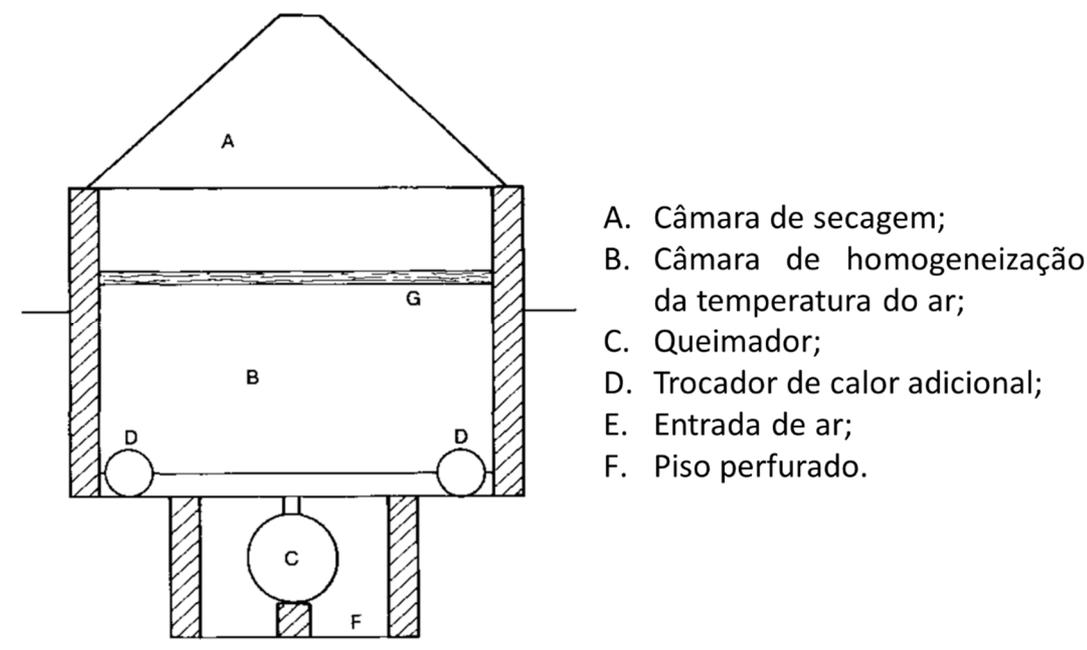
A temperatura de secagem afeta diretamente a taxa de secagem. Quanto maior a temperatura, maior a taxa de evaporação e maior heterogeneidade da umidade do leito de grãos. Com o aumento da temperatura, a quantidade de grãos super secos não varia muito, mas a quantidade de grãos com alto teor de umidade é maior (BROOKER, BAKKER-ARKEMA e HALL, 1974). O fluxo de ar influencia, principalmente, na taxa de secagem e na distribuição da umidade, em relação à profundidade da camada do produto. Ao aumentar o fluxo de ar, a taxa de secagem aumenta e as heterogeneidades de umidade e temperatura do produto diminuem. O tempo de secagem diminui com o aumento do fluxo de ar, assim como a eficiência de secagem; isso tudo para condições fixas de temperatura, espessura do leito e umidade inicial e final do produto. Quanto maior a umidade inicial do grão ou menor o teor final de umidade, maior será o tempo de secagem (DALPASQUALE,1991).

Os sistemas de secagem de leito fixo têm como principais vantagens a capacidade variável do secador; seu dimensionamento, construção e operação relativamente simples. Além disso, devido ao emprego de materiais mais comuns em sua construção o investimento de construção desse tipo de secador é menor quando comparado aos secadores comerciais. Por fim, se a câmara de secagem é um silo com um fundo falso, no final da colheita também pode ser usado para armazenamento do produto (DALPASQUALE,1991).

Os secadores de convecção natural são os equipamentos que movimentam o ar através da diferença de pressão, produzida pela diferença de temperatura e umidade do ar de secagem e do ar ambiente. Esse tipo de processo é muito aplicável em áreas de pequena produção, sem acesso à energia elétrica, com pouca capacidade técnica e sem capital para adquirir um equipamento de secagem. Esses secadores podem ser construídos com materiais característicos da região e com mão de obra não qualificada. Além disso, podem utilizar lenha ou subprodutos da

propriedade rural como combustível para o secador. Um exemplo desse tipo de secador e suas partes está na Figura 4 (DALPASQUALE,1991).

Figura 4 – Esquema básico de um secador convectivo.



Fonte: Adaptada de DALPASQUALE, 1991.

Os secadores contínuos são os equipamentos que possuem movimentação tanto dos grãos quanto do ar de secagem. Os secadores em cascata ou calhas são compostos por uma série de canais invertidos em forma de V dispostos em linhas alternadas ou cruzadas dentro do corpo do secador. Os grãos caem por gravidade por entre as calhas e o ar entra ou sai por baixo das calhas, sendo uma fileira de entrada e uma de saída de ar. Dessa forma, os grãos ao passarem pelo secador sofrem fluxos de ar tanto na mesma direção de seu movimento quanto na direção oposta conforme apresentado na esquerda da Figura 5. A direita da Figura 5 está ilustrado o esquema de distribuição das canaletas em um secador de cascata do tipo cruzado. Os secadores de cascata estão entre os primeiros modelos de secadores contínuos usados comercialmente. A principal desvantagem desses secadores são o alto custo inicial, a quantidade de material necessária para fazer as calhas e os fatores ambientais. Nesses secadores devido à velocidade do ar relativamente alta na saída dos dutos, as impurezas mais leves encontradas na massa do grão são arrastadas para fora do secador. Nos países desenvolvidos, as leis mais rigorosas neste campo

obrigaram os fabricantes a instalar filtros na saída do ar desses secadores, em conformidade com as regras de controle da poluição ambiental. Dessa forma esses secadores têm sido substituídos gradualmente nos países desenvolvidos (DALPASQUALE,1991).

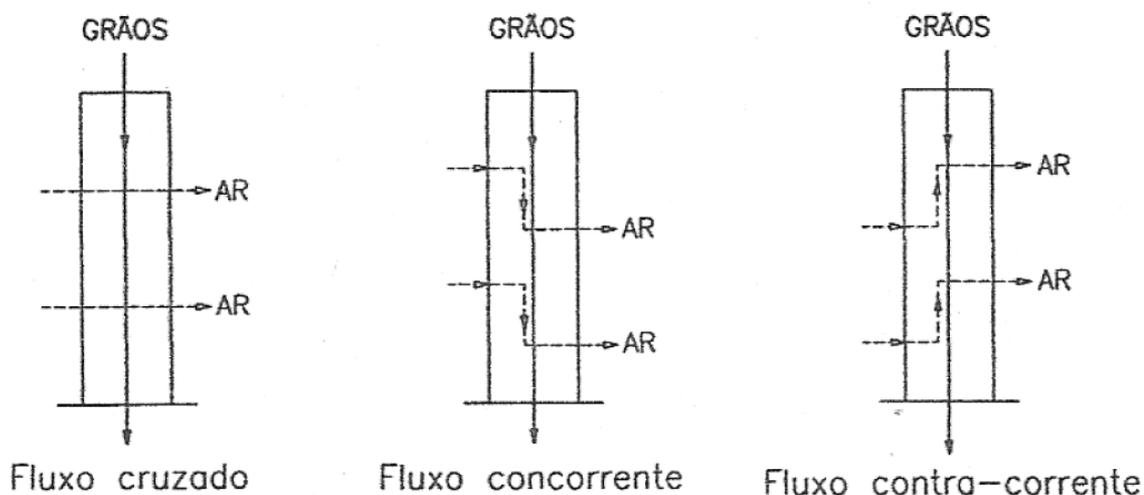
Figura 5 – Esquema de movimentação do ar e de distribuição de canaletas em um secador de cascata.



Fonte: Adaptada de DALPASQUALE, 1991 e WEBER, 2005.

Seguindo a classificação tem-se os secadores contínuos de fluxo concorrente, contracorrente e cruzados. Todos esses secadores utilizam torres conforme o secador de calhas e os grãos, na maioria dos casos, correm no sentido de cima para baixo aproveitando a gravidade. Dessa forma, a diferenciação entre esses sistemas está no sentido do ar em relação ao movimento dos grãos, conforme mostrado na Figura 6. Nos secadores de fluxo concorrente o ar e os grãos avançam paralelamente, no mesmo sentido. Por outro lado, nos equipamentos de fluxo contracorrente o ar e o grão avançam paralelamente, em sentidos opostos. Por fim na secagem de corrente cruzada: o ar avança perpendicularmente ao sentido do escoamento dos grãos (DALPASQUALE,1991).

Figura 6 – Esquema do fluxo de ar em secadores contínuos.

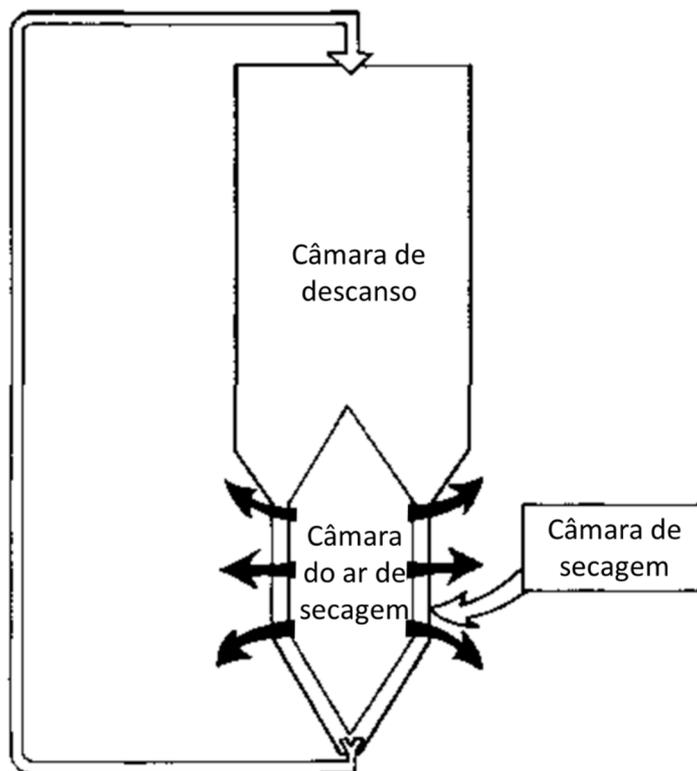


Fonte: Adaptada de WEBER, 2005.

Os secadores intermitentes são os equipamentos por onde o grão precisa passar mais de uma vez pelo processo para que se atinja o nível de umidade desejado, isso pode ser necessário porque certos produtos agrícolas não suportam secagem contínua até atingir o teor de umidade necessário, sem sofrer danos físicos e fisiológicos consideráveis. Um exemplo disso são as sementes em geral, o arroz e os produtos que são colhidos com altos níveis de umidade. Estes produtos devem ser secos de forma intermitente a fim de evitar danos a qualidade do produto (DALPASQUALE,1991).

Dessa forma, os secadores contínuos podem ser usados como secadores intermitentes. Na Figura 7 mostra-se o diagrama de um secador de fluxo intermitente, que têm em sua parte superior uma câmara de repouso para os grãos. Nestes secadores, os grãos permanecem na câmara de repouso cerca de 90% do tempo total e apenas 10% em contato com o ar de secagem. O objetivo da permanência mais longa na câmara de repouso é que há redistribuição da umidade nos grãos, o que facilita a próxima secagem. Ao mesmo tempo, devido ao curto período em que os grãos estão expostos ao ar de secagem, a remoção de umidade dos grãos, em cada passagem através da câmara de secagem é pequena e exige um elevado número de passagens pelo processo (DALPASQUALE,1991).

Figura 7 – Esquema de um secador intermitente de fluxo cruzado.



Fonte: Adaptada de DALPASQUALE, 1991.

2.1.3. Análise energética e exegética de secadores

Segundo Aghbashlo *et al.* (2013) os secadores ocupam uma posição importante na indústria para processamento e preservação de alimentos e materiais industriais. Mais de 400 tipos de secadores foram relatados na literatura, dos quais apenas 50 tipos são utilizados e estão disponíveis no mercado. A secagem é uma das operações industriais que mais consomem energia, devido ao seu alto calor latente de vaporização e à inerente ineficiência do uso de ar quente como o meio de secagem mais aplicado. Dessa forma, esse processo consome grandes quantidades de energia e libera uma quantidade significativa de óxidos de carbono no meio ambiente. Assim, uma das questões-chave da tecnologia de secagem é reduzir o custo das fontes de energia para aumentar a eficiência das instalações de secagem e da qualidade dos produtos secos. Para isso, a abordagem mais básica e tradicional utilizada é a análise

energética que estima os vários processos de conversão de energia, avaliando os sistemas com base na primeira lei da Termodinâmica.

Segundo Silva (2008) a eficiência energética de um secador de grãos pode ser determinada como a razão entre a energia necessária para evaporar a umidade do produto e a quantidade real de energia fornecida ao processo de secagem, que inclui a energia gasta para o aquecimento do ar e para realizar sua movimentação através do leito de grãos. No entanto, essa análise não fornece informações sobre os aspectos de irreversibilidade dos processos termodinâmicos, sendo incapaz de distinguir as diferentes qualidades de energia. Assim, devido a essas deficiências e falhas na análise de energia, a análise de exergia tem sido muito utilizada por fornecer uma visão mais realista dos sistemas e processos, mostrando-se uma ferramenta mais poderosa para avaliações de engenharia (AGHBASHLO *et al.*, 2013).

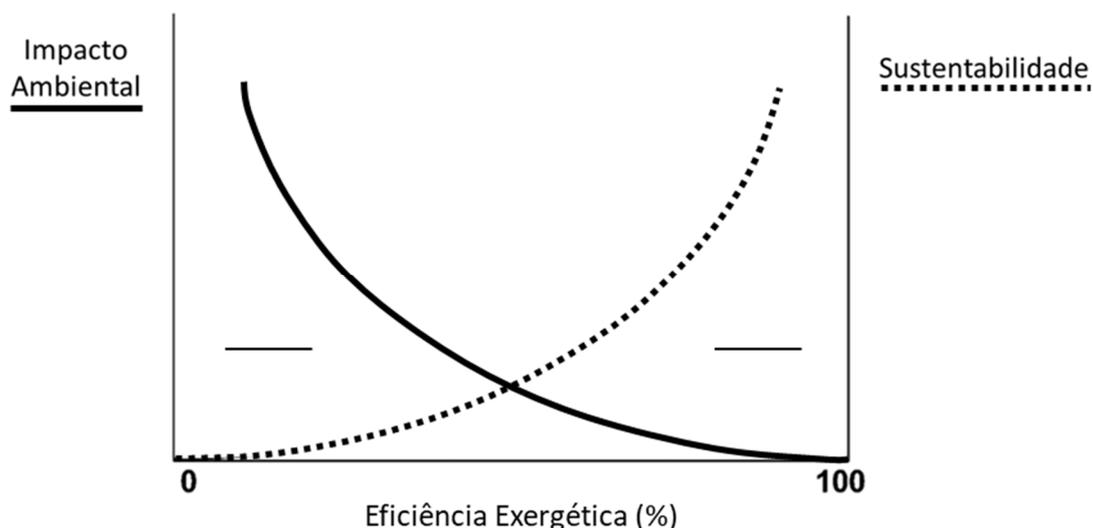
A exergia é um valor ligado a disponibilidade de energia de um sistema, portanto ela é definida como o máximo de trabalho útil que pode ser obtido de um sistema em um determinado estado e em um ambiente específico. Assim, através da análise exergética é possível identificar e quantificar as irreversibilidades do sistema e assim propor melhorias no equipamento (ÇENGEL e BOLES, 2013). Dicer e Rosen (2005) apontam a análise exergética como uma técnica que usa os princípios de conservação de massa e energia junto com a segunda lei da termodinâmica para analisar os projetos e melhorar a qualidade da energia dos sistemas.

Sobre esse ponto de vista a análise de exergia oferece uma visão abrangente e mais profunda do processo permitindo que novas ideias e melhorias possam ser percebidas. Portanto, ela é aplicável para fins de avaliação e otimização de processos. No entanto, vale ressaltar que as avaliações exergéticas de desempenho não apenas distinguem as magnitudes, a localização e as causas de irreversibilidades, mas também permitem que os engenheiros reconheçam os componentes individuais da eficiência. A avaliação de desempenho baseada em exergia e posterior otimização de instalações de secagem tem sido um interesse crescente entre os pesquisadores nos últimos anos (AGHBASHLO *et al.*, 2013).

Dicer e Rosen (2005) escreveram um artigo sobre os benefícios da utilização dos princípios termodinâmicos, com enfoque especial nos conceitos que englobam a exergia, para as energias renováveis e o desenvolvimento sustentável. No artigo os

autores apresentam um gráfico qualitativo relacionando a eficiência exérgica aos impactos ambientais e a sustentabilidade, conforme a Figura 8.

Figura 8 – Gráfico qualitativo da relação entre eficiência exérgica, impacto ambiental e sustentabilidade.



Fonte: Adaptado de DICER e ROSEN, 2003.

Como pode ser visto, o aumento da eficiência exérgica causa um aumento da sustentabilidade e uma redução do impacto ambiental. Assim sendo, quando a eficiência exérgica se aproxima de 100% o impacto ambiental associado ao processo se aproxima de zero, isso porque nesse caso a energia é convertida de uma forma para outra sem perdas. Quanto a sustentabilidade o seu valor aproxima de infinito porque o processo se aproxima da reversibilidade. Por outro lado, quando a eficiência exérgica se aproxima de 0% a sustentabilidade se aproxima de zero porque toda a energia utilizada no processo se torna perda não gerando ganho ao processo. O impacto ambiental, por sua vez, tende a infinito a medida que quanto mais recursos forem utilizados para realizar o processo mais exergia será consumida pelas suas irreversibilidades (DICER E ROSEN, 2005).

Aghbashlo *et al.* (2013) realizou uma revisão de literatura sobre o uso da análise exérgica em operações e instalações de secagem, tratando das aplicações mais importantes da análise de exergia na tecnologia de secagem. Além disso o estudo aponta os benefícios, habilidades desse tipo de análise e identifica as perspectivas de pesquisas futuras. O estudo criou tabelas para sete processos de

secagem classificados pelo autor, destacando os principais estudos envolvendo análise exergética e seus resultados. As categorias estudadas no artigo foram: secagem em lote ou bandeja, secagem contínua ou industrial, sistemas de secagem assistidos por bombas de calor, secagem em leito fluidizado, secagem solar, liofilização (*freeze drying*), secagem por atomização, secagem a vácuo e secagem flash.

O estudo apontou que o interesse pela análise exergética de sistemas de secagem está crescendo devido à menor eficiência térmica desses sistemas aliados ao aumento do preço dos combustíveis fósseis e da eletricidade, além das complicações ambientais advindas dos gases emitidos pelos secadores e seus impactos no efeito estufa e no aquecimento global. Os autores deixam claro que a análise exergética ainda está sendo desenvolvida e possui um potencial de estudo dentro da tecnologia de secagem para além da análise de energia, os estudos da cinética de secagem e a simulação da transferência de calor e massa do processo (AGHBASHLO *et al.*, 2013).

O levantamento de literatura do artigo, mostrou que a análise de exergia foi aplicada em poucos sistemas de secagem, o que abre campo para os pesquisadores investirem no estudo de outros sistemas de secagem, buscando métodos de aumento de eficiência como reutilização do ar de exaustão, incorporação de sistemas de recuperação de calor, sistemas de desumidificação do ar de entrada, entre outros. Por outro lado, os autores também destacam a dificuldade da análise exergética experimental devido à demora do processo e os custos elevados dos instrumentos de alta precisão para redução dos erros. Essa dificuldade abre campo para a simulação computacional do processo utilizando as equações de continuidade, massa, momento, energia, entropia-geração e balanço exergético como forma de redução de custos e tempos seja para projetar, ou para entender melhor o processo. O artigo aponta também, que há falta de trabalhos de simulação no campo de avaliação exergética de sistemas de secagem, destacando a importância de os pesquisadores desenvolverem equações numéricas para a eficiência exergética de diferentes processos de secagem (AGHBASHLO *et al.*, 2013).

Aghbashlo *et al.* (2013) também sugerem um controle de sistemas de secagem baseados no conceito de exergia, através da criação de políticas de controle operacionais que minimizem as irreversibilidades que ocorrem no processo de

secagem, apontando como interessante para o futuro sistemas de secagem totalmente automatizados para monitorar e controlar o desempenho exergético dos secadores e a qualidade do produto seco simultaneamente. Os autores comentam sobre a grande quantidade de pesquisadores apresentando análises exergéticas de sistemas de secagem renováveis, como o solar. No entanto, também afirma que existe uma deficiência por parte da literatura em sistemas de secagem renováveis industriais. Por fim o autor destaca a importância de integrar a análise exergoeconômica com a qualidade dos produtos secos, utilizando as ferramentas de otimização e controle para aumentar a economia de energia, reduzir os impactos ambientais e obter produtos aceitáveis.

2.2. Estado da Arte

O objetivo deste tópico é apresentar os principais trabalhos científicos ligados a secagem de grãos com enfoque nos estudos experimentais. Dessa forma, serão descritos trabalhos dos últimos dez anos publicados na área a fim de demonstrar as tendências e novas ideias de pesquisa.

2.2.1. Estudos experimentais de secagem

A secagem de grãos tem sido estudada por vários pesquisadores devido à grande complexidade do processo e a necessidade de modelos confiáveis tanto para o projeto de secadores mais eficientes quanto para definir condições ideais do processo para cada caso. Dessa forma, modelos experimentais têm sido utilizados para levantar parâmetros de secagem, nortear a modelagem computacional do processo e para realizar a validação desses modelos.

Ferreira *et al.* (2008) fizeram um estudo da viabilidade da utilização de uma chaminé solar para secagem de produtos agrícolas. Assim, um protótipo de chaminé solar foi construído e os parâmetros de velocidade, temperatura e umidade do ar foram

monitorados em função da radiação solar incidente. O protótipo apresentou um aumento máximo de temperatura de $27 \pm 2^{\circ}\text{C}$ (relacionado à temperatura do ar ambiente) e uma redução da umidade relativa do fluxo (em termos da média anual) de $63 \pm 4\%$ para $53 \pm 4\%$. Esses valores garantem a viabilidade do dispositivo como secador solar, principalmente para grãos, apresentando vantagens quando comparados com a secagem natural ao sol. Os testes de secagem foram realizados com grãos de café, banana e tomate partidos ao meio. Durante os testes realizados o fluxo médio anual de massa observado foi de $1,40 \pm 0,08 \text{ kg s}^{-1}$, permitindo com que os autores estimassem a capacidade de secagem do dispositivo como 440kg de produto (320kg de produtos por $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ de fluxo de ar gerado).

Por fim, Ferreira *et al.* (2008) atribuíram a baixa eficiência térmica observada, a difusão de calor através do solo, a baixa transmitância da radiação solar e a alta transmitância da radiação infravermelha da cobertura plástica. Apontando como possíveis soluções para a redução dessas perdas a implementação de isolamento térmico no solo e substituição do material plástico da cobertura.

Hemis *et al.* (2009) realizaram testes de secagem de camada fina com o trigo, caracterizando o processo de secagem através do fenômeno de fluxo de massa. Os autores utilizaram os seguintes parâmetros para o experimento de camada fina: temperatura do ar de secagem entre 40 a 60°C , umidade relativa do ar de secagem de 10 a 30%, velocidade do ar de $0,7 \text{ m s}^{-1}$ e umidade inicial do produto de 26 a 31% (base seca). O teor de umidade de equilíbrio do trigo foi determinado usando isotermas de dessorção obtidas a partir dos dados de secagem em camada fina. Os autores desenvolveram um modelo de equilíbrio de camada espessa usando o balanço de massa e energia e as características do ar de secagem obtidas nos experimentos de secagem de camada fina. Esse modelo desenvolvido foi validado por secagem de trigo em secador de laboratório com velocidade do ar de $1,4 \text{ m s}^{-1}$, temperatura de 60°C e umidade relativa do ar de 10 e 20%.

Zare e Chen (2009) produziram um secador de grãos de leito fixo em laboratório a fim de validar seu modelo de secagem de arroz. Os autores realizaram experimentos em um leito de 25 cm de arroz com as temperaturas do ar de secagem de 45 e 50°C para os fluxos de massa de 0,1, 0,16 e $0,22 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, as diferenças de valores de umidade média dos grãos entre o modelo numérico e as medidas experimentais foram em média de 9%, chegando a um pico máximo de aproximadamente 14%. Notou-se

que quanto maior o tempo de secagem maior o erro, sendo assim os valores de maior desvio ocorreram no tempo máximo de secagem, igual a 150 minutos. Esse resultado pode ser considerado satisfatório, visto que na literatura são mencionados erros que variam de 10 a 15%. Fato que valida o modelo desenvolvido para ser utilizado para encontrar condições ótimas de secagem do arroz para esse caso, visando a eficiência energética. Enfim os autores utilizaram o modelo validado para otimizar os parâmetros do processo com base no consumo mínimo de energia específica, dessa forma foi encontrado o valor de $0,03\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de fluxo de massa e uma temperatura de 35°C para o ar de secagem. Os autores também propõem um estudo mais aprofundado onde fatos como qualidade do arroz, custo fixo e variável do secador, duração da secagem ou a capacidade do processamento do secador, o custo de mão de obra e as condições climáticas também pudessem ser consideradas no processo de otimização.

Bortolaia (2011) desenvolveu a modelagem matemática e a simulação do processo de secagem de soja em secadores do tipo torre através de modelos de camada fina e camada espessa. Através dos estudos experimentais o autor obteve a dinâmica de secagem da soja em camada fina para temperaturas do ar de secagem de 45 a 110°C , velocidade do ar de secagem de 0 (ou seja, convecção natural, secagem realizada em estufa) a $2,5\text{m/s}$, umidade relativa do ar de secagem de 10 a 30% e teor de umidade inicial do grão de 13 a 32% . Foi identificado que o fator dominante no tempo inicial de secagem é a transferência de massa na superfície de contato entre o grão e o ar. Assim, o aumento da velocidade do ar de secagem nos intervalos investigados acelera o processo de secagem. Entretanto essa influência é reduzida com a redução do teor de umidade do grão durante o processo de secagem.

Nesse trabalho foram encontradas diferenças relativas médias percentuais sobre a razão de umidade, entre os dados experimentais e os resultados da simulação inferiores a $9,5\%$ para todos os casos de camada fina, valores considerados satisfatórios pelo autor. Os experimentos desenvolvidos em camada espessa para temperatura do ar de secagem de 105°C , velocidade do ar de secagem de $0,5 \text{ m/s}$ e teor de umidade inicial dos grãos de 22% na base seca (b.s), resultou em diferenças relativas percentuais médias para o secador de $5,1\%$ para a variação do teor de umidade do grão, $3,84\%$ para a temperatura do ar e de $5,74\%$ para a temperatura do grão, todos com relação ao tempo. Por fim o autor, realizou um estudo do ganho em

eficiência energética pelo uso do reaproveitamento do calor do ar de recirculação que provocou uma economia média de combustível para os casos analisados entre 28,5 e 41%, dependendo do esquema do secador. O rendimento da secagem, obtido pela relação entre a energia necessária para a evaporação da umidade dos grãos e a energia fornecida ao ar de secagem para a evaporação da umidade desses grãos apresentou valores entre 39,7 e 68% para os esquemas de secadores analisados.

Balby, Sahin e Ulker (2013) realizaram experimentos para compreender a cinética de secagem dos grãos de pistache com umidade inicial de 32,4% (base úmida) em função das condições de secagem em um sistema de leito fixo. Os experimentos foram realizados em três temperaturas do ar de secagem (40, 60 e 80°C) e três velocidades do ar (0,05, 0,075 e 0,1 m / s). Os autores concluíram que o aumento da temperatura diminui o tempo total de secagem, além disso, a taxa de secagem é maior quanto menor for a altura do leito. Os autores também selecionaram alguns modelos para descrever os dados experimentais encontrados, dentre os modelos selecionados, o modelo de Midilli e Kucuk foi o que mostrou uma melhor concordância com os dados experimentais. Afinal as energias de ativação foram calculadas como 29,2 kJ mol⁻¹ e os valores de difusividade efetiva foram calculados entre 1,38 e 4,94 ± 10⁻¹⁰ m² s⁻¹, dependendo da temperatura do ar.

Ryu, Jung e Yi (2013) elaboraram um modelo 3-D de um secador utilizando a abordagem de camada fina, com o objetivo de melhorar a homogeneização do ar dentro das bandejas de secagem e prever o desempenho do projeto empregando técnicas de dinâmica de fluidos computacionais baseadas no método dos volumes finitos. Os autores realizaram simulações numéricas de diversos casos variando os desenhos internos e os objetos de secagem, a fim de minimizar o tempo de secagem. O modelo foi validado através da comparação do teor de umidade simulado da pimenta com os dados experimentais realizados para diferentes tempos de secagem. Finalmente, concluíram que é especialmente importante obter um fluxo homogêneo de distribuição através das bandejas, uma vez que a taxa de secagem é fortemente dependente do fluxo de ar que passa pelas bandejas. Assim, após a validação do modelo os autores puderam avaliar numericamente algumas soluções de homogeneização do fluxo. Comprovando a utilidade de estudos numéricos para os estudos de melhoria de projetos de equipamentos.

Ferreira, Gonçalves e Maia (2014) analisaram a viabilidade do emprego de um secador solar de cabine na secagem de um resíduo sólido industrial proveniente da decapagem de fios de aço. Os autores monitoraram o fluxo de ar e as condições ambientais a fim de analisar a viabilidade do secador, obtendo para o secador solar valores de eficiência térmica instantânea entre 9,7 a 29,5%, e eficiência de secagem entre 5,2 a 7,2%. Foi destacado que as condições do ambiente afetaram o desempenho do secador, sendo que níveis mais altos de radiação solar promoveram maior ganho de temperatura e menores valores de umidade relativa de ar de secagem, resultando em menores teores de umidade final do produto de secagem, para um mesmo tempo de secagem. Por fim os autores concluíram que é viável a utilização do secador, uma vez que foi possível reduzir de 68% para 11% o nível de umidade do resíduo em oito horas de secagem.

Torki-Harchegani *et al.* (2014) estudaram a secagem em leito profundo (20cm) de arroz com casca de forma experimental e teórica com a intenção de observar a umidade ao longo da coluna de grãos. Assim, os teores de umidade em quatro camadas diferentes do leito, foram medidas nas condições de 40, 50 e 60°C de temperatura e 0,4 e 0,9m s⁻¹ para a velocidade do ar de secagem, sendo que o tempo de secagem definido para o fim dos ensaios foi de 100 minutos. Os valores experimentais foram comparados com os preditos pelo modelo numérico de não-equilíbrio da secagem do arroz com casca desenvolvido pelos autores. Essa comparação gerou erros relativos entre 3,02 e 12,40%, sendo que os maiores erros foram encontrados nas maiores temperaturas de secagem.

Os autores puderam observar que para todos os tempos de secagem experimentados, quanto mais próximos da superfície do leito maior o teor de umidade. Nos momentos iniciais do experimento a zona de secagem não ultrapassou a altura de 15 cm, sendo que as camadas inferiores apresentavam maiores taxas de secagem quando comparadas as superiores. A taxa de secagem das camadas inferiores diminuiu continuamente durante todo o tempo de secagem, enquanto para as camadas superiores a taxa de secagem teve um aumento inicial seguido de uma diminuição continua que convergiu para uma taxa fixa para todo o leito.

Liu *et al.* (2015) realizaram experimentos para validar uma nova forma de modelar a secagem de milho em camada espessa baseada na combinação do modelo de secagem com potencial de água e os modelos tradicionais. Os autores realizaram

um experimento variando a temperatura do ar de secagem 45 a 65°C com intervalos de 10°C. A velocidade do ar de secagem foi ajustada como 0,3, 0,4 e 0,5m s⁻¹. O modelo desenvolvido obteve desvios de umidade entre os valores de simulação e experimento para diferentes condições, sendo o maior desvio igual a 2,97%. Entretanto tal modelo não se aplica a sistemas cuja pressão seria um fator influente, como um sistema de secagem a vácuo. Enfim os autores puderam demonstrar em seus dados experimentais que a dessorção e absorção de umidade podem coexistir no processo de secagem em leito profundo.

Martins (2015) dimensionou, construiu e avaliou um secador experimental com controle de temperatura e velocidade do ar de secagem, visando estudos de secagem de produtos agrícolas em camada fina. O autor realizou experimentos com grãos de cártamo, a fim de avaliar a cinética de secagem do equipamento projetado. Os grãos de cártamo foram submetidos à diferentes níveis de temperatura (40, 50, 60, 70 e 80°C) e velocidade do ar (0,4; 1,0 e 1,6m s⁻¹). Foi avaliado também as propriedades físicas dos grãos de cártamo para diferentes teores umidade durante a secagem, em uma temperatura de 40°C.

Martins (2015) observou que coeficiente de difusão efetivo aumenta com a elevação da temperatura e da velocidade do ar de secagem enquanto, a energia de ativação tem seu valor reduzido, para a faixa de temperatura de 40 à 80°C, conforme se aumenta a velocidade do ar. Todas as propriedades físicas dos grãos de cártamo foram influenciadas pela redução do teor de umidade, tendo suas magnitudes reduzidas com exceção da relação superfície volume. A contração volumétrica da massa e a unitária dos grãos de cártamo foi de aproximadamente 16 e 13%, respectivamente, com a redução do teor de água.

Finalmente, o autor concluiu que o secador experimental construído funcionou de modo satisfatório para o desenvolvimento de pesquisas de secagem de produtos agrícolas em camada fina e espessa, permitindo o controle dos parâmetros de temperatura e velocidade do ar de secagem. Além de destacar a possibilidade da utilização do equipamento em ensaios de aeração de grãos.

Vukić *et al.* (2015) apresentaram dados experimentais sobre a cinética de secagem do milho em leito fixo e fluidizado. A pesquisa experimental foi conduzida em um aparato de laboratório e foi realizada uma análise da influência de parâmetros operacionais na cinética de secagem do milho, esses parâmetros operacionais foram

a velocidade do meio de secagem, o número de fluidização, a temperatura do meio de secagem e a altura do leito fixo. Com base nos dados experimentais cinéticos de secagem do milho no leito fixo, o autor determinou a altura do leito elementar como 15 mm. Posteriormente através da generalização dos dados experimentais sobre a cinética de secagem do leito de milho elementar foi possível obter-se a relação analítica para o coeficiente de transferência de massa por umidade interna.

Com o experimento também foi possível verificar que o aumento do número de fluidização e da velocidade do meio de secagem não tem influência significativa na cinética de secagem do milho, exceto no período inicial da secagem, quando esse processo é mais intenso para maiores números de fluidização. Vukić *et al.* (2015) também determinou a qualidade do produto seco pela avaliação de amostras após a secagem, assim foi determinado que 92% dos grãos apresentavam rachaduras. O que evidenciou que o grau de fluidização tem grande influência na forma, tamanho e número de fissuras no grão de milho. Em valores mais altos do grau de fluidização, as rachaduras no grão são muito mais proeminentes, particularmente naqueles grãos que foram secos na camada superior do leito.

Beigi, Torki-Harchrgani e Tohidi (2017) investigaram a cinética de secagem convectiva do arroz com casca em leito profundo para diferentes condições operacionais, a fim de investigar a influência da temperatura, da vazão e da umidade relativa do ar de secagem no tempo e na eficiência energética de secagem. Além disso, os autores aplicaram a técnica de modelagem de redes neurais para prever o tempo do processo, os consumos de energia e de energia específica e as eficiências térmica e de secagem. Diferentes redes neurais artificiais foram aplicadas para prever essas características e as melhores metodologias foram determinadas.

Os experimentos de Beigi, Torki-Harchrgani e Tohidi (2017) foram realizados em cinco níveis de temperatura (40, 50, 60, 70 e 80°C), três níveis de velocidade (0,5, 0,8 e 1,1 m s⁻¹) e quatro níveis de umidade relativa para o ar de secagem. (40, 50, 60 e 70%). Durante cada experimento, 20cm de arroz com casca foi posicionado uniformemente na câmara de secagem e o teor de umidade das amostras foram monitoradas por pesagem através de balança digital. A condição de encerramento das experiências foi definida pelo teor final de umidade do arroz, assim os experimentos foram conduzidos até que o produto atingisse 12% de umidade na base úmida.

Beigi, Torki-Harchrgani e Tohidi (2017) demonstraram que a temperatura e a velocidade são inversamente proporcionais ao tempo de secagem, ao passo que a umidade relativa é diretamente proporcional ao tempo de secagem. Os resultados mostraram que temperaturas mais altas combinadas com baixos níveis de vazão e de umidade relativa do ar de secagem, melhoram a eficiência energética do processo. Por fim os autores concluem que as redes neurais é uma ferramenta computacional poderosa para modelagem de sistemas complexos e dinâmicos. Podendo contribuir com sucesso na estimativa dos parâmetros de secagem estudados.

Beigi, Tohidi e Torki-Harchegani (2017), analisaram a eficiência exergética do processo de secagem de leite fixo em estufa e em um secador de laboratório, variando diversos parâmetros de secagem para examinar as perdas de energia, exergia destruída e eficiência exergética. A eficiência exergética do processo de secagem em leite fixo e o de secagem em estufa ficaram na faixa de 5,10 a 29,41% e 32,64 e 67,75%, respectivamente. O grande motivo dessa diferença deve-se a grande perda energética na saída do secador. Além disso, foi constatado que temperaturas e fluxos de ar mais altos provocam aumento da destruição de exergia.

Elgamal, Kishk e Elmasry (2017), utilizaram uma câmara térmica para validar um modelo de secagem de arroz de leite fixo em camada espessa obtendo resultados de correlação de 0,92 entre as imagens térmicas e as temperaturas previstas pelo via modelagem CFD, também foram observados um alto grau de similaridade entre os perfis de distribuição de temperatura resultantes do modelo e os das imagens térmicas. Os autores projetaram e fabricaram em laboratório um secador convectivo de ar forçado para secar uma coluna de 250mm de arroz com casca *in natura*. Os autores avaliaram a secagem de 50 e 60°C de temperatura e 0,1 e 0,2m s⁻¹ de velocidade para o ar de entrada e o experimento foi conduzido durante 120 minutos. Assim as imagens térmicas do arroz dentro do compartimento de secagem foram adquiridas durante os processos de secagem.

Elgamal, Kishk e Elmasry (2017) também compararam os valores de umidade dos grãos obtidos nos experimentos com os calculados no modelo, resultando em uma correlação de 0,96, o que segundo os autores prova a viabilidade da utilização do modelo desenvolvido para a secagem de arroz. Além disso, os autores evidenciaram um coeficiente de determinação de 0,94 entre os valores de temperatura

registrados por termopares posicionados dentro do leito e os valores de temperatura exportados das imagens térmicas.

Enfim, os autores destacam o alto desempenho do modelo utilizado na predição da temperatura do arroz no leito, obtendo coeficientes de determinação acima de 0,90. Sendo que, esses valores de correlação foram maiores na primeira metade do tempo de secagem (60min) do que no final do processo de secagem (120min) sob todas as condições testadas. Fato atribuído à maior diferença de temperatura entre a câmara de secagem e o ambiente ao redor nas etapas finais da secagem, resultando em uma maior dissipação de calor do sistema.

Maciel (2017) comparou o desempenho energético e exergético de um secador solar ativo do tipo cabine a um secador elétrico convectivo na secagem de cacau, através do monitoramento dos parâmetros de secagem. O autor efetuou o experimento da secagem do cacau até a umidade de 11% em base seca, obtendo um tempo de secagem de 18h no secador elétrico para 4kg de cacau e 8h no secador solar para 1,5kg de produto. A eficiência térmica média do secador elétrico e do secador solar foram de 60% e 31%, respectivamente. A eficiência de secagem no secador elétrico foi de 8,3%, ao passo que no secador solar foi de 4,8%. Ambos os secadores atingiram eficiências exergéticas superiores a 90% com baixa destruição de exergia, sendo a eficiência exergética média no secador elétrico igual a 93,4% e no secador solar igual a 95%. Finalmente, o autor concluiu que a secagem do cacau em secadores solares é uma solução viável, tendo em vista que os maiores produtores de cacau do mundo se encontram próximos a linha do equador e possuem bons índices de radiação solar, que é um fator crucial no desempenho térmico desse tipo de secador. Entretanto, o autor salientou que a secagem solar não é uma solução mundial sendo mais adequada para processos de baixa temperatura.

Rabha, Muthukumar e Somayaji (2017) projetaram e desenvolveram um secador solar de convecção forçada, a fim de estudar a cinética de secagem da pimenta malagueta e encontrar o modelo que melhor descrevesse o processo com base nos dados experimentais obtidos. Medições foram realizadas simultaneamente utilizando o secador solar e em sol aberto, o teor de umidade das amostras foram reduzidas de seu conteúdo inicial de umidade de 589,6% (base úmida) para o teor final de umidade de 12% (base úmida) em 123h para o secador solar e 193h sob o sol aberto. O processo de secagem da pimenta fantasma ocorreu apenas no período de

taxa decrescente. Para descobrir o modelo de secagem mais adequado, onze modelos de secagem de camadas finas foram ajustados com os dados experimentais. Os resultados mostraram que o modelo de Midilli e Kucuk foi o mais adequado para descrever o processo de secagem da pimenta no secador solar de convecção forçada e os modelos Page e de Page modificado foram os mais adequados para o processo de secagem ao sol aberto.

Tohidi, Sadeghi e Toriki-Harchegani (2017) realizaram experimentos em uma coluna uniforme de 20cm de arroz recém colhido a 20% de umidade inicial, os testes foram realizados com as temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80°C, velocidades de 0,5, 0,8 e 1,1m s⁻¹ e umidade relativa de 40, 50, 60 e 70%. Os autores observaram que o aumento da temperatura e da velocidade foi diretamente proporcional a taxa de secagem, ao passo que para níveis mais altos de umidade relativa do ar, os tempos de duração de secagem foram maiores. O consumo total de energia variou de 0,37 a 1,85kWh para as condições de temperatura de 80°C, velocidade de 0,5m s⁻¹ e umidade relativa de 40%; e temperatura de 40°C, velocidade de 1,1 m s⁻¹ e umidade relativa de 70%, respectivamente.

Os autores também avaliaram qual o percentual de energia térmica e mecânica gasto no processo, obtendo 94,48 e 5,52%, respectivamente. Os resultados da análise de energia indicaram que a secagem de arroz em temperaturas mais altas e níveis mais baixos de velocidade e umidade relativa do ar de secagem tiveram melhor eficiência energética. Foi verificado que o número de grãos fissurados estão fortemente relacionados com a taxa de secagem de maneira diretamente proporcional.

Darvish, Azadbakht e Noralahi (2018) investigaram o efeito do pré-tratamento osmótico (denominado pelos autores como OP) e a recirculação de ar (denominado pelos autores como AR) nas análises de energia e exergia na secagem de cogumelos em um secador de leito fluidizado de laboratório. Os autores secaram 150g de cogumelos, o que resultou em 5cm de altura de produto, nas temperaturas de 30, 40 e 50°C e velocidades de 3, 5 e 7m s⁻¹ para o ar de secagem. Foram testados cogumelos sem e com pré-tratamento osmótico e submetidos de 0 a 100% de recirculação do ar.

Os autores concluíram que a taxa de utilização de energia que variou de 0,10 a 0,269 sem recirculação de ar (denominado pelos autores como NAR), aumentou

para a faixa de 0,890 a 0,964 com a recirculação de ar a 100%. Quanto a energia específica, ficou claro que tanto o pré-tratamento osmótico quanto a recirculação de ar diminuem significativamente o consumo de energia, sendo o mais significativo entre eles a recirculação de ar, uma vez que o teste com OP/100%AR consome aproximadamente 11% da quantidade de energia específica consumida pela condição sem o pré-tratamento osmótico e a renovação de ar. Ao passo que o teste com OP/NAR consomem aproximadamente 41% de energia específica utilizada por essa mesma condição. Na análise exergética os processos estudados também mostraram um efeito significativo no aumento da eficiência exergética, que variou entre 10,40 e 30,57% para OP/100%AR e 0,81 a 3,94% para sem OP/NAR. Também foi verificado que a perda de exergia aumentou com o aumento da temperatura do ar de secagem e da velocidade do ar. Assim, os autores concluíram que a melhor condição sobre o ponto de vista energético e exergético para a secagem de cogumelos em leito fluidizado é a com temperatura de secagem de 30°C e velocidade de 3 m s⁻¹ com pré-tratamento osmótico e 100% de recirculação de ar.

Fadhel *et al.* (2018) apresentaram um estudo comparativo da cinética de secagem solar do fosfato tunisiano em três condições: em ambiente aberto ao sol, em estufa e em um concentrador parabólico de pratos. As temperaturas máximas observadas no fosfato ocorreram próximas ao meio dia, sendo 50 °C em sol aberto, 59°C em estufa e 102°C no foco do concentrador parabólico. Os três processos atingiram os padrões de comercialização que exigem um teor de umidade residual entre 0,02 e 0,04 kg de água por kg de matéria seca. Os teores de água residual encontrados após cinco horas e vinte minutos de teste foram de 0,042 para ambiente aberto, 0,022 para estufa e 0,006 kg de água por kg de matéria seca para as bandejas no foco do concentrador parabólico. As curvas de taxa de secagem do fosfato obtidas mostraram dois períodos de secagem, um primeiro onde a taxa de secagem é constante e um segundo onde a taxa se torna decrescente. Os autores explicam que durante a taxa de secagem constante, a secagem se dá por evaporação da água disponível na superfície, assim a medida que essa água acaba a taxa de secagem diminui devido à baixa concentração de água na superfície do produto.

Além do estudo experimental foram testados modelos de secagem em camada fina, a fim de encontrar o modelo mais adequado para descrever os dados experimentais encontrados. Os autores chegaram à conclusão que o modelo de Midilli

foi o mais adequado para descrever a curva de secagem da camada fina de fosfato para todos os casos estudados. Fadhel *et al.* (2018) apontaram o concentrador parabólico como o que obteve o melhor desempenho de secagem, mas que a sua capacidade em volume ainda é relativamente baixa, assim é necessário encontrar novos processos que sejam capazes de aliar maior produção a utilização de concentração solar para secagem de fosfato.

Zhao *et al.* (2018) estudaram o efeito da composição e da estrutura física do grão na distribuição e no processo de transferência de umidade, a fim de obter melhores parâmetros de secagem do grão de milho. Foi construído um modelo do grão com quatro diferentes componentes: casca, endosperma córneo, farináceo endosperma e embrião. Considerando que esses componentes possuem diferentes coeficientes de difusão e a mesma condutividade térmica. Através do software do COMSOL *Multiphysics* foi simulado o processo de transferência de calor e massa no interior do grão de milho durante a secagem em camada fina.

Os resultados das análises demonstraram que para o milho com umidade de 39,33% (base seca) secando na temperatura de 70°C, com velocidade de 1,2m s⁻¹ e umidade relativa de 12 ± 2% para o ar de secagem, com 10 minutos de secagem a diferença entre a parte central e a superfície do grão foi de 0,11 kg/kg na base seca. Assim, os autores propuseram um tempo de espera após esse desbalanceamento de umidade a fim de aguardar o grão se homogeneizar, para só assim expor o grão novamente a temperatura de secagem. Através da simulação foi encontrado um tempo de espera de 60 minutos, que é o tempo no qual o grão apresenta uma homogeneização quase completa. Isso ocorre porque a mudança na homogeneização do grão torna-se cada vez menor à medida que o tempo passa. Assim o aumento no percentual de homogeneização encontrada para 120 minutos foi apenas 1% maior que o de 60 min, que é um ganho de homogeneidade muito baixo em vista do grande aumento do tempo de espera necessário para atingi-lo.

Com essas informações Zhao *et al.* (2018) realizaram experimentos de secagem de milho para comprovar os dados encontrados nas simulações. A secagem foi realizada de maneira contínua e em estágios, e os resultados demonstraram que para a secagem do milho de 39,33% até 14%, foram necessários 120 minutos de secagem contínua nos parâmetros definidos anteriormente. Por outro lado, com estágios de secagem de 10 minutos e tempo de descanso de 60 minutos, o tempo de

secagem com ar quente diminui para 48 minutos, ou seja, são 72 minutos a menos de gasto com aumento de temperatura do ar de secagem. É bom esclarecer que esse tempo não leva em conta os intervalos de 60 minutos entre os estágios, dessa forma foram necessárias 4 pausas, totalizando um tempo de 4 horas e 48 minutos de processo. Entretanto os autores destacam a possibilidade de otimização do processo de secagem, uma vez que com base na possibilidade do uso da secagem de estágios é possível reduzir os gastos energéticos e elevar a eficiência do processo.

Neste tópico foi apresentado o estado da arte dos trabalhos ligados a secagem de grãos com enfoque nos estudos experimentais. Dessa forma, é possível comprovar a grande importância dos estudos experimentais para os avanços tecnológicos na área de secagem, seja para provar a viabilidade da utilização de um equipamento, ou mesmo para a validação ou elaboração de um modelo numérico. Além disso, foi demonstrado como um mesmo secador pode ser utilizado para a realização de testes em diversos produtos conforme realizado por Ferreira, Gonçalves e Maia (2014) e Marciel (2017) que utilizaram o mesmo secador solar para o estudo em diferentes produtos, além de Toriki-Harchegani *et al.* (2014), Beigi, Toriki-Harchegani e Tohidi (2017) e Tohidi, Sadeghi e Toriki-Harchegani (2017) que confeccionaram três trabalhos diferentes com o mesmo equipamento e o mesmo produto variando os modelos e as variáveis observadas e os objetivos do trabalho.

No total, foram apresentados no estado da arte dezenove estudos, sendo onze deles de leito fixo, dos quais sete são de camada espessa, que é o foco principal deste trabalho. Dessa forma, esses trabalhos serviram de base para o secador desenvolvido, tanto para definir o esquema básico e os componentes necessários, como para definir algumas dimensões para o equipamento.

Dessa maneira, observando o tamanho dos secadores utilizados na literatura pesquisada, as temperaturas e velocidades de entrada e as variáveis monitoradas pelos autores foi possível otimizar o processo de desenvolvimento do equipamento já evitando diversos problemas que poderiam ser ocasionados por decisões inadequadas de projeto. Assim, todas essas informações foram de suma importância para nortear e embasar os próximos capítulos deste trabalho, tanto do ponto de vista do equipamento quanto do experimento. O resumo de todas as informações coletadas no estado da arte e utilizadas diretamente no desenvolvimento tanto da metodologia do experimento como do secador estão apresentados na Tabela 2, onde foram

definidos para cada autor o secador, o produto, o tamanho da câmara de secagem e o tipo de experimento executado. Além do tempo de secagem, a temperatura e a velocidade de entrada e a presença ou não de controle de umidade do ar no equipamento. Os itens das tabelas que não foram preenchidos, ficaram assim, por falta de informações ou por se tratar de um parâmetro que não era foco central no trabalho, seja do ponto de vista de controle, relevância de controle ou mesmo medição desse dado no contexto do trabalho.

Tabela 2 - Resumo do estado da arte parte 1.

(continua)

Autores	Secador	Produto	Experimento	Tempo	Câmara de secagem	Te (°C)	Ve ou Q	Controle de UR
Ferreira et al. (2008)	Chaminé solar	Diversos	Bandejas	76 a 139h	-	Solar com 27 a mais que o ambiente	-	não
Hemis et al. (2009)	Leito fixo	Trigo	Camada fina	250min	140 x 120 x 500mm	40 a 60	0.7 m s ⁻¹	10 a 30%
Zare e Chen (2009)	Leito fixo	Arroz	Camada espessa (250mm)	150min	400 x 400 x 400mm	45 e 50	0,1; 0,16; 0,22 kg (m ² s) ⁻¹	não
Bortolaia (2011)	Leito fixo	Soja	Camada fina e espessa (200mm)	120min	130 x 130 x 400mm	45 a 110	0 a 2,5m s ⁻¹	sim
Balby, Sahin e Ulker (2013)	Leito fixo	Pistache	Camada fina	400 min	Ø50 x 22mm	40, 60, 80	0,05, 0,075, 0,1m s ⁻¹	não
Ryu, Jung e Yi (2013)	Bandejas	Pimenta	Camada fina	12h	-	60	-	não
Ferreira, Gonçalves e Maia (2014)	Bandejas	Resíduo sólido industrial	Bandejas	8h	0,5 x 0,9x 0,55m	Solar com 23,7 de média a mais que a ambiente	-	não
Torki-Harchegani et al. (2014)	Leito fixo	Arroz	Camada espessa	100min	Ø140 x 200mm	40, 50 e 60	0,4 e 0,9m s ⁻¹	não
Liu et al. (2015)	Leito fixo	Milho	Camada espessa	16h	Ø250 x 300mm	45, 55, e 65	0,3, 0,4 e 0,5m s ⁻¹	não
Martins (2015)	Leito fixo	Diversos	Camada fina	30min a 55h	Ø200mm	40, 50, 60, 70, 80	0,4, 1,0 e 1,6 m s ⁻¹	não
Vukić et al. (2015)	Leito fluidizado	Milho	Fluidizado	70 a 180min	Ø120 x 530mm	60, 70, 80	2,25 a 6 m s ⁻¹	não

(conclusão)

Autores	Secador	Produto	Experimento	Tempo	Câmara de secagem	Te (°C)	Ve ou Q	Controle de UR
Beigi, Torki-Harchrgani e Tohidi (2017)	Leito fixo	Arroz	Camada espessa	30 a 370min	Ø140 x 200mm	40, 50, 60, 70, 80	0,5; 0,8 e 1,1 m s ⁻¹	sim
Elgamal, Kishk e Elmasry (2017)	Leito fixo	Arroz	Camada espessa (250mm)	120min	150 x 150 x 300mm	50 e 60	0,1 e 0,2 m s ⁻¹	não
Marciel (2017)	Bandejas	Cacau	Bandejas	18h	Solar: 0,5 x 0,9 x 0,55m Elétrico: 3,4 x 1,1 x 0,9	Solar: média de 60 Elétrico: 60	3 m s ⁻¹	não
Rabha, Muthukumar e Somayaji (2017)	Bandejas	Pimenta	Bandejas	8h	2,6 x 0,85 x 0,37m	Solar com média de 57	1,7 m s ⁻¹	não
Tohidi, Sadeghi e Torki-Harchegani (2017)	Leito fixo	Arroz	Camada espessa	40 a 370min	Ø140 x 200mm	40, 50, 60, 70 e 80	0,5; 0,8 e 1,1 m s ⁻¹	sim
Darvish, Azadbakht e Noralahi (2018)	Leito fluidizado	Cogumelo	Fluidizado	-	Ø210 x 800mm	30, 40, 50	3; 5 e 7 m s ⁻¹	não
Fadhel et al. (2018)	Bandejas	Fosfato	Bandejas	5h e 20min	-	Solar	-	não
Zhao et al. (2018)	Leito fixo	Milho	Camada fina	120min	180 x 180 x 1250mm	70	1.2 m s ⁻¹	não

Fonte: Próprio autor.

3. METODOLOGIA

Este trabalho aborda o projeto, construção e montagem de um secador experimental de leito fixo em camada espessa, elaborado para estudar a cinética de secagem do milho e analisar a eficiência energética e exérgica do processo. Dessa forma, o trabalho foi dividido em quatro etapas principais: projeto, construção e montagem, experimentos de secagem do milho e análise energética e exérgica. O secador desenvolvido foi montado no Laboratório de Secagem do DEMAT localizado no *Campus I* do CEFET-MG, onde todos os experimentos de secagem foram realizados. O milho *in natura* utilizado para realizar a secagem foi disponibilizado pela EMBRAPA e armazenado em um refrigerador a 5°C a fim de conservar sua umidade natural.

Para a realização dos experimentos de secagem foram necessários os seguintes equipamentos: Secador de leito fixo, balança digital, estufa com renovação e circulação de ar, anemômetro de fio quente, termo higrômetro digital, termopares, módulo de aquisição de dados, termômetro de bulbo de mercúrio, banho termostático, transdutor de pressão, wattímetro digital e refrigerador. Sendo a balança digital, a estufa e o wattímetro digital fornecidos pelo Laboratório de Secagem do DEMAT. O secador de leito fixo foi construído com recursos do autor com auxílio de outros pesquisadores, e os demais equipamentos foram disponibilizados pelo Departamento de Engenharia Mecânica do CEFET-MG e são itens existentes nos Laboratórios do Mestrado em Engenharia de Energia do *Campus II* do CEFET-MG.

Os experimentos de secagem foram conduzidos no mês de outubro de 2018. Para cada valor de velocidade de entrada foram medidos durante os ensaios a temperatura, umidade e pressão do ar de entrada, a temperatura do leito de grãos em quatro alturas, a temperatura do ar de saída, e a temperatura e a umidade ambiente. Além desses valores, também foram medidos o consumo energético do secador durante os experimentos e a potência utilizada pelo ventilador juntamente com os outros componentes do sistema, com exceção das resistências, em cada velocidade. Enfim, foram obtidas curvas de secagem e os balanços de energia e exérgia de cada processo.

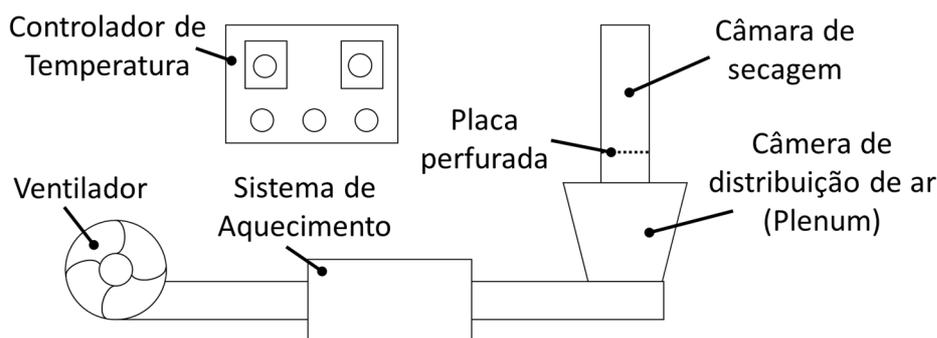
3.1. Projeto do secador experimental.

O projeto do secador experimental foi desenvolvido visando os seguintes requisitos gerais:

- Controle de temperatura de entrada do ar;
- Regulagem de velocidade do ar de entrada;
- Monitoramento das condições de entrada;
- Monitoramento da temperatura do leito de grãos;
- Monitoramento das condições de saída;
- Baixo custo de fabricação;
- Câmara de secagem intercambiável.

O esquema do secador dimensionado (Figura 9) foi idealizado com base nos secadores experimentais utilizados pelos autores presentes no estado da arte (ZARE E CHEN,2009; BORTOLAIA, 2011; BALBY, SAHIN E ULKER, 2013; TORKI-HARCHEGANI *ET AL.*, 2014; MARTINS, 2015; ELGAMAL, KISHK E ELMASRY, 2017; ZHAO *ET AL.*, 2018).

Figura 9 – Esquema básico do secador desenvolvido.



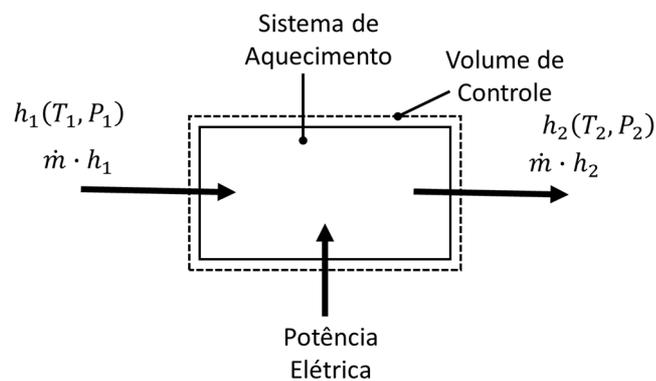
Fonte: Próprio autor.

O projeto do secador foi desenvolvido virtualmente em modelo 3D, de onde foram produzidos os desenhos de vista que foram encaminhados para a fabricação. O dimensionamento geométrico foi realizado visando a facilidade de construção, dessa forma, a dimensão dos dutos foi baseada nos diâmetros padrões de tubos de PVC. Isso visando a utilização de uma curva de 90° comercial como a ligação entre a saída do sistema de aquecimento e o *plenum*.

A fim de possuir um controle estável e o mais confiável possível do fornecimento de energia ao sistema, foi utilizado como fonte de aquecimento um conjunto de resistências elétricas, dimensionadas para fornecer energia suficiente para suportar as condições limites de operação de 80°C, com velocidade do ar de até 4,0m s⁻¹.

A potência elétrica necessária para o aquecimento do ar de secagem, pode ser estimada por meio do balanço de energia no sistema de aquecimento considerando escoamento em regime permanente, perfeitamente isolado, com perdas de carga desprezíveis e variação de energia cinética e potencial desprezíveis, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Balanço de Energia no Sistema de aquecimento.



Fonte: Próprio autor.

Sendo assim, a potência elétrica necessária para o aquecimento do ar de secagem foi calculada pela Equação (1).

$$\dot{W}_{ele} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (1)$$

Onde \dot{W}_{ele} é a potência elétrica em quilowatts (kW), \dot{m} é a vazão mássica de ar em kg_{ar seco} s⁻¹ e h é a entalpia do ar em kJ kg_{ar seco}⁻¹. A vazão mássica de ar foi determinada pela Equação (2).

$$\dot{m} = \frac{\dot{V}}{v_{esp}} \quad (2)$$

No qual \dot{V} é a vazão volumétrica de ar em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ e v_{esp} é o volume específico do ar em $\text{m}^3 \text{kg}_{\text{ar seco}}^{-1}$. Por fim a vazão volumétrica do ar pode ser determinado em função da área da entrada da câmara de secagem e a velocidade máxima do ar de secagem conforme a Equação (3).

$$\dot{V} = V A_{cs} \quad (3)$$

Em que V é a velocidade do ar de secagem em m s^{-1} e A_{cs} é a área da câmara de secagem em m^2 . A câmara de secagem foi construída como um cilindro, com o objetivo de se aproximar da condição unidimensional de secagem. Suas dimensões visaram a economia de material, tanto construtivos quanto de volume de produto a ser secado. Dessa forma, foi utilizada a menor dimensão de leito de secagem encontrado nos secadores semelhantes ao desenvolvido pelo trabalho, assim sendo foi utilizado um valor semelhante ao de Bortolaia (2011), 130mm de diâmetro de câmara de secagem por 200mm de altura de leito que é o mínimo possível para ser considerado camada espessa (SHARON, PRIYA E SUBHASHINI, 2016).

A câmara de distribuição de ar (*plenum*) tem como objetivo possibilitar uma boa distribuição de ar de secagem na entrada do secador. Dalpasquale *et al.* (1991) recomenda um *plenum* de 500mm de altura para um leito de secagem de 700mm, dessa forma essa referência foi utilizada para a determinação do tamanho do *plenum*. Todos os elementos de transição ou expansão foram dimensionados com o ângulo de abertura do elemento de transição em relação ao eixo de simetria do secador entre 15 e 45°, a fim de que a perda de carga fosse desprezível (DALPASQUALE *et al.*, 1991).

O secador foi isolado termicamente na região do *plenum* e da câmara de secagem, tanto para proteção dos usuários quando a garantia da manutenção das condições de contorno do secador. Para a determinação do ventilador foi considerado apenas a resistência da massa de produto a passagem do ar, uma vez que as perdas de pressão impostas pela estrutura do secador, com exceção da chapa perfurada, são desprezíveis quando comparadas a resistência do leito (MARTINS, 2015). Quanto a resistência da chapa perfurada, segundo Silva (2008) para que ela seja desprezível é necessário que ela apresente no mínimo 10% de área livre, dessa forma, esse limite será respeitado no projeto do secador.

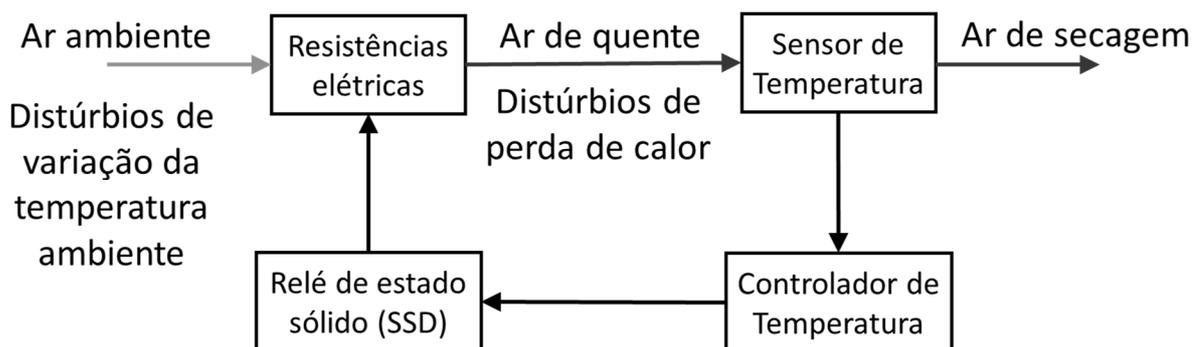
Assim, a resistência a passagem do ar imposta pela massa de grãos, foi determinada pela Equação (4) de Silva (2008), acrescida de um fator de correção para perdas não previstas.

$$\Delta P_g = \frac{a Q^2 L}{\ln(1 + b Q)} FC \quad (4)$$

Onde ΔP_g é a queda de pressão devido a resistência do produto em mmca, Q é o fluxo de ar que passa pelo leito $\text{m}^3 \text{min}^{-1} \text{m}^{-2}$, L é altura do produto em metros, a e b são constantes específicas de cada produto agrícola e FC é o fator de correção devido a perdas não calculadas.

Por fim para o controle do secador foi determinado um controlador de temperatura baseado na lógica proporcional, integral e derivativo (PID), com um rele de estado solido (SSR) para realizar o controle de potência das cargas resistivas e um termopar do tipo J. O termopar do tipo J foi posicionado a 10mm da entrada do secador em uma secção circular, dessa forma, o controlador reage para que a temperatura de entrada do secador seja controlada independente das perdas anteriores a entrada do secador. O esquema básico do controle de temperatura pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 – Esquema do controle de temperatura.



Fonte: Adaptado de Martins, 2015.

O controlador de temperatura efetua constantemente a leitura do sensor de temperatura posicionado próximo da câmara de secagem. Assim de acordo com sua leitura ele enviará sinais ao relé de estado sólido que reagirá ativando ou desativando o circuito de potência das resistências elétricas. Dessa forma, mesmo que o ar quente

perca energia no caminho até a entrada da câmara de secagem, como a leitura do termopar é realizado na entrada essa perda é compensada pelo sistema, mantendo a temperatura próxima da esperada. Quanto ao sistema PID seu algoritmo tenta compensar a inércia térmica das resistências, que ao serem ativadas elevam suas temperaturas a um nível que a convecção do ar demora um tempo até absorver todo o calor gerado, para isso o PID utiliza parâmetros para simular a inércia do sistema e agir de forma antecipada. Por outro lado, um controle do tipo termostático acaba gerando oscilações mais elevadas de temperatura, uma vez que o comando só reage após a leitura do termopar.

As etapas do projeto do secador, a partir das informações destacadas foram:

- Cálculo da potência térmica das resistências;
- Cálculo da perda de pressão da coluna de grãos;
- Modelagem geométrica tridimensional do secador;
- Elaboração da documentação para fabricação;
- Planejamento do circuito elétrico de controle e operação do secador.

3.2. Construção e montagem do secador

Durante o projeto do secador foi definido que a fabricação das peças do sistema de aquecimento, *plenum* e a câmara de secagem seria por caldeiraria utilizando chapas de aço galvanizado, que foi considerado mais adequado tanto pela facilidade de conformação das chapas, pelo custo da matéria prima e do serviço, pela resistência térmica e mecânica, o tamanho das peças e facilidade de vedação. O sistema de aquecimento precisa ser metálico principalmente pela temperatura que as resistências atingem quando aquecidas. Por outro lado, o *plenum* e a câmara de secagem necessitam uma boa vedação e resistência para dar sustentação ao leito de grãos.

O tamanho do duto base do secador foi definido, conforme mencionado anteriormente, com base nos padrões de tubo de PVC a fim de utilizar uma curva de 90° comercial como a ligação entre a saída do sistema de aquecimento e o *plenum*. Essa decisão foi tomada a fim de reduzir o custo das dobras metálicas visto que a fabricação de uma curva desse tipo ficaria de 5 a 10 vezes maior do que a curva

comercial de PVC encontrada nas lojas de material de construção. Assim, essa decisão otimiza o custo e a facilidade de fabricação, mas por outro lado essa decisão limita a temperatura de utilização do secador a 80°C que é a temperatura média de amolecimento do PVC com carga de 5kg, segundo Braskem (2002).

Por fim, o processo de fabricação determinado para a peça de conexão do secador ao ventilador foi a impressão 3D do tipo FDM, tanto pela precisão quanto pela facilidade de execução. Entretanto essa escolha só foi possível devido as dimensões reduzidas da peça, uma vez que a impressora 3D utilizada possui um volume máximo de 200 x 300 x 200 mm. A matéria prima escolhida para o processo foi o plástico ABS que possui temperatura de amolecimento de 100°C.

3.3. Experimentos de secagem do milho

O objetivo dos experimentos a serem conduzidos é demonstrar a utilidade do secador desenvolvido e determinar a dinâmica de secagem de uma camada espessa de grãos com 200mm, nas temperaturas de 40, 50 e 60°C com velocidade do ar de entrada de 0,8 e 1,3m s⁻¹ que é a velocidade máxima e mínima atingida pelo ventilador utilizado no secador para essa altura do leito de grãos. O experimento foi conduzido durante 120 minutos que foi o tempo mais comum dentre os trabalhos estudados no estado da arte. Quanto à altura do leito igual a 200mm foi escolhida por ser a mínima necessária para ser considerado camada espessa segundo Sharon, Priya e Subhashini (2016). Por outro lado, as temperaturas foram definidas com base nas temperaturas máximas para consumo humano, que é de 55°C, e a temperatura máxima para sementes, que é de 44°C, dessa forma foi definido as temperaturas de 40 a 60°C (EMBRAPA, 2015).

Os experimentos foram realizados sem controle da umidade, entretanto só foram realizados em dias de céu aberto com a umidade ambiente entre 40 e 70%, a fim de garantir um grau satisfatório de comparação entre os experimentos, sem que a interferência da umidade gere problemas na interpretação dos dados, em Beigi, Toriki-Harchegani e Tohidi (2017) a variação nesse *range* de umidade foi o parâmetro de

secagem menos influente dentre os estudados pelos autores, gerando diferenças menores que 10% na eficiência de secagem.

O plantio do milho foi realizado nos campos experimentais da EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo, localizada em Sete Lagoas – MG. As amostras utilizadas no experimento foram colhidas no dia 25 de setembro de 2018, em uma área de plantio com quatro cultivares plantados na mesma época. Dessa forma, as amostras foram uma mistura dos cultivares Impacto convencional, DKB 390 convencional, Impacto Viptera e DKB 390 VT PRO, sendo esses dois últimos cultivares citados transgênicos. No total foram colhidos 90kg de milho que foram transportados até o CEFET-MG logo após a colheita. No CEFET o milho foi armazenado em 15 embalagens plásticas impermeáveis com aproximadamente 6kg de milho cada, assim as embalagens com o produto foram mantidas em ambiente refrigerado a 5°C, a fim de conservar sua umidade.

Para a realização dos experimentos de secagem é necessário determinar o teor de umidade inicial dos grãos de milho a serem secos. Assim, um dia antes de cada experimento a embalagem de 6kg a ser utilizado foi separada dos grãos refrigerados, para que o produto ficasse 24h até atingir um equilíbrio de temperatura com o ambiente. Então duas amostras de 200 gramas cada, foram separadas para serem colocadas durante 24 horas em uma estufa de secagem a 105°C, conforme sugerido por Brasil (2009), que permite quantificar a perda de água dos grãos através da vaporização por aquecimento da água presente nas amostras, sob condições controladas. Assim, o tempo de teste, definido pela norma, permite que toda a umidade presente nos grãos se evapore até que não aja mais variação de massa nos mesmos. O procedimento de realização desse processo encontra-se no APÊNDICE D.

As massas iniciais e finais de cada amostra são pesadas em uma balança digital e o teor de umidade médio para os grãos pode ser determinado pela Equação (5) e Equação (6), para base seca e base úmida respectivamente.

$$M_{0,bs} = \frac{m_{g,u} - m_{g,se}}{m_{g,se}} \quad (5)$$

$$M_{0,bu} = \frac{m_{g,u} - m_{g,se}}{m_{g,u}} \quad (6)$$

Sendo M_{obs} o teor de umidade inicial dos grãos em base seca e M_{obu} em base úmida, m_{gu} a massa inicial dos grãos úmidos em gramas e m_{gse} a massa final dos grãos secos após o teste em estufa também em gramas. Com o restante do produto da embalagem separada para o experimento já em equilíbrio com o ambiente os grãos são posicionados uniformemente dentro da câmara de secagem até a altura de 200mm, caso ainda haja sobra de produto após o carregamento do secador, o restante é novamente selado na embalagem plástica e recolocado no ambiente refrigerado a 5°C, cada embalagem de produto rendeu duas secagens e dois testes de umidade inicial totalizando 3 embalagens de produto para todos os experimentos. Os testes de umidade inicial sempre foram realizados em conjunto com o experimento de secagem correspondente a fim de garantir a confiabilidade da umidade inicial dos grãos em cada experimento.

Assim, com o produto já na câmara de secagem, o leito é posicionado no secador e a vazão do ventilador é regulada em seu diafragma através da leitura de um anemômetro de fio quente posicionado logo após a saída do *plenum*, em uma seção circular de 130mm. Após a regulagem do ventilador o leito de grãos é retirado e o controlador de temperatura atua para elevar a temperatura do ar de entrada até a temperatura de secagem. Assim, que a temperatura de secagem atinge o regime permanente, o leito de grãos é reposicionado e o experimento começa.

A fim de monitorar o processo, foram instalados nove termopares em diferentes pontos do secador, sendo sete do tipo J, um tipo K e um do tipo T. Um dos termopares utilizados foi conectado ao controlador, outro a um termômetro digital e os demais ao módulo de aquisição de dados. Na entrada do secador também foi medido a pressão estática através de um transdutor de pressão. As medidas de umidade relativa do ar foram tomadas na entrada do ventilador através de um termo higrômetro, assim juntamente com as medidas de temperatura ambiente foi definida a umidade absoluta do ar ambiente e conseqüentemente a umidade absoluta do ar de entrada, considerando que não há ganho de umidade absoluta na zona de aquecimento do ar e nos dutos do secador. O posicionamento dos sensores no secador está apresentado no esquema da Figura 12.

2. Posicionamento do wattímetro para a medição do consumo do secador;
3. Pesagem do leito de grãos vazio;
4. Ajuste da velocidade do secador com o termo anemômetro de fio quente;
5. Regulagem da temperatura do ar de secagem;
6. Pesagem do leito de grãos cheio;
7. Instalação dos termopares no leito de grãos;
8. Leitura do wattímetro no início do experimento
9. Realização do experimento tomando medições de temperatura, pressão e umidade do ar de entrada, temperatura e umidade na saída e temperatura ao longo do leito de grãos. A cada 10 minutos o módulo de aquisição de dados realizará dez medidas de 5 em 5 segundos, totalizando 50 segundos de medição.
10. Retirada dos termopares do leito e medição da massa do leito na balança digital, para definir o teor de umidade perdida pelos grãos. Esse procedimento de retirada, medida e reposicionamento do leito foi realizado com um tempo médio de 22 segundos, a fim de influenciar o mínimo possível no processo de secagem.
11. Medições de 10 em 10 minutos até o tempo de 120 minutos de secagem.
12. Leitura do wattímetro no final do experimento.
13. Recolhimento de amostras de três alturas diferentes da câmara de secagem do secador para realização do teste de estufa.

Quanto a medição da temperatura do termopar ligado a resistência elétrica, foi utilizado o maior valor de temperatura observado pelo termômetro digital durante o experimento, ou seja, após a estabilização da temperatura de entrada, uma vez que durante o aquecimento inicial a resistência atinge temperaturas mais altas devido a distância da temperatura medida ao valor de *setpoint* definido no controlador.

Assim, o procedimento definido permite a obtenção da dinâmica de secagem do milho para os valores definidos de velocidade e temperatura para o ar de entrada, o que será avaliado através da variação de massa no leito de grãos e o tempo de secagem. O percentual do teor de umidade inicial dos grãos é determinado no teste em estufa, assim toda variação de massa que ocorrer durante a secagem corresponde a perda de umidade dos grãos. Dessa forma, sabendo o teor de umidade inicial é possível encontrar o teor de umidade médio do leito de grãos a cada medição. As

amostras recolhidas ao final do experimento foram retiradas da superfície do leito, da região próxima e abaixo da altura do termopar 4 e próximo e abaixo da altura do termopar 2, a fim de medir o gradiente de umidade no leito de grãos.

O teor de umidade instantânea dos grãos em base úmida ($M_{i,bu}$) pode ser determinada pela Equação (7), através da massa de milho no início do experimento (m_{g0}), a massa de milho no instante medido ($m_{g,i}$) e o teor de umidade inicial dos grãos em base úmida ($M_{0,bu}$) encontrada pelo teste de estufa (TOHIDI *et al.*, 2017).

$$M_{i,bu} = \left(\frac{m_{g,0}(M_{0,bu} - 1) + m_{g,i}}{m_{g,i}} \right) \quad (7)$$

O teor de umidade instantânea dos grãos em base seca pode ser encontrado através da Equação (8) (MACIEL, 2017).

$$M_{i,bs} = \frac{M_{i,bu}}{1 - M_{i,bs}} \quad (8)$$

Outra forma de expressar o conteúdo de umidade dos grãos é por meio da razão de umidade, RM , apresentada na Equação (9).

$$RM = \frac{M_{i,bs} - M_{eq,bs}}{M_{0,bs} - M_{eq,bs}} \quad (9)$$

Onde $M_{i,bs}$ é o teor de umidade instantânea dos grãos na base seca, $M_{0,bs}$ é o teor de umidade inicial dos grãos em base seca e $M_{eq,bs}$ é o teor de umidade de equilíbrio dos grãos em base seca que pode ser calculado pela equação de Henderson apresentada na Equação (10) (LIU *et al.*, 2015).

$$M_{eq,bs} = \left[\frac{-\ln(1 - UR_e)}{A(T_e + B)} \right]^{1/n} \quad (10)$$

Em que UR_e é a umidade relativa do ar na entrada do secador, T_e é a temperatura de entrada do ar de secagem e A , B e n são constantes do produto a ser seco, que para o milho equivalem respectivamente a $8,654 \times 10^{-5}$, 49,81 e 1,8634. O teor de umidade de equilíbrio é o teor de umidade na qual o produto entra em equilíbrio com o ar, dessa forma, a razão de umidade é um valor relativo a proximidade do teor de umidade atual do produto, ao teor de umidade máximo possível de ser atingida pelo mesmo, dada as condições do ar do seu entorno. Assim sendo, como a razão de umidade tem como denominador a diferença entre o teor de umidade inicial do produto e o teor de umidade de equilíbrio, o valor da razão de umidade será sempre igual a 1 no início da secagem e diminuindo à medida que o processo acontece.

A taxa de secagem também é calculada através do experimento, utilizando as umidades instantâneas calculadas em um tempo t e em um tempo $t+\Delta t$. Assim, a taxa de secagem pode ser calculada pela Equação (11) (FADHEL *et al.*, 2018).

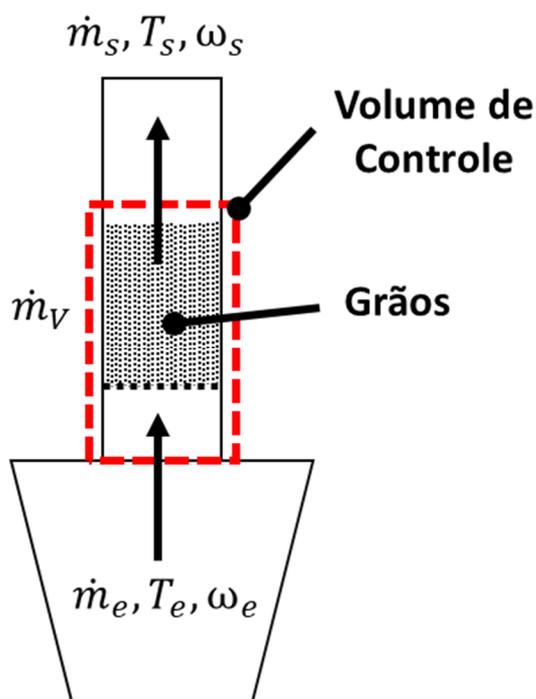
$$DR = \frac{dM}{dt} = \frac{M_t - M_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (11)$$

Onde Δt é o intervalo de tempo entre as medições, M_t é o teor de umidade do milho no instante t e $M_{t+\Delta t}$ é o teor de umidade do milho após o intervalo entre as medições. Além disso, foi possível realizar os balanços energéticos e exergéticos com base nas medições de velocidade, temperatura e consumo do secador.

3.4. Análise energética e exergética

Antes de iniciar as análises energéticas e exergéticas é preciso definir as vazões mássicas em cada seção do secador, para isso é necessário realizar o balanço de massa no volume de controle. No caso específico estudado, o volume de controle (VC), apresentado na Figura 13, é o interior do secador onde o escoamento do ar pode ser considerado em regime permanente, uma vez que a massa de ar seco que entra no secador não pode ser criada ou desaparecer espontaneamente dentro do sistema.

Figura 13 – Volume de controle.



Fonte: Próprio autor.

Assim, como não há variação de massa no volume de controle todo o ar que entra tem que sair, conforme pode ser representado matematicamente nas Equações (12), (13) e (14).

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s \quad (12)$$

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = 0 \quad (13)$$

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s \quad (14)$$

Onde dm_{VC}/dt é a taxa de variação de massa no interior do secador, \dot{m}_e é a vazão mássica de entrada e \dot{m}_s é a vazão de saída. Como ambas as vazões mássicas são iguais foi considerado apenas uma massa, chamada de vazão mássica do ar seco representada por \dot{m}_a como apresentado na Equação (15).

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s = \dot{m}_a \quad (15)$$

Como durante a secagem ocorre entrada de massa no ar devido a retirada de umidade do grão, é necessário aplicar a conservação de massa no ar seco e no vapor d'água presente no ar, para que assim seja possível calcular a vazão de vapor, \dot{m}_V , em termos da umidade absoluta na entrada, ω_e , e na saída do secador, ω_s , como pode ser visto na Equação (16) (MORAN E SHAPIRO, 2008).

$$\dot{m}_V = \dot{m}_a(\omega_s - \omega_e) \quad (16)$$

A vazão de vapor também pode ser calculada em termos da variação da umidade dos grãos dentro de um período de tempo 1-2 conforme a Equação (17). Uma vez que, toda a entrada de vapor d'água advém da retirada de umidade dos grãos, assim a variação de massa dos grãos dividido pelo tempo é igual a vazão de vapor de água.

$$\dot{m}_V = \frac{(m_{g1} - m_{g2})}{t_{1-2}} \quad (17)$$

Onde m_{g1} e m_{g2} são as massas dos grãos no instante 1 e 2 respectivamente. Assim, durante o experimento essas medições podem ser realizadas por meio da pesagem do leito em intervalos de tempo definidos.

Definido as vazões mássicas, é possível a partir da primeira lei da Termodinâmica iniciar o desenvolvimento da análise de energia através da equação do balanço de energia no volume de controle apresentada na Equação (18).

$$\frac{dE_{VC}}{dt} = \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) - \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gZ_s \right) \quad (18)$$

Onde dE_{VC}/dt representa a variação da taxa de energia no volume de controle, \dot{Q}_{VC} representa a taxa de calor transferida pela fronteira do volume de controle, \dot{m}_e e \dot{m}_s são respectivamente a vazão mássica do ar seco na entrada e na

saída, h_e e h_s representam a entalpia específicas da entrada e da saída respectivamente, $V_e^2/2$ e $V_s^2/2$ representam respectivamente a energia cinética específica de entrada e saída respectivamente e enfim gZ_e e gZ_s representam a energia potencial específica de entrada e saída respectivamente.

Considerando o balanço de energia no volume de controle câmara de secagem, pode-se assumir regime permanente no VC, o que implica que a variação temporal de taxa de energia é igual a zero. Quanto a variação da energia potencial e cinética entre a entrada e a saída, ambas são desprezíveis devido as dimensões do secador e a baixa velocidade do ar no processo. Além disso, não há trabalho realizado no volume de controle e as perdas de calor pela fronteira do secador podem ser consideradas desprezíveis devido ao isolamento térmico, portanto tanto o termo \dot{W}_{VC} , quanto o \dot{Q}_{VC} são iguais a zero. Assim, o balanço de energia no secador pode ser reescrito conforme a Equação (19).

$$0 = \sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_s h_s \quad (19)$$

Assim, resolvendo os somatórios, tem-se que a variação de energia do ar é toda utilizada para a remoção de umidade do produto conforme apresentado na Equação (20), onde h_{lv} representa a entalpia de vaporização do vapor d'água.

$$\dot{m}_v h_{lv} = \dot{m}_a h_e - \dot{m}_a h_s \quad (20)$$

Ranjbaran e Zare (2013) definem a eficiência energética do processo de secagem η_e através da Equação (21).

$$\eta_e = \frac{\text{energia demandada para evaporar a umidade contida nos grãos}}{\text{energia que entra no sistema pelo ar de secagem}} \quad (21)$$

Tolentino (2018) frisou que a Equação (21) de eficiência energética foca apenas na secagem da umidade contida nos grãos, e não leva em consideração o gasto de energia para aumento da temperatura da água evaporada e dos grãos. A energia total que entra no sistema pelo ar de secagem (E_T) é resultado da soma da energia das

resistências elétricas de aquecimento, a energia do ventilador e a energia necessária para o funcionamento do circuito de controle do secador, grandezas que foram determinadas por meio de um wattímetro. Quanto a energia demandada para evaporar a umidade contida nos grãos (E_V), é possível de ser calculada pelo produto entre a entalpia de vaporização da água (h_{lv}) e a massa de água evaporada (m_{eva}), conforme na Equação (22) (MACIEL, 2017).

$$E_V = h_{lv} m_{eva} \quad (22)$$

Sendo que a massa de água evaporada (m_{eva}), foi obtida através da variação de massa do leito de grãos após dez minutos de secagem. Quanto a entalpia de vaporização da água, h_{lv} , para o leito de grãos de milho pode ser calculado, segundo França *et al.* (1994) e Souza (1996), pela Equação (23).

$$h_{lv} = (3153518,6 - 2386,05 \bar{T}_{i,l})(1 + 4,35e^{-28,25\bar{M}_{i,l,bs}}) \quad (23)$$

Onde $\bar{T}_{i,l}$ representa a temperatura média instantânea do leito de grãos e $\bar{M}_{i,l,bs}$ representa a umidade média instantânea do leito de grãos. Dessa forma, a eficiência de secagem do secador (η_e) é determinada pela Equação (24)

$$\eta_e = \frac{E_V}{E_T} \quad (24)$$

A análise exérgica utiliza a conservação da massa, a conservação da energia e a segunda lei da Termodinâmica a fim de avaliar quantitativamente e qualitativamente as transformações ocorridas no processo. Assim, a exergia, mais que uma propriedade Termodinâmica é uma propriedade do sistema e do ambiente ao entorno do equipamento (MACIEL, 2017). Pois, o processo é sempre avaliado com relação a um estado de referência, onde o sistema estudado estaria em equilíbrio termodinâmico com o ambiente, esse estado é também conhecido como estado morto e pode ser representado com o subscrito "00" (TOLENTINO, 2018).

Fortes *et al.* (2009) define a eficiência exergética do secador (η_{ex}) como a razão entre a exergia usada para secagem do produto, representada por E_{xV} , pela exergia de entrada no sistema $E_{x fornecida}$, como demonstrado na Equação (25).

$$\eta_{ex} = \frac{E_{xV}}{E_{x fornecida}} \quad (25)$$

Dessa forma, o termo de exergia de entrada do secador, pode ser dado pela Equação.(26), que é a quantidade de exergia fornecida ao sistema dada pela soma da exergia utilizada pelo ventilador mais a exergia fornecida pelas resistências para o aquecimento do ar.

$$E_{x fornecida} = W_{vent} + \left(1 - \frac{T_{00}}{T_{resist}}\right) Q_{resist} \quad (26)$$

Onde W_{vent} é a energia consumida pelo ventilador medida pelo wattímetro, T_{00} é a temperatura no estado morto, T_{resist} é a temperatura na superfície das resistências, que foi medida por um termopar, e Q_{resist} é o calor trocado pela resistência elétrica que foi considerada como a energia consumida pelas resistências medida pelo wattímetro. Quanto a exergia usada para secagem do produto, ela pode ser calculada como uma troca de calor entre o ar e o grão conforme a Equação (27). Onde E_V é a energia de vaporização da umidade dos grãos, Δt é o intervalo de tempo em que essa energia foi consumida e \bar{T}_l é a temperatura média leito de grãos.

$$E_{xV} = E_V \left(1 - \frac{T_{00}}{\bar{T}_l}\right) \quad (27)$$

Por fim, também foi avaliada a destruição de exergia dada pela Equação (28).

$$E_{x destruída} = (1 - \eta_{ex})E_{x fornecida} \quad (28)$$

O valor de estado morto da pressão utilizada na análise, teve como base o valor utilizado por Maciel (2017) onde a pressão P_{00} é de $92kPa$ que é a pressão atmosférica

média da cidade de Belo Horizonte - MG. Quanto aos valores de temperatura e umidade absoluta para o estado morto, foram utilizados os valores instantâneos do ambiente medidos durante o próprio experimento. Ambas as análises energéticas e exergéticas do sistema e as propriedades necessárias para os cálculos foram realizadas no EES (*Engineering Equation Solver*) e estão apresentados no APÊNDICE I.

3.5. Instrumentos de medição e equipamentos

A realização dos experimentos de secagem envolveu diversos equipamentos e instrumentos de medição, dessa forma, nesse item os equipamentos utilizados são apresentados. A balança digital utilizada para a avaliação da massa das amostras e do peso do leito de grãos é a balança Toledo modelo 9094/4 com incerteza de 1 grama, todas as pesagens foram realizadas em superfície plana e devidamente nivelada (Figura 14).

Figura 14 – Balança digital Toledo modelo 9094/4.



Fonte: Próprio autor.

A estufa de secagem utilizada para os testes de teor de umidade inicial foi a estufa da marca nova técnica com volume interno de 40 litros, renovação de ar e ajuste de temperatura por termostato (Figura 15).

Figura 15 – Estufa de secagem nova técnica.



Fonte: Próprio autor.

A medição da velocidade do ar foi realizada com um termo anemômetro de fio quente da marca testo modelo 405i. com certificado de calibração apresentado no ANEXO A. O instrumento é capaz de medir velocidade, temperatura e vazão volumétrica, tendo uma faixa de medição de temperatura de -20°C a 60°C com resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$, a faixa de medição de velocidade vai de 0 a 30 m s^{-1} com resolução de $0,01\text{ m s}^{-1}$.

Figura 16 – Termo anemômetro de fio quente da testo modelo 405i.

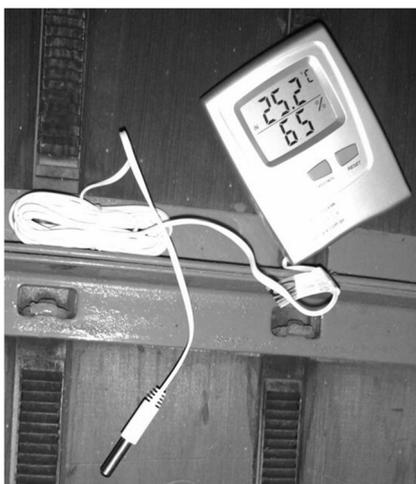


Fonte: Próprio autor.

Para a medição da umidade do ar foi utilizado um termo higrômetro digital Incoterm da marca Maxi Track, com faixa de medição de umidade de 15 a 95% de

umidade relativa e resolução de 1%. A faixa de medição de temperatura interna e externa de 0°C a 50°C e -50°C a 70°C respectivamente com resolução de 0,1°C. O certificado de calibração do termo higrômetro digital Incoterm pode ser encontrado no ANEXO A.

Figura 17 – Umidade de termo higrômetro digital.



Fonte: Próprio.

A medição de temperatura foi realizada com seis termopares tipo J de haste de inox de 100 milímetros, Figura 18, e um tipo T. Os termopares foram ligados a um módulo de aquisição de dados para a realização das medições. A calibração dos termopares foi realizada com termômetro de bulbo e banho termostático (APÊNDICE C). O procedimento utilizado para calibração encontra-se no APÊNDICE B.

Figura 18 – Termopar tipo J de haste de inox 100mm.



Fonte: Próprio autor.

A medição da temperatura da resistência elétrica foi realizada por um termômetro digital portátil TMC-902C conectado a um termopar do tipo K, com

resolução de 0,1°C até 199,99°C e de 1°C de 200°C até 1370°C. A precisão do equipamento é 2°C até 500°C (Figura 19).

Figura 19 – Termômetro digital TMC-902C.



Fonte: Próprio autor.

A medição de pressão foi realizada com transdutor de pressão Huba Control 694 com faixa de 0 a 3mbar (Figura 20). O certificado de calibração do transdutor utilizado está no ANEXO A.

Figura 20 – Transdutor de pressão Huba Control 694.



Fonte: Próprio autor.

O módulo de aquisição de dados Agilent 34980A (Figura 21) foi utilizado para realizar as medições dos termopares e do transdutor de pressão durante os experimentos de secagem. O tutorial de como operar o equipamento pode ser encontrado no APÊNDICE A.

Figura 21 – Módulo de aquisição de dados Agilent 34980A.



Fonte: Próprio autor.

A calibração dos termopares foi realizada com a ajuda de um banho termostático modelo C35 da fabricante HAAKE (Figura 22).

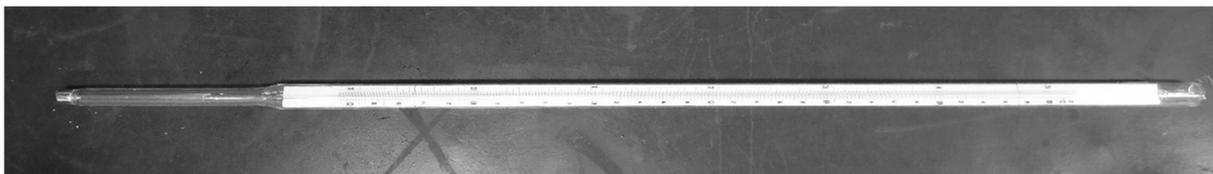
Figura 22 – Banho termostático.



Fonte: Próprio autor.

O padrão utilizado para a calibração dos termopares foi um termômetro de bulbo de mercúrio de faixa de -10°C a 52°C (Figura 23), cujo certificado de calibração de 2017 pode ser encontrado no ANEXO A.

Figura 23 – Termômetro de bulbo de mercúrio.



Fonte: Próprio autor.

O wattímetro utilizado, encontrado na Figura 24, foi utilizado para medir a energia elétrica gasta pelo secador durante a secagem foi o wattímetro da marca BENETECH, modelo GM86 com resolução de medição de $0,01\text{kWh}$ e incerteza de medição de 1% do valor lido.

Figura 24 - Wattímetro digital.



Fonte: Maciel, 2017.

A secagem de grãos foi realizada no secador desenvolvido neste trabalho (Figura 25). O secador possui capacidade de regulagem de vazão e temperatura do ar de entrada. A câmara de secagem utilizada possui 400mm de onde apenas 200mm serão preenchidos com milho úmido.

Figura 25 – Secador de grãos desenvolvido no trabalho.



Fonte: Próprio.

3.6. Análise de incertezas

As incertezas consideradas em cada instrumento podem ser encontradas em seus certificados de calibração, quanto aos termopares sua calibração foi realizada no Laboratório do Mestrado de Engenharia de Energia do campus II do CEFET-MG. Para os demais instrumentos foi utilizado o erro máximo do manual dos equipamentos. Assim, nos certificados de calibração foram identificadas todas as fontes de incertezas do processo de medição e as respectivas correções, para que assim seja possível determinar o resultado de medição (RdM) com base na Equação (29) (ALBERTAZZI e SOUZA, 2008).

$$RdM = \overline{M}_l + C_C \pm U_{95\%} \quad (29)$$

Onde \overline{M}_i é a média das medições, C_c é a correção de todas as fontes de incertezas e $U_{95\%}$ é a incerteza expandida com probabilidade de 95%. É importante salientar que apesar da correção ser uma soma na equação, o seu valor pode ser tanto negativo quanto positivo dependendo do equipamento e do ponto de medição. A incerteza com enquadramento de 95% pode ser calculada pela Equação (30) (ALBERTAZZI e SOUZA, 2008).

$$U_{95\%} = k_{95\%}u_c \quad (30)$$

Em que u_c é a incerteza combinada e $k_{95\%}$ é o coeficiente de Student. Para determinar a incerteza combinada de uma medição direta (u_c), com probabilidade de enquadramento de 95% é preciso utilizar o conjunto de incertezas da medição definidos como u_1, u_2 até u_p . Assim a incerteza combinada pode ser calculada de acordo com a Equação (31) (ALBERTAZZI e SOUZA, 2008).

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_p^2} \quad (31)$$

As medições diretas são todas que são aferidas diretamente com os instrumentos, como a temperatura, a pressão, a umidade relativa, a velocidade, a potência elétrica, as massas e o diâmetro do duto de ar. Para determinar o coeficiente de Student é preciso conhecer a incerteza combinada e o grau de liberdade efetivo da medição (v_{ef}). que pode ser calculado a partir da equação de Welch-Satterthwaite (Equação (32)) (ALBERTAZZI e SOUZA, 2008).

$$\frac{u_c^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{u_p^4}{v_p} \quad (32)$$

Quando é necessário encontrar a incerteza combinada de uma medição indireta, ou seja, quando grandezas estatisticamente independentes se relacionam através de uma expressão matemática, do tipo encontrado na Equação (33).

$$G = f(x_1, x_2, \dots, x_p) \quad (33)$$

A incerteza combinada da grandeza G pode ser estimada pela Equação (34).

$$u_c(G) = \sum_{i=0}^p \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} u(x_i) \right)^2 \quad (34)$$

Onde $u_c(G)$ representa a incerteza combinada da grandeza G , $u(x_i)$ é a incerteza padrão associada as grandezas independentes. Todas as grandezas apresentadas nas análises energética, exergética e os cálculos do experimento de secagem que não foram mensuradas diretamente via instrumentos de medição se enquadram como medidas indiretas. Os cálculos de incerteza foram realizados no software EES através de sua rotina de cálculo de incerteza. Os programas utilizados desenvolvidos no EES estão apresentados no APÊNDICE I.

Como as incertezas de cada uma das grandezas depende do processo de medição, as incertezas máximas de cada uma das grandezas analisadas neste trabalho foram apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Grandezas e incertezas máximas observadas no experimento.

Símbolo	Grandeza	Incerteza Máxima	Unidade	Tipo de Medição
E	Energia	18	kJ	Direta
η_e	Eficiência energética	1	%	Indireta
η_{ex}	Eficiência exergética	0,05	%	Indireta
m	Massa	0,001	kg	Direta
P	Pressão	0,02	kPa	Direta
W	Potência	1	W	Direta
RM	Razão de umidade	0,01	-	Indireta
M	Teor de umidade	0,1	%	Indireta
DR	Taxa de umidade	0,1	%/h	Indireta
T	Temperatura	0,7	°C	Direta
UR	Umidade relativa	4	%	Direta
V	Velocidade	0,2	m/s	Direta

Fonte: Própria.

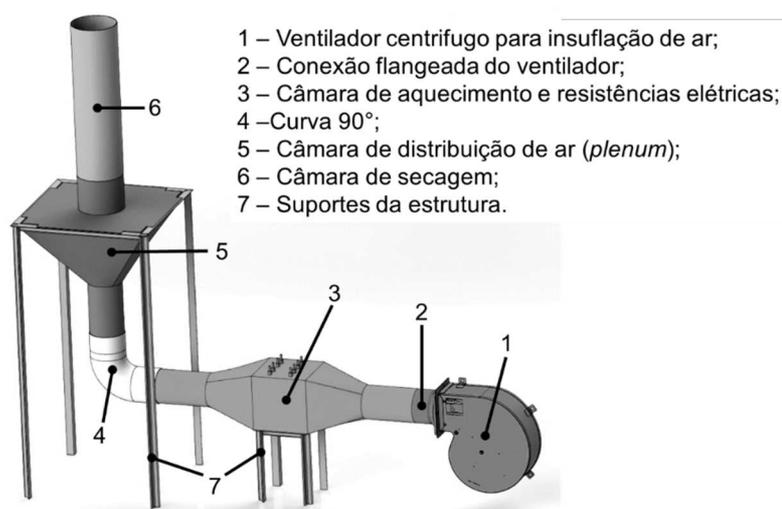
4. RESULTADOS

Os resultados deste trabalho seguiram a sequência definida pela metodologia. Assim, estão apresentados o projeto e a construção do secador iniciando pela determinação das resistências elétricas, o dimensionamento geométrico do secador e da câmara de secagem, a seleção do ventilador, a elaboração do circuito elétrico de comando e a sua construção, com todos os detalhes e escolhas de posição de sensores e soluções de medição. Em seguida estão apresentados os detalhes dos experimentos realizados e as curvas de secagem obtidas para diferentes valores de velocidade e temperatura do ar de entrada, além das investigações quanto a variação de temperatura no leito de grãos e o gradiente final de umidade para três regiões do leito. Por fim, estão apresentadas as análises energéticas e exergética dos ensaios e suas respectivas observações quanto ao gasto energético e a qualidade da energia do processo de secagem.

4.1. Projeto e Construção

A Figura 26 apresenta a representação tridimensional do secador experimental desenvolvido.

Figura 26 – Representação tridimensional do secador desenvolvido.



Fonte: Próprio autor.

A potência elétrica necessária para o aquecimento depende das condições iniciais e finais desejadas para o ar de secagem (Equação (1)), uma vez que essa potência depende da variação de entalpia entre esses estados. O estado final do ar limite de operação do secador desenvolvido foi definido na metodologia como 80°C e 4,0m s⁻¹. Quanto ao estado inicial do ar ambiente, o mesmo, foi definido como 18°C com umidade relativa de 61%, que são respectivamente a temperatura média mínima anual e a umidade relativa média anual de Belo Horizonte dos anos de 2007 a 2017 (INMET, 2019).

As propriedades psicrométricas do ar de entrada e do ar de saída envolvidos no cálculo da potência elétrica de aquecimento estão apresentadas na Tabela 4, e foram calculadas no programa computacional Grapsi 5.1, considerando a altitude de Belo Horizonte igual a 915 metros conforme os dados do INMET, e utilizando a opção de processo de aquecimento ou resfriamento presente no programa.

Tabela 4 – Propriedades psicrométricas do ar ambiente e do ar de secagem, para a cidade de Belo Horizonte/MG, considerando altitude local de 852m.

Símbolo	Propriedade	Unidade	Ar ambiente	Ar de secagem
T	Temperatura	(°C)	20	80
UR	Umidade relativa	(%)	67	2,92
h	Entalpia específica	(kJ kg _{ar seco} ⁻¹)	47,70	109,22
v_{esp}	Volume específico	(m ³ kg _{ar seco} ⁻¹)	0,939	1,131

Fonte: Melo e Lopes, 2003.

Portanto, a variação de entalpia para o processo de aquecimento do ar ambiente até a condição desejada para o ar de secagem é de 61,52kJ kg_{ar seco}⁻¹. Para prosseguir no cálculo da potência elétrica é preciso calcular a vazão mássica do ar de secagem conforme as Equações (2) e (3). Na metodologia foi definido que o diâmetro da câmara de secagem seria de 130mm, baseado nas dimensões da câmara de secagem utilizada por Bortolaia (2011). Assim, com o diâmetro de 130mm encontra-se a área da câmara de secagem, que pode ser utilizada na Equação (3) para a velocidade limite de 4m s⁻¹, a fim de encontrar a vazão volumétrica. Com o valor de volume específico calculado pelo Grapsi 5.1 encontra-se o valor de vazão mássica. Por fim, através da Equação (1) a potência necessária para proporcionar o

aquecimento do ar na condição calculada é calculada. O processo descrito acima, com os valores numéricos, está apresentado de forma resumida na Tabela 5.

Tabela 5 – Detalhamento do cálculo da potência elétrica necessária para o processo de aquecimento do ar de secagem.

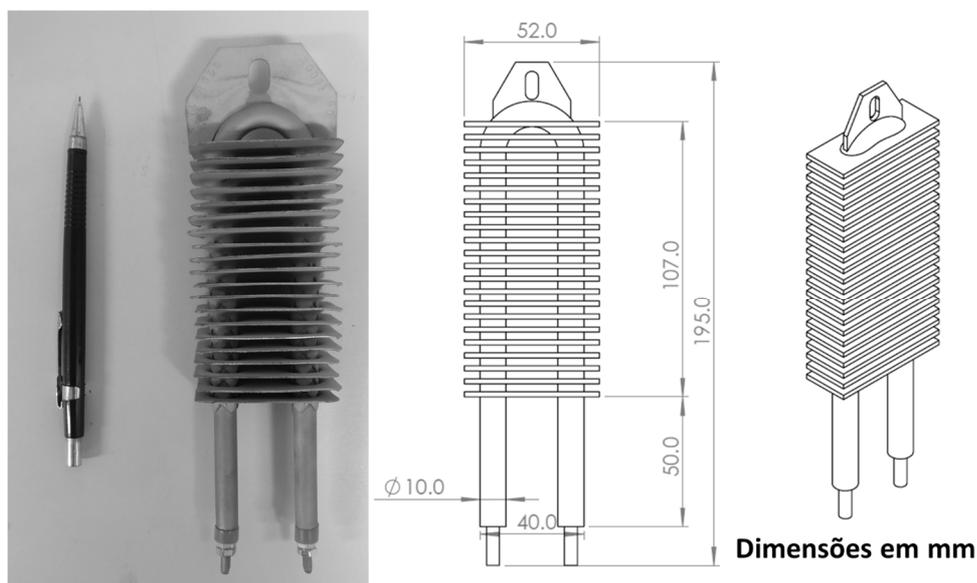
Símbolo	Propriedade	Valor	Origem do valor
$h_2 - h_1$	Variação de entalpia para o processo de aquecimento	61,52kJ kg _{ar seco} ⁻¹	Diferença entre as entalpias específicas da Tabela 4
A_{cs}	Área da câmara de secagem	0,01327m ²	Área de um círculo de 130mm de diâmetro
V	Velocidade do ar de secagem	4m s ⁻¹	Velocidade limite de operação definida na metodologia
\dot{V}	Vazão volumétrica	0,05308 m ³ s ⁻¹	Equação (3)
v_{esp}	Volume específico do ar na condição ambiente	0,939 m ³ kg _{ar seco} ⁻¹	Tabela 4
\dot{m}	Vazão mássica	0,05653kg _{ar seco} s ⁻¹ .	Equação (2)
\dot{W}_{ele}	Potência elétrica necessária	3,5kW	Equação (1)

Fonte: Próprio autor.

Definida a potência elétrica necessária foi selecionado um conjunto de quatro resistências elétricas aletadas com potência de dissipação de calor para o ar de 1kW cada, totalizando 4kW de potência. As resistências selecionadas possuem 195mm de altura e tensão de alimentação de 220V, a fim de reduzir a corrente necessária para sua operação. Dessa forma, em alimentação de 220V as quatro potências juntas consomem uma corrente de 18A ao passo que em 110V, as mesmas consumiriam 36A. Outro fato é que as resistências dimensionadas possuem valor 12,5% maior que o definido pelos cálculos, oferecendo ao sistema uma margem de segurança quanto a disponibilidade de potência elétrica. Na Figura 27 tem-se a resistência aletada a

esquerda e um esquema geral de suas medidas, que foram utilizadas para o dimensionamento do geométrico do secador.

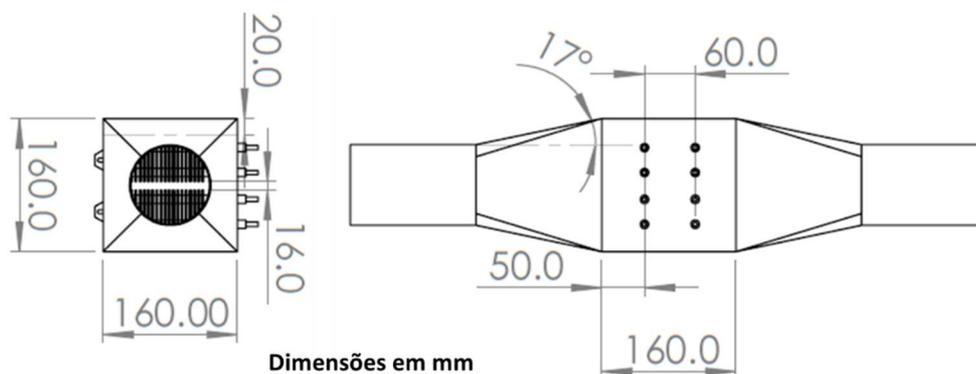
Figura 27 – Resistência aletada de 1kW selecionada.



Fonte: Próprio autor.

Com o tamanho da resistência definido, foi dimensionada a câmara de aquecimento de forma a comportar as quatro resistências. A vista esquemática da câmara de aquecimento pode ser vista na Figura 28.

Figura 28 – Esquema de distribuição das resistências na câmara de aquecimento.

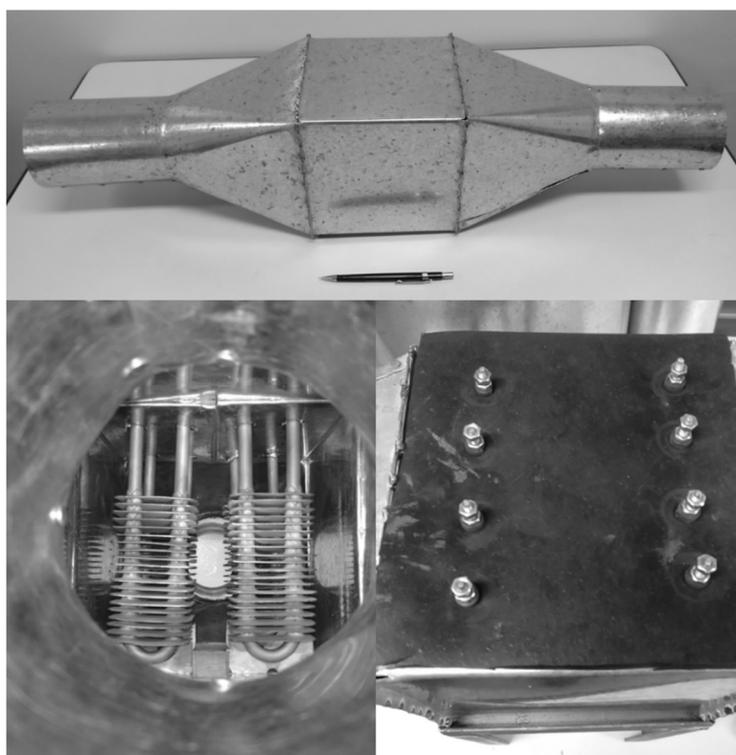


Fonte: Próprio autor.

Conforme pode ser visto a câmara de aquecimento possui uma expansão e uma redução na seção. Ambas obedeceram às regras de utilizar ângulos entre 15 e

45° conforme recomendado por Dalpasquale *et al.* (1991). Os dutos que surgem dessas reduções possuem um diâmetro de 97mm a fim de que os mesmos sejam capazes de encaixarem em tubos de PVC de 100mm de diâmetro, dessa forma foi utilizado uma curva de 90° e uma luva desse mesmo diâmetro como interseção entre o *plenum* e a câmara de aquecimento. O desenho de construção da câmara de aquecimento que foi encaminhada para fabricação é o desenho de número 1 do APÊNDICE E. Após a fabricação da câmara de aquecimento em chapa galvanizada 22 (0,8mm de espessura) as resistências foram posicionadas e uma placa de borracha foi utilizada para ajudar na vedação e no isolamento do lado em que ficaram os fios elétricos, a fim de evitar qualquer tipo de curto com a carcaça da câmara. A Figura 29 apresenta a câmara de aquecimento e o posicionamento das resistências em seu interior.

Figura 29 – Câmara de aquecimento fabricada.



Fonte: Próprio autor.

A câmara de distribuição do ar (*plenum*) foi fabricada conforme o desenho número 2 do APÊNDICE E. Seu tamanho obedece a referência de Dalpasquale *et al.* (1991) que definiu que para um leito de 0,700m de altura de grãos dever-se-ia ter um *plenum* de no mínimo 0,5m de altura. Visto que para um leito de apenas 0,2m, que é

o caso desse trabalho, um *plenum* de 0,5m seria desproporcional e o gasto de material seria maior, optou-se por realizar uma proporção desse valor, ou seja, o *plenum* deve ter no mínimo 70% do tamanho do leito, entretanto além disso, como meio de expansão o *plenum* deve respeitar a angulação entre 15 e 45°. Assim, foi construído um *plenum* de 0,22m considerando um leito máximo de 0,3m, além disso a angulação do *plenum* foi de 35°. Acima do *plenum* foi deixada uma região do mesmo diâmetro do leito de grãos com 100mm de comprimento, essa região tem como finalidade proporcionar espaço para a realização das medidas de velocidade, umidade, pressão e temperatura na entrada do secador. O *plenum* também, possui um encaixe que possibilita que a câmara de secagem seja removível, possibilitando as medições de peso do leito de grãos, além de permitir que sejam desenvolvidos outros formatos de câmara de secagem. O *plenum* fabricado e o encaixe da câmara de secagem podem ser vistos na Figura 30.

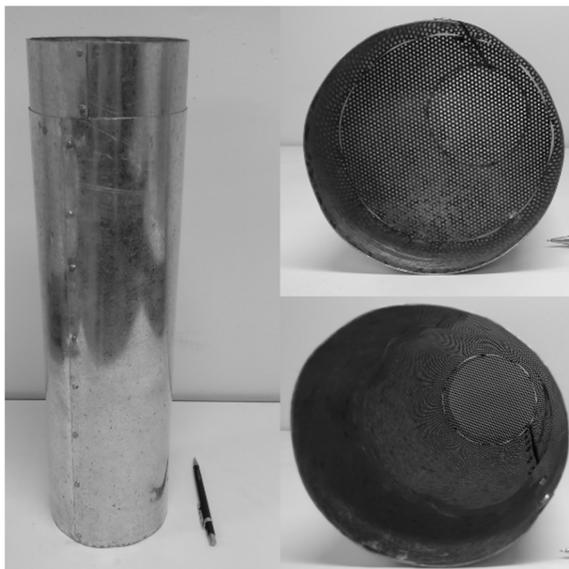
Figura 30 – Plenum e encaixe da câmara de secagem.



Fonte: Próprio autor.

A câmara de secagem foi elaborada com um total de 450mm de altura dos quais apenas 200mm serão utilizados como leito de secagem. A fim de abrigar os grãos foi utilizada uma chapa furada com 31% de área aberta, furos alternados de 1mm de diâmetro. A chapa furada foi posicionada a 50mm do início da peça a fim de deixar uma superfície de encaixe para a conexão com o *plenum*. O desenho de fabricação da câmara de secagem é o número 3 do APÊNDICE E. A câmara de secagem fabricada e a chapa perfurada em seu interior estão na Figura 31.

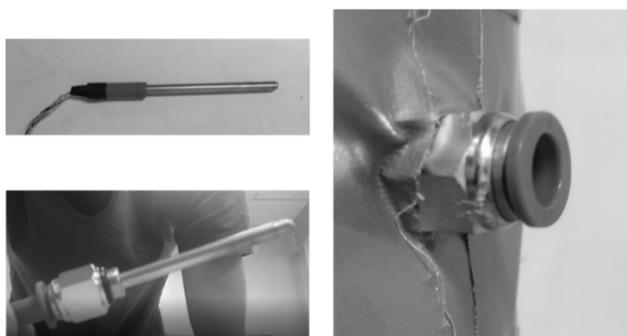
Figura 31 – Câmara de secagem fabricada.



Fonte: Próprio autor.

Também foram fabricados apoios para o *plenum* e para a câmara de aquecimento a fim de estabilizarem o secador, os desenhos dos suportes do *plenum* e da câmara de aquecimento são os número 4 e 5 do APÊNDICE E, respectivamente. Após a fabricação foi realizado a instalação dos pontos de medição, foram cinco pontos de medição de termopares na câmara de secagem, e dois no *plenum*, a fim de manter a vedação e a capacidade de retirada dos sensores termopares, conectores pneumáticos de engate rápido foram adaptados. Dessa forma, um pequeno pedaço da mangueira pneumática foi colado no fim do termopar, assim quando posicionado no conector de engate rápido o termopar fica preso e a vedação é mantida, isso tudo sem perder a facilidade de retirada do engate rápido. A Figura 32 apresenta a conexão de engate rápido utilizada para o posicionamento dos termopares.

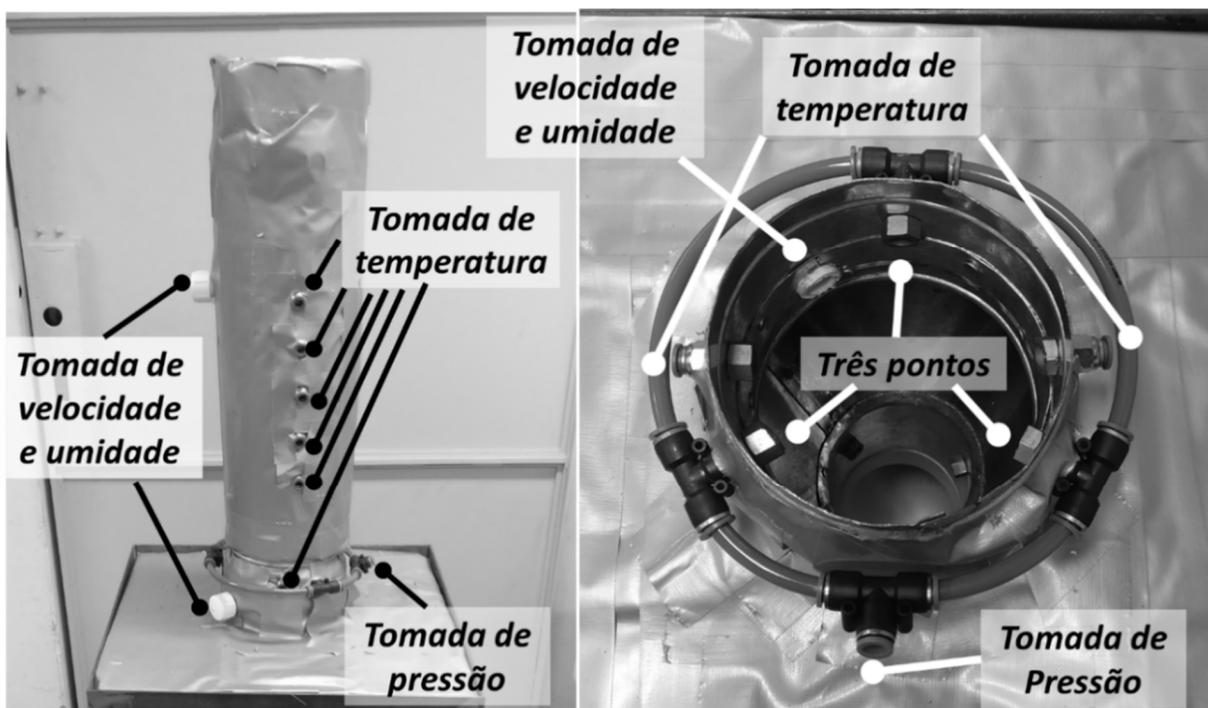
Figura 32 – Conexão de engate rápido dos termopares.



Fonte: Próprio autor.

Para pressão foi realizada uma medição no *plenum*, entretanto para melhorar a tomada da pressão estática foram criados três pontos a 0, 120 e 240° na mesma seção do tubo, os quais foram conectados todos eles ao transdutor de pressão como se fossem um só ponto, para essa conexão também foi utilizado conectores pneumáticos de engate rápido tipo t e mangueiras pneumáticas. Para velocidade e a umidade foram criados um ponto no *plenum* e um na saída da câmara de secagem, através da utilização de uma rosca de PVC e um tampão. Ambos os elementos descritos podem ser observados na Figura 33.

Figura 33 – Posicionamento dos sensores.

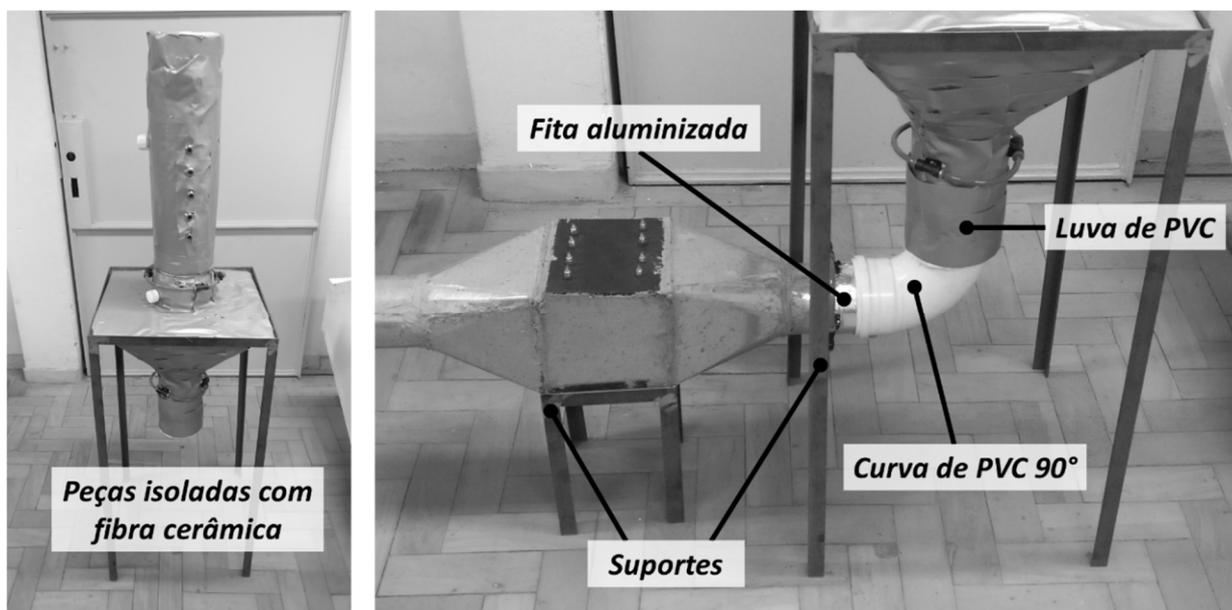


Fonte: Próprio autor.

O isolamento do secador foi realizado na região do *plenum* e da câmara de secagem a fim de garantir uma melhor proximidade das condições de isolamento geralmente presentes em modelos matemáticos. Dessa forma, foi utilizada uma manta de fibra cerâmica de 10mm de espessura com condutividade térmica de $18W\ mK^{-1}$. Todas as frestas resultantes da dobra e dos rebites realizados na fabricação foram vedadas com veda calha a fim de diminuir as perdas de ar na tubulação. O encaixe entre as peças de PVC e as de aço galvanizado foram ajustadas com fita aluminizada a fim de garantir uma tolerância mais justa. Na Figura 34 estão destacadas as peças

isoladas termicamente com a fibra cerâmica, os suportes, as peças de PVC e a região de encaixe ajustada com fita aluminizada.

Figura 34 – Isolamento de fibra cerâmica, peças de PVC e suportes.

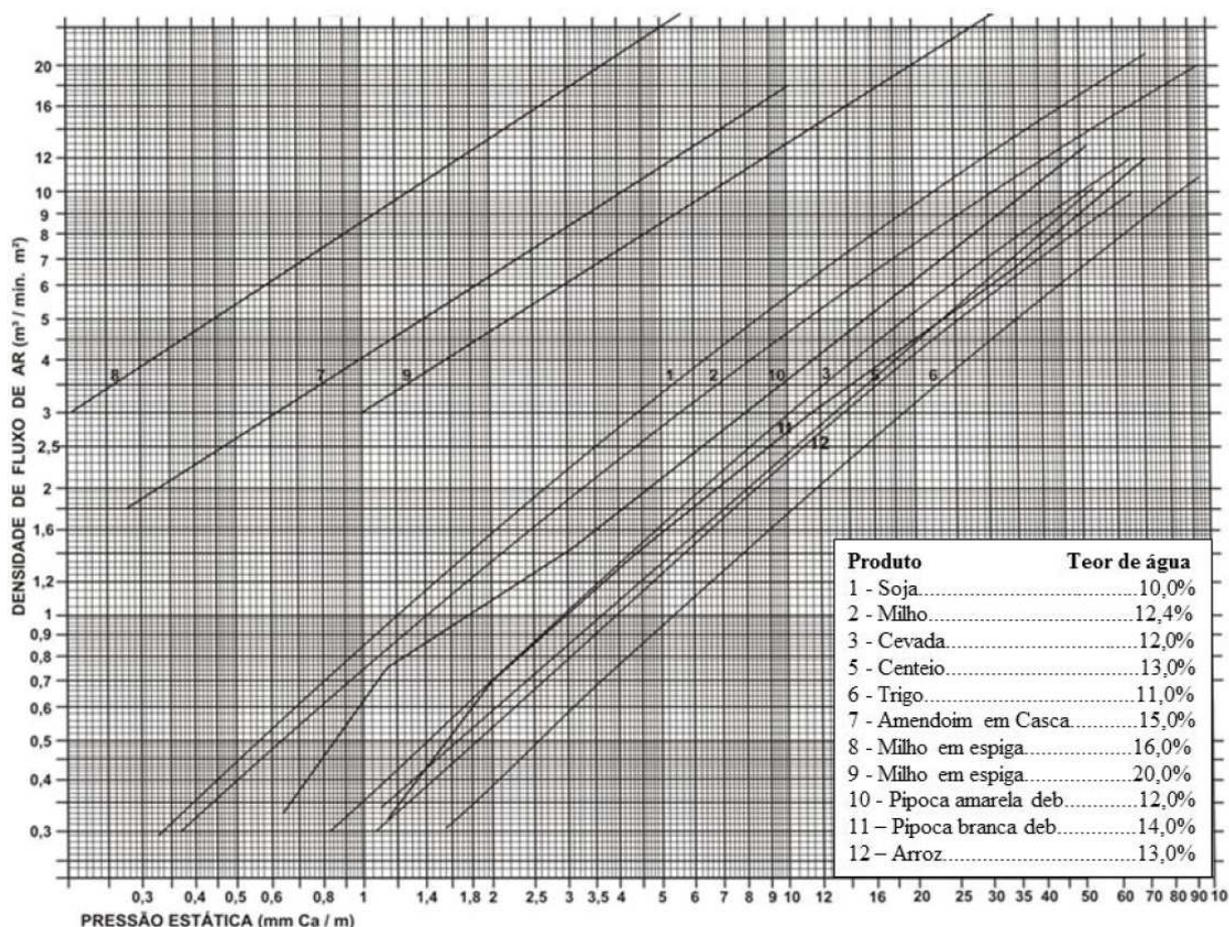


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 34 a luva de PVC se encontra por baixo do isolamento de fibra de cerâmica, além disso é possível verificar o veda calha aplicado nas costuras da câmara de aquecimento. Para a seleção do ventilador é necessário descobrir a pressão e o fluxo de ar máximo necessário para o processo de secagem. Segundo Dalpasquale *et al.* (1991) a densidade do fluxo de ar nos processos de secagem varia de $0,12$ a $0,25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$, assim, considerando o valor máximo e o transformando para minutos tem-se que o fluxo de ar seria de $15 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1} \text{ m}^{-2}$.

Quanto à pressão necessária é preciso considerar a resistência a passagem do ar imposta pela massa de produto, essa resistência pode ser calculada pela Equação (4) e depende do tipo do produto secado, da altura do leito, da vazão de ar e do fator de correção ligado a perdas no escoamento. Na Figura 35, o gráfico representa a pressão estática imposta pelos principais produtos agrícolas, nela pode-se notar que quanto mais a direita a curva, maior a perda de pressão que o produto impõe para uma mesma vazão. Dessa forma, para o cálculo da pressão máxima que o ventilador deve fornecer foi utilizado o produto que apresenta maior resistência à passagem do ar, que no caso é o trigo representado pela curva 6.

Figura 35 – Gráfico de Sheed para determinação da pressão estática imposta pelos principais produtos agrícolas.



Fonte: Martins, 2015.

Portanto, a queda de pressão imposta pelo trigo foi calculada pela Equação (4), para valores de coeficiente de “a” igual a 0,825 e “b” igual a 0,164 (SILVA, 2008). O valor da queda de pressão imposta pelo leito de trigo para a altura de leito utilizada no secador e uma altura máxima definida a partir do tamanho máximo da câmara de secagem estão apresentados na Tabela 6 . A pressão corrigida utilizou um fator de correção de 1,25, para garantir que possíveis perdas de pressão por irregularidades na vedação não interfiram no funcionamento do equipamento.

Tabela 6 – Pressão imposta pela coluna de 200mm de trigo.

Densidade de fluxo de ar ($\text{m}^3 \text{min}^{-1} \text{m}^{-2}$)	Altura do Leito (m)	ΔP (mmca)	$\Delta P_{\text{corrigida}}$ (mmca)
15	0,2	29,9	37,4
15	0,4	59,8	74,8

Fonte: Próprio autor.

Como o estudo será realizado com milho, na Tabela 7 também foi calculado a pressão imposta pelo leito de milho para os mesmos valores, assim foram utilizados os coeficientes de “a” igual a 0,583 e “b” igual a 0,512 (SILVA, 2008).

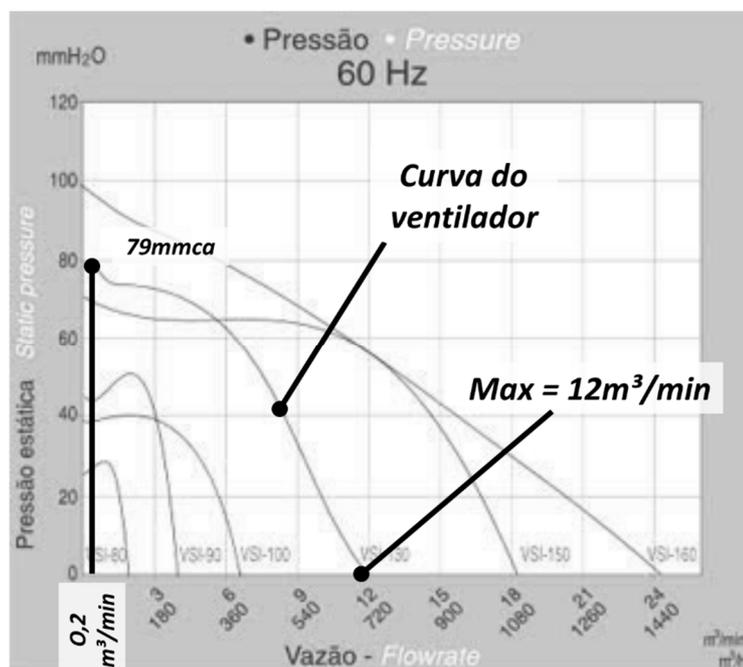
Tabela 7 - Pressão imposta pela coluna de 200mm de milho.

Densidade de fluxo de ar ($\text{m}^3 \text{min}^{-1} \text{m}^{-2}$)	Altura do Leito (m)	ΔP (mmca)	$\Delta P_{\text{corrigida}}$ (mmca)
15	0,2	12,1	15,2
15	0,4	24,3	30,4

Fonte: Próprio autor.

A fim de garantir a capacidade de realizar a secagem do trigo nas condições de fluxo máximo definidas é necessário utilizar um ventilador que forneça uma pressão maior ou igual a calculada na vazão definida. Assim, considerando o fluxo de $15\text{m}^3\text{min}^{-1}\text{m}^{-2}$ é possível encontrar a vazão volumétrica máxima demandada para o processo, através da multiplicação do fluxo de ar e a área da câmara de secagem, assim, tem-se que a vazão demandada é de $0,2\text{m}^3\text{min}^{-1}$. Dessa forma, o ventilador selecionado precisa oferecer uma pressão de 74,8mmca na vazão de $0,2\text{m}^3\text{min}^{-1}$. O ventilador selecionado foi o Siroco 2P da marca Varivelox, que utiliza um motor monofásico de 220V e 1/3cv com rotação de 3500RPM. Segundo o fabricante o ventilador tem vazão máxima aproximada de $12\text{m}^3 \text{min}^{-1}$. Entretanto como não foi fornecida a curva do ventilador foi utilizado como aproximação a curva de um ventilador siroco de outra marca, que possuísse características de vazão e dimensões próximas. Conforme apresentado na Figura 36.

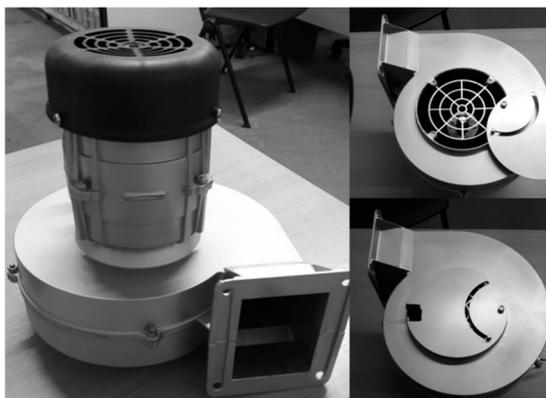
Figura 36 – Curvas dos ventiladores Siroco da IBRAM.



Fonte: Adaptado de IBRAM (2018).

O ventilador mais próximo encontrado foi o VSI-130 da IBRAM, que possui as mesmas dimensões de vazão máxima e de dimensões dos furos. Como pode ser visto o mesmo possui uma pressão de aproximadamente 79mmca para a vazão máxima demandada. Dessa forma, considerando um comportamento parecido entre os ventiladores, o ventilador escolhido possui capacidade de realizar a secagem de trigo em ambos os tamanhos de coluna definidos. O ventilador selecionado pode ser visto na Figura 37, e possui um ajuste de vazão através de um diafragma instalado em sua entrada de ar, esse ajuste foi utilizado para o controle de velocidade do ar de entrada.

Figura 37 – Ventilador siroco Varivelox.



Fonte: Próprio autor.

A conexão da tubulação com o ventilador foi fabricada pelo processo de impressão 3D do tipo FDM, utilizando o plástico ABS. Dessa forma, com as medidas do ventilador a peça foi modelada para entrar no tubo da câmara de aquecimento e encaixar no ventilador por meio de um flange. A peça fabricada pode ser vista na Figura 38.

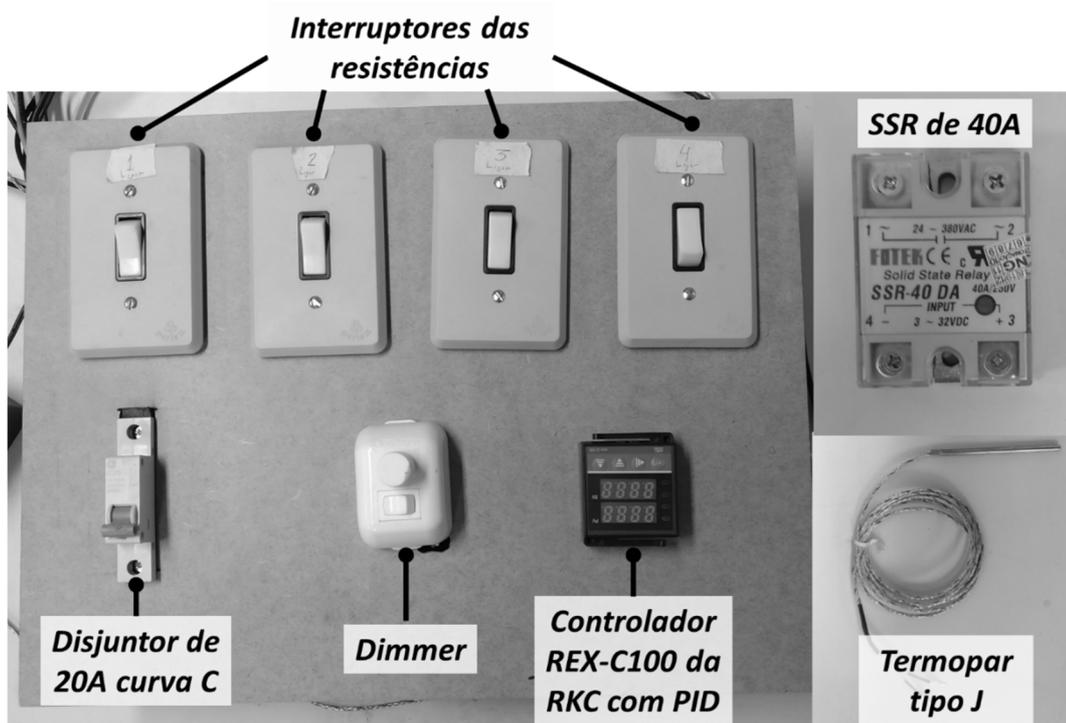
Figura 38 – Flange de conexão do ventilador ao secador.



Fonte: Próprio autor;

O circuito elétrico do secador é composto pelos itens apresentados na Figura 39:

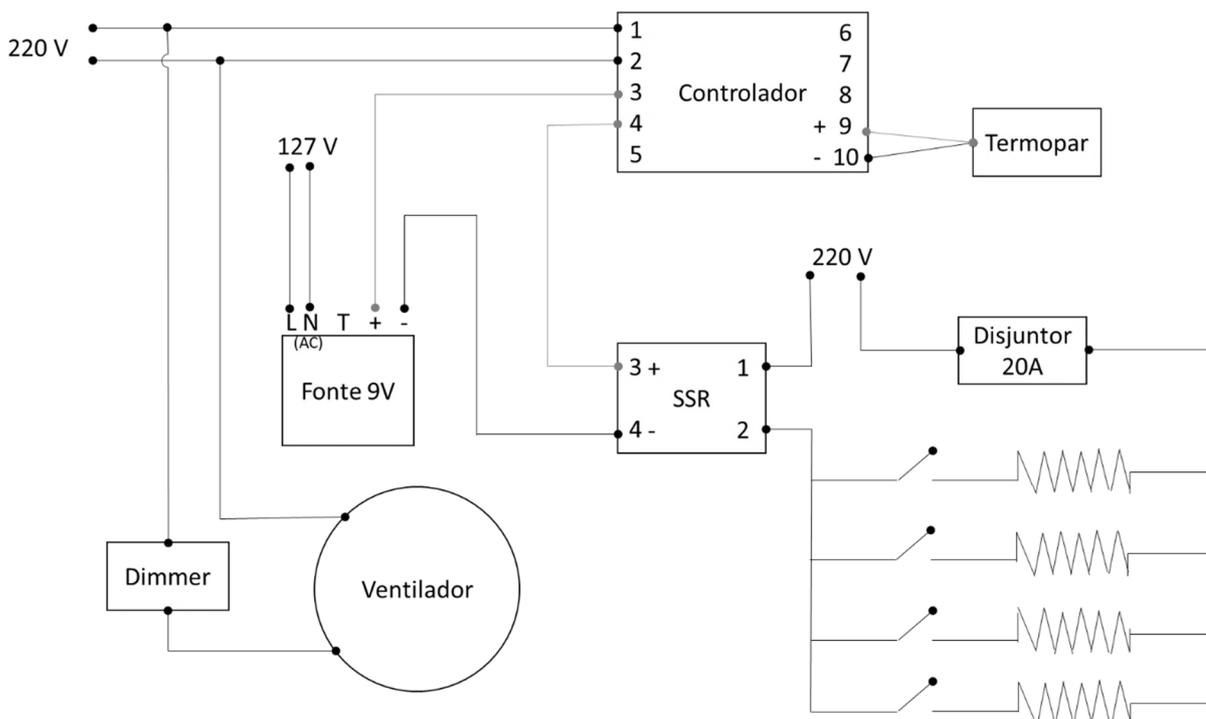
Figura 39 – Itens da parte elétrica do secador.



Fonte: Próprio autor.

A parte elétrica do secador de forma geral fornece ao usuário a possibilidade de ligar e desligar as resistências de maneira independente, além ligar e desligar o ventilador pelo interruptor do *dimmer*. O *dimmer* foi empregado com objetivo de tentar regular a rotação do motor monofásico, entretanto seu emprego não foi efetivo, assim, a vazão foi controlada apenas pelo diafragma do ventilador. O disjuntor de 20A protege as resistências de uma sobretensão e o controlador pode ser regulado pelo usuário para diferentes temperaturas do ar de secagem. Essa temperatura é medida pelo termopar que foi calibrado para as temperaturas de secagem e sua correção aplicada no controlador. O esquema do circuito elétrico utilizado no secador pode ser encontrado na Figura 40.

Figura 40 – Esquema elétrico do secador desenvolvido.



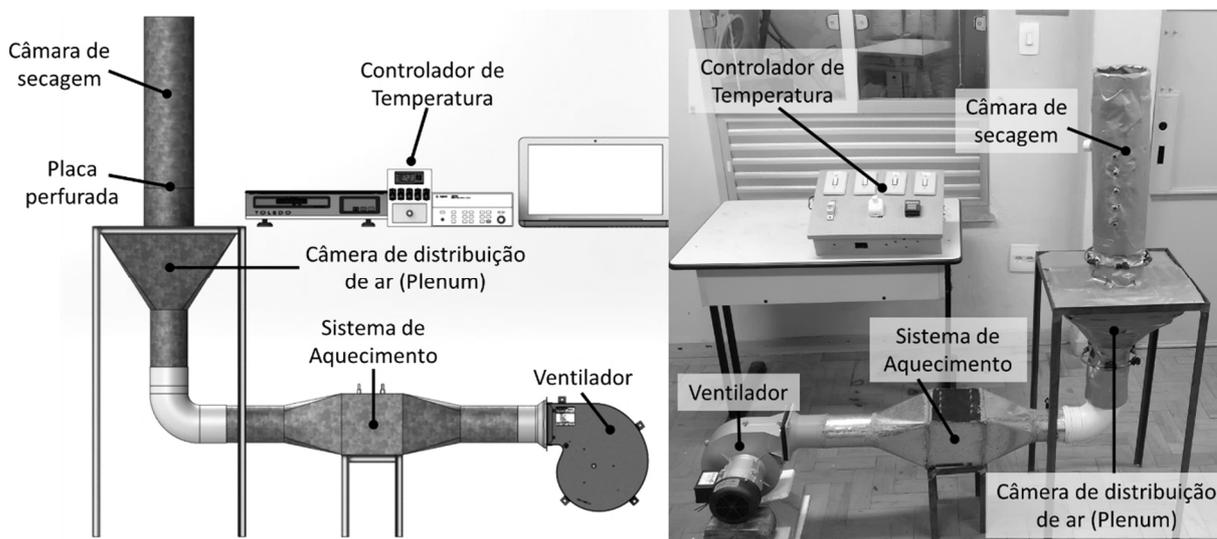
Fonte: Próprio autor.

O acionamento das resistências é realizado pelo controlador a partir da medição do termopar, assim, à medida que o controlador manda sinal ele ativa o SSR, que aciona o circuito das resistências. A utilização do SSR permite segurança ao sistema uma vez que não há conexão física entre o circuito do controlador e o das resistências que exigem uma alta corrente. Para avaliação do consumo do secador

serão instalados wattímetros nas duas entradas de 220V, correspondendo assim ao consumo do ventilador e das resistências.

O secador experimental desenvolvido teve um custo de aproximadamente R\$1600,00 e a lista de gastos está apresentada no APÊNDICE F. Dessa forma, com o investimento aplicado na construção do secador foi possível realizar as medidas experimentais da secagem do milho, com controle de temperatura e regulagem de velocidade do ar de secagem. Na Figura 41 está apresentado o projeto do secador experimental desenvolvido ao lado do secador pronto e alocado no Laboratório de secagem do DEMAT.

Figura 41 – Projeto CAD e secador construído.



Fonte: Próprio autor.

4.2. Experimentos de secagem

Os experimentos de secagem foram conduzidos na segunda quinzena do mês de outubro de 2018, no laboratório de secagem do DEMAT e seguiram os procedimentos definidos na metodologia deste trabalho. Conforme também exposto na metodologia, o milho foi colhido nos campos experimentais da EMBRAPA Milho e Sorgo, localizada em Sete Lagoas, no dia 25 de setembro. No total foram utilizados 12,748kg de milho para a realização de todos os experimentos, representando uma

média de 2,125kg por experimento. A quantidade de milho utilizada em cada experimento pode ser encontrada na Tabela 8.

Tabela 8 – Quantidade de milho utilizado nos experimentos de secagem.

Data	Exp.	Parâmetros de entrada		$m_{g,0}$ (kg)
		Temperatura (°C)	Velocidade (m s ⁻¹)	
16/10/2018	1	40	0,8	2,124
24/10/2018	2	40	1,3	2,134
17/10/2018	3	50	0,8	2,042
30/10/2018	4	50	1,3	2,180
23/10/2018	5	60	0,8	2,134
31/10/2018	6	60	1,3	2,134
Total				12,748
Média				2,125

Fonte: Próprio autor.

O teor de umidade inicial do milho utilizado em cada experimento foi definido seguindo o procedimento descrito no APÊNDICE D. Na Tabela 9, está apresentado o resumo dos resultados dos experimentos de determinação do teor de umidade inicial do produto realizados em estufa. Os relatórios detalhados de cada experimento de determinação do teor de umidade inicial se encontram no APÊNDICE G.

Tabela 9 – Resumo dos experimentos de determinação do teor de umidade inicial de cada experimento.

Amostra	Data	$m_{g,u}$ (kg)	$m_{g,se}$ (kg)	$M_{0,bs}$ (%)	$M_{0,bu}$ (%)
Embalagem 1	16/10/18	0,230	0,189	21,7	17,8
	16/10/18	0,213	0,175	21,7	17,8
	17/10/18	0,221	0,181	22,1	18,1
	17/10/18	0,218	0,178	22,5	18,3
Embalagem 2	23/10/18	0,217	0,177	22,6	18,4
	23/10/18	0,206	0,168	22,6	18,4
	24/10/18	0,209	0,171	22,2	18,2
	24/10/18	0,195	0,159	22,6	18,5
Embalagem 3	30/10/18	0,200	0,164	22,0	18,0
	30/10/18	0,199	0,162	22,8	18,6
	31/10/18	0,201	0,165	21,8	17,9
	31/10/18	0,203	0,167	21,6	17,7

Fonte: Próprio autor.

A incerteza de medição do teor de umidade inicial está ligada apenas a incerteza da balança, assim quanto maior a amostra menor o erro em relação ao todo. A fim de reduzir a incerteza do teor de umidade inicial do produto, seu valor foi vinculada a embalagem de origem do milho, dessa forma, considerando uma única amostra grande para cada embalagem, onde essa amostra tem como massa a soma das massa de cada amostra menor da mesma embalagem e utilizando as equações de análise de incerteza do EES, foram obtidos os valores de umidade inicial apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Teor de umidade inicial das embalagens com incerteza e probabilidade de enquadramento de 95%.

Amostra	$M_{0,bs}(\%)$	$M_{0,bu}(\%)$
Embalagem 1	$22,0 \pm 0,1$	$18,0 \pm 0,1$
Embalagem 2	$22,5 \pm 0,1$	$18,4 \pm 0,1$
Embalagem 3	$22,0 \pm 0,1$	$18,1 \pm 0,1$

Fonte: Próprio autor.

Por fim, definido o teor de umidade inicial de cada embalagem utilizada para os experimentos é possível destacar a umidade inicial em base seca e úmida de cada experimento realizado, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11 – Teor de umidade inicial dos experimentos com incerteza e probabilidade de enquadramento de 95%.

Data	Exp.	Parâmetros de entrada		$M_{0,bs}(\%)$	$M_{0,bu}(\%)$
		Temperatura (°C)	Velocidade (ms⁻¹)		
16/10/18	1	40	0,8	$22,0 \pm 0,1$	$18,0 \pm 0,1$
24/10/18	2	40	1,3	$22,5 \pm 0,1$	$18,4 \pm 0,1$
17/10/18	3	50	0,8	$22,0 \pm 0,1$	$18,0 \pm 0,1$
30/10/18	4	50	1,3	$22,1 \pm 0,1$	$18,1 \pm 0,1$
23/10/18	5	60	0,8	$22,5 \pm 0,1$	$18,4 \pm 0,1$
31/10/18	6	60	1,3	$22,1 \pm 0,1$	$18,1 \pm 0,1$

Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros médios de entrada do ar de secagem e do ar ambiente, medidos durante cada um dos experimentos estão apresentados na Tabela 12. Os dados completos dos experimentos de secagem estão nos relatórios do APÊNDICE H.

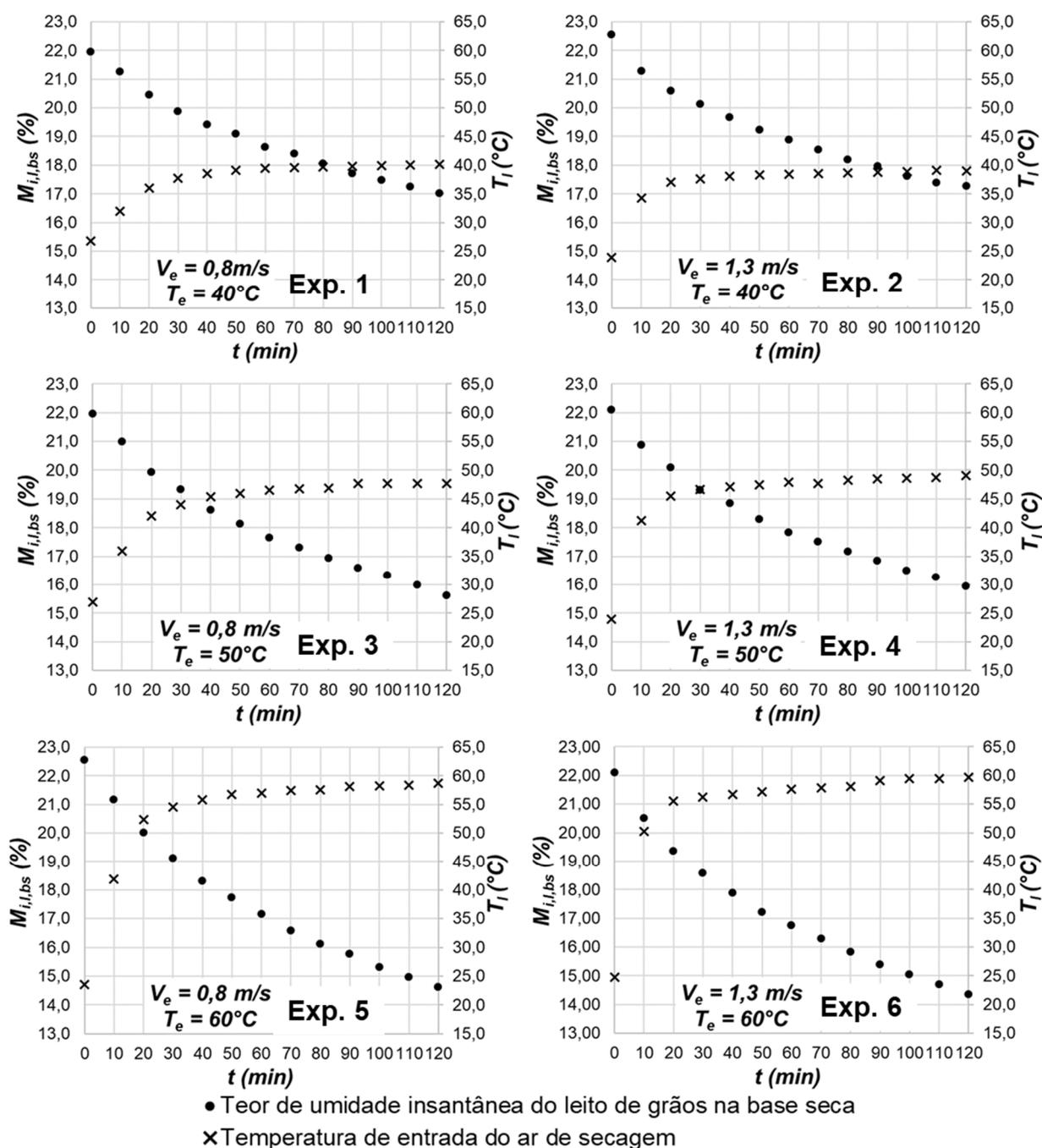
Tabela 12 – Parâmetros de entrada e do ambiente dos experimentos de secagem com incerteza e probabilidade de enquadramento de 95%.

Data	Exp.	\bar{T}_e (°C)	\bar{V}_e (ms ⁻¹)	\bar{P}_e (kPa)	\bar{T}_{amb} (°C)	\overline{UR}_{amb} (%)	\dot{W}_{VC} (W)	$M_{0,bs}$ (%)
16/10	1	42,3 ± 0,2	0,8 ± 0,2	92,325 ± 0,009	28,4 ± 0,3	58 ± 4	126 ± 1	22,0 ± 0,1
24/10	2	39,8 ± 0,3	1,3 ± 0,2	92,58 ± 0,01	25,3 ± 0,3	45 ± 4	243 ± 1	22,5 ± 0,1
17/10	3	50,3 ± 0,2	0,9 ± 0,2	92,31 ± 0,01	29,5 ± 0,2	53 ± 4	126 ± 1	22,0 ± 0,1
30/10	4	50,5 ± 0,3	1,3 ± 0,2	92,58 ± 0,02	26,7 ± 0,2	57 ± 4	243 ± 1	22,1 ± 0,1
23/10	5	60,6 ± 0,2	0,8 ± 0,2	92,31 ± 0,01	27,0 ± 0,4	48 ± 4	126 ± 1	22,5 ± 0,1
31/10	6	60,2 ± 0,7	1,3 ± 0,2	92,58 ± 0,02	26,8 ± 0,2	44 ± 4	243 ± 1	22,1 ± 0,1

Fonte: Próprio autor.

A Figura 42, mostra o teor de umidade médio e a temperatura média do leito para cada um dos experimentos realizados neste trabalho. Dentre os parâmetros variados, temperatura e velocidade do ar de secagem, apenas a temperatura gerou diferenças expressivas no ponto de vista da diminuição do teor de umidade de secagem. Por outro lado, a influência da velocidade, ficou clara no fator de aquecimento do leito de grãos, dessa forma, a velocidade do ar causou um aquecimento mais rápido dos grãos de milho para uma mesma temperatura do ar de entrada.

Figura 42 – Teor de umidade instantâneo em base seca e temperatura média do leito de grãos dos experimentos de secagem.



Fonte: Próprio autor.

A influência da velocidade do ar de entrada na temperatura média do leito, pode ser evidenciada pela análise do salto inicial da temperatura média do leito de grãos, conforme apresentado na Tabela 13. Esse aumento da velocidade de aquecimento é provocado pelo aumento da vazão mássica que está diretamente relacionado a energia disponível para o aquecimento dos grãos de milho. Dessa forma, para 40 e

50°C de temperatura de entrada a variação de temperatura praticamente dobra devido a velocidade nos primeiros 10 minutos. Por outro lado, apesar da variação de temperatura média do leito no tempo apresentado ser diretamente proporcional a temperatura do ar de entrada, o maior pico de variação de temperatura, devido a velocidade, ocorre entre os experimentos de 50°C de entrada.

Tabela 13 – Variação da temperatura média do leito nos primeiros 10 minutos de experimento.

Exp.	Parâmetros de entrada		$\Delta T_{0-10min}(^{\circ}C)$	Diferença entre as variações de temperatura
	Temperatura ($^{\circ}C$)	Velocidade (ms^{-1})		
1	40	0,8	5,2	5,1
2	40	1,3	10,3	
3	50	0,8	9,0	8,2
4	50	1,3	17,2	
5	60	0,8	18,2	7,2
6	60	1,3	25,4	

Fonte: Próprio autor.

Voltando para a análise da Figura 42, tem-se que para 120 minutos de teste a umidade média do leito de grãos teve uma redução máxima de 7,9% de umidade na base seca, para o experimento 5, com temperatura de entrada igual a 60°C e velocidade igual a 0,8m/s. E redução mínima de 4,9% de umidade na base seca, para o experimento 1, com temperatura de entrada igual a 40°C e velocidade de 0,8m/s. A Tabela 14 mostra o teor de umidade médio do leito em base seca inicial, final e a variação total de umidade para cada experimento.

Tabela 14 – Teor de umidade inicial, final e variação do teor de umidade total dos experimentos de secagem com incerteza e probabilidade de enquadramento de 95%.

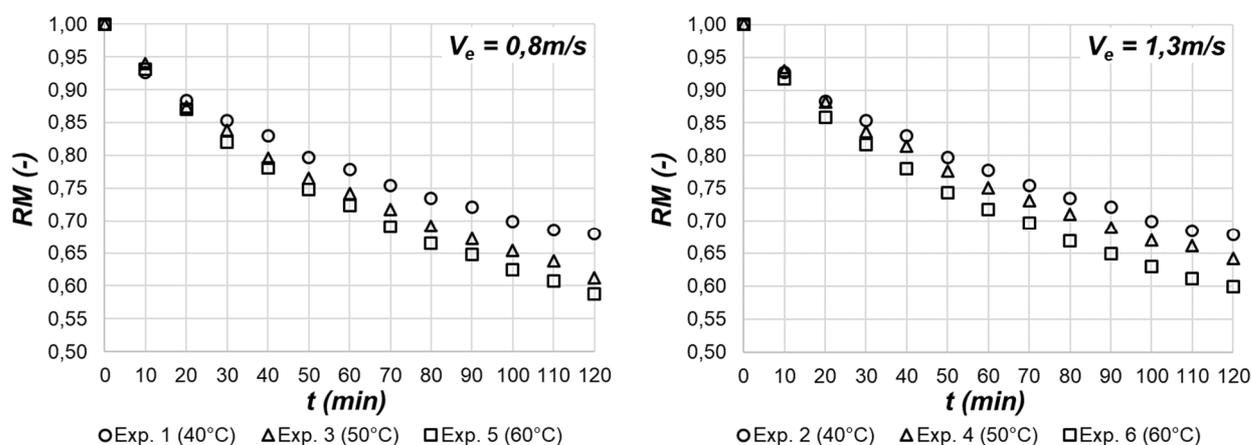
Exp.	$M_{0,l,bs}(\%)$	$M_{f,l,bs}(\%)$	$\Delta M_{0-f,l,bs}(\%)$
1	22,0 ± 0,1	17,0 ± 0,1	4,9 ± 0,2
2	22,5 ± 0,1	17,3 ± 0,1	5,3 ± 0,2
3	22,0 ± 0,1	15,6 ± 0,1	6,3 ± 0,2
4	22,1 ± 0,1	15,9 ± 0,1	6,2 ± 0,2
5	22,5 ± 0,1	14,6 ± 0,1	7,9 ± 0,2
6	22,1 ± 0,1	14,4 ± 0,1	7,7 ± 0,2

Fonte: Próprio autor.

Pela variação máxima do teor de umidade em porcentagem na base seca fica clara a grande influência da temperatura sobre a umidade final do leito, o aumento da temperatura faz com que os valores do teor de umidade de equilíbrio entre o ar e os grãos sejam menores e conseqüentemente resultam em maior retirada de umidade dos grãos. Em contrapartida novamente pode-se destacar a pouca influência dos valores testados de velocidade de entrada na redução do teor de umidade dos grãos, inclusive não demonstrando tendência de crescimento e nem redução.

Por outro lado, apesar de demonstrar a redução do teor de umidade médio do leito, a Figura 42 e a Tabela 14, não são a melhor forma de comparação entre os experimentos, pois existe variação do teor de umidade inicial dos grãos e da umidade relativa do ar ambiente entre cada um dos experimento, o que acaba influenciando no teor de umidade de equilíbrio que é um dos principais vetores da dinâmica de secagem dos grãos. Assim, outra forma de avaliar a remoção de umidade do leito é por meio da razão de umidade que utilizando o conceito de teor de umidade de equilíbrio e transforma os valores do teor de umidade em uma razão de 1 a 0, onde 1 significa o teor de umidade inicial do leito de grãos e 0 a seu teor de umidade de equilíbrio nas condições de entrada de cada experimento. Dessa forma a Figura 43 apresenta a comparação da dinâmica de secagem, em termos da razão de umidade, de acordo com a temperatura de entrada dos experimentos.

Figura 43 – Razão de umidade pelo tempo de acordo com a temperatura de entrada dos experimentos.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 43 o aumento da temperatura de secagem tem grande influência no processo, resultando em maior diminuição do teor de umidade dos grãos e conseqüentemente reduzindo o tempo de secagem para uma mesma razão de umidade. Por exemplo, tomando-se a razão de umidade final do experimento 1 que foi igual a 0,68 no tempo 120 minutos, tem-se que no experimento 3 essa razão de umidade foi alcançada entre o tempo de 90 e 80 minutos e no experimento 5 entre o tempo 70 e 80. Nos experimentos com a velocidade do ar mais alta, fazendo a mesma lógica, tem-se que no experimento 4 a razão final do experimento 2 é alcançada no tempo de 90min, ao passo que no experimento 6 ela é alcançada entre o tempo de 70 e 80 minutos. Assim, em média tomando a temperatura de 40°C e a velocidade de 0,8ms⁻¹ como referência, um aumento de 25% na temperatura (50°C) resulta em uma redução de 29% no tempo de secagem para a razão de umidade de 0,68. Por outro lado, tomando a mesma referência um aumento de 50% na temperatura de entrada do ar (60°C), resulta em uma redução de 37,5% no tempo de secagem para a mesma razão de umidade.

Esse fato se deve ao aumento da disponibilidade de energia para a vaporização da água e da elevação do coeficiente de transferência de massa com o aumento da temperatura de secagem. Pois quando a temperatura do ar de secagem aumenta, a taxa de transferência de calor entre o ar e os grãos é maior. Isso leva a uma elevação da evaporação de umidade, reduzindo o tempo de secagem. Além disso, considerando uma umidade relativa constante, tem-se que a concentração interfacial de umidade nos grãos é uma função da temperatura de bulbo úmido do ar, assim quanto maior a temperatura, mais alta essa concentração e maior será a força motriz resultante para a transferência de massa. (TORKI HARCHEGANI *et al.*, 2012)

Por esse motivo, para a mesma umidade relativa o teor de umidade de equilíbrio é sempre menor a medida que a temperatura aumenta, fato que pode ser observado na Tabela 15, que contém os valores do teor de umidade de equilíbrio médio calculados para cada experimento. Os casos de divergência da tabela, onde a temperatura de entrada é maior, mas o teor de umidade de equilíbrio é maior, devem-se ao fato de que o teor de umidade de equilíbrio também depende da umidade relativa de entrada, que por sua vez depende da umidade absoluta do ar ambiente, que é ligada tanto a umidade relativa e quanto a temperatura do ar ambiente. Dessa forma, para valores próximos de temperatura como o caso dos experimentos que

possuem mesmo nível de temperatura de entrada, a influência da umidade do ar acaba transparecendo.

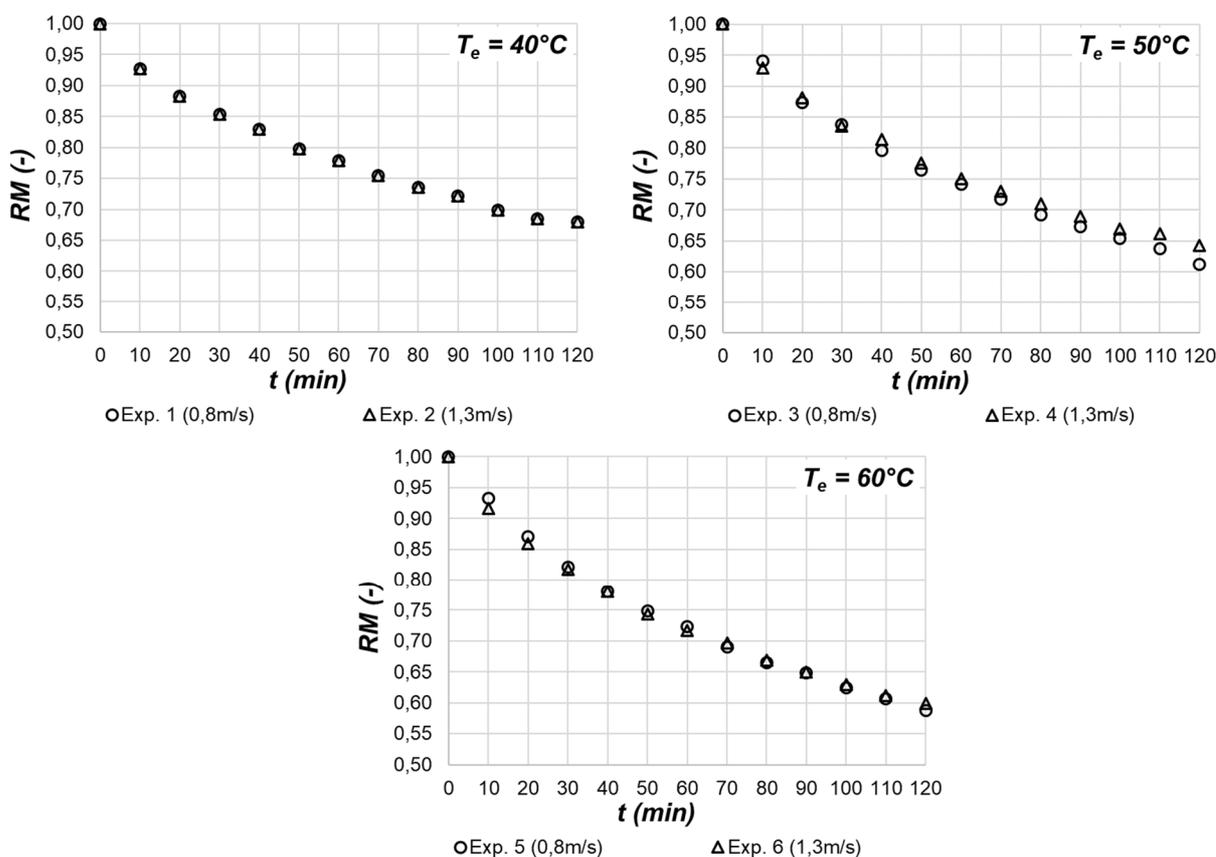
Tabela 15 – Temperatura e umidade relativa do ar ambiente, temperatura e umidade relativa do ar de entrada e teor de umidade de equilíbrio médio para cada experimento com incerteza e probabilidade de enquadramento de 95%.

Exp.	$\bar{T}_{amb}(^{\circ}\text{C})$	$\overline{UR}_{amb}(\%)$	$\bar{T}_e(^{\circ}\text{C})$	$\overline{UR}_e(\%)$	$\bar{M}_{eq,bs}(\%)$
1	28,4± 0,3	58 ± 4	42,3 ± 0,2	27 ± 2	6,2 ± 0,3
2	25,3± 0,3	45 ± 4	39,8 ± 0,3	21 ± 2	6,2 ± 0,3
3	29,5 ± 0,2	53 ± 4	50,3 ± 0,2	18 ± 2	5,4 ± 0,3
4	26,7 ± 0,2	57 ± 4	50,5 ± 0,3	16 ± 1	5,0 ± 0,3
5	27,0 ± 0,4	48 ± 4	60,6 ± 0,2	9 ± 1	3,4 ± 0,3
6	26,8 ± 0,2	44 ± 4	60,2 ± 0,7	7 ± 1	3,0 ± 0,2

Fonte: Próprio autor.

A comparação da razão de umidade de acordo com a velocidade de entrada dos experimentos está apresentada na Figura 44. Novamente não existe diferença significativa nas curvas de secagem devido a variação das velocidades testadas no experimento. A única temperatura que apresentou uma diferença um pouco mais aparente foi a de 50°C, na qual a velocidade de 0,8ms⁻¹ atingiu uma razão de umidade aproximadamente 5% menor que a de 1,3ms⁻¹. Essa ausência de variação devido a variação de velocidade está ligada a ordem de grandeza da velocidade utilizada nos experimentos deste trabalho. Em seu estudo Bortolaia (2011), verificou a influência da velocidade na dinâmica de secagem da soja em camada fina, nele foi realizado testes com velocidades de 0ms⁻¹ até 2,5ms⁻¹. Nas curvas obtidas pelo autor foi concluído que o aumento da velocidade do ar de secagem para valores de 0 a 0,9ms⁻¹ acarretaram uma aceleração no processo de secagem, o que comprova o papel essencial da transferência de massa na periferia do grão realizado pela velocidade principalmente nos períodos iniciais da secagem. Por outro lado, nos aumentos posteriores de velocidade, quase não foi observada intensificação do processo de secagem, fato que o autor confere ao aumento do papel da difusão de umidade dentro dos grãos, gerado pelo decréscimo do teor de umidade dos grãos durante a secagem. O que acaba reduzindo a influência da velocidade dentro do processo. Dessa forma, o autor não obteve diferença significativa entre as velocidades de 0,9;1,5 e 2,5ms⁻¹.

Figura 44 - Razão de umidade pelo tempo de acordo com a velocidade de entrada dos experimentos.

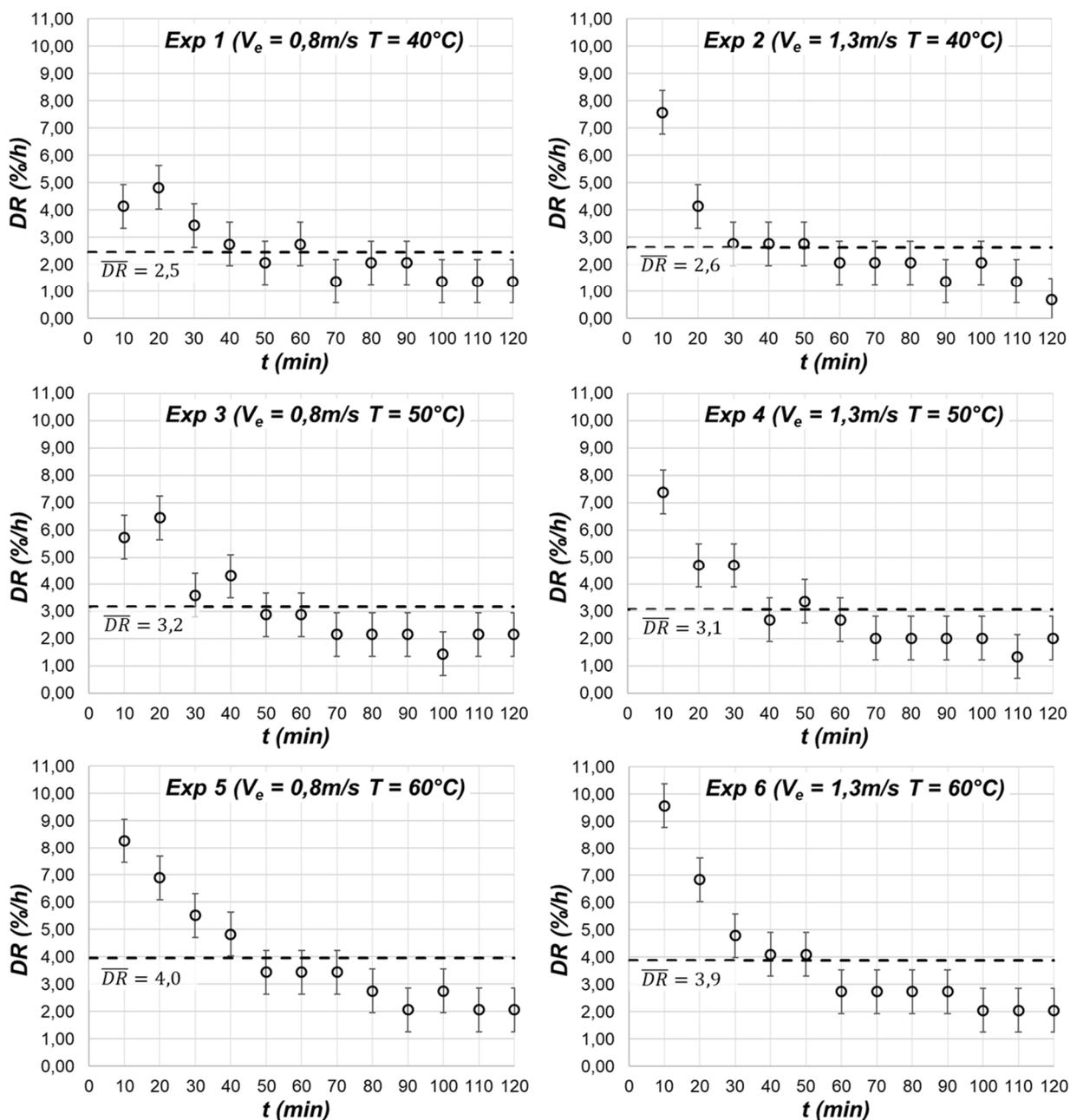


Fonte: Próprio autor.

Assim, o experimento realizado neste trabalho por se tratar de velocidades dentro dessa faixa também obtiveram variação irrelevantes no ponto de vista de dinâmica de secagem, fato também conferido pelo predomínio da influência da difusão de umidade no interior dos grãos. Outros valores de velocidade menores não foram testados nesse trabalho tanto pela falta de capacidade de medição do instrumento utilizado, que apresenta um erro de aproximadamente $0,2\text{ms}^{-1}$ e, portanto, não seria adequado para medições de velocidades muito baixas, quanto também pela dificuldade de manter de forma estável velocidades muito reduzidas no equipamento desenvolvido.

Outro parâmetro de secagem analisado nos experimentos foi a taxa de secagem, que diz sobre a percentagem de umidade dos grãos em base seca, a serem retiradas em uma hora caso essa taxa se mantenha durante esse tempo. Dessa forma, a Figura 45 apresenta os valores de taxa de secagem de 10 em 10 minutos para cada experimento realizado.

Figura 45 – Taxa de secagem dos experimentos com incerteza e probabilidade de enquadramento de 95%.



Fonte: Próprio autor.

De uma forma geral, todos os experimentos apresentaram um comportamento de pico de taxa no início do experimento e uma tendência de redução à medida que o tempo de experimento avança, o que é compreensível porque a medida que a umidade deixa os grãos, fica cada vez mais difícil remover essa umidade, uma vez que a diferença entre o teor de umidade do grão e o teor de umidade de equilíbrio se torna cada vez menor.

A taxa de secagem novamente reafirma a importância da temperatura no processo de secagem. Avaliando o valor médio da taxa para cada experimento, indicado nos gráficos pelas linhas tracejadas, fica claro que a temperatura é diretamente proporcional a taxa, o que era esperado dado os resultados da razão de umidade e da umidade média do leito de grãos. Além disso, para uma mesma velocidade o aumento da temperatura, ocasiona um deslocamento do pico de taxa para a esquerda do gráfico, ou seja, maiores temperaturas diminuem o tempo para atingir o valor máximo da taxa de secagem do experimento.

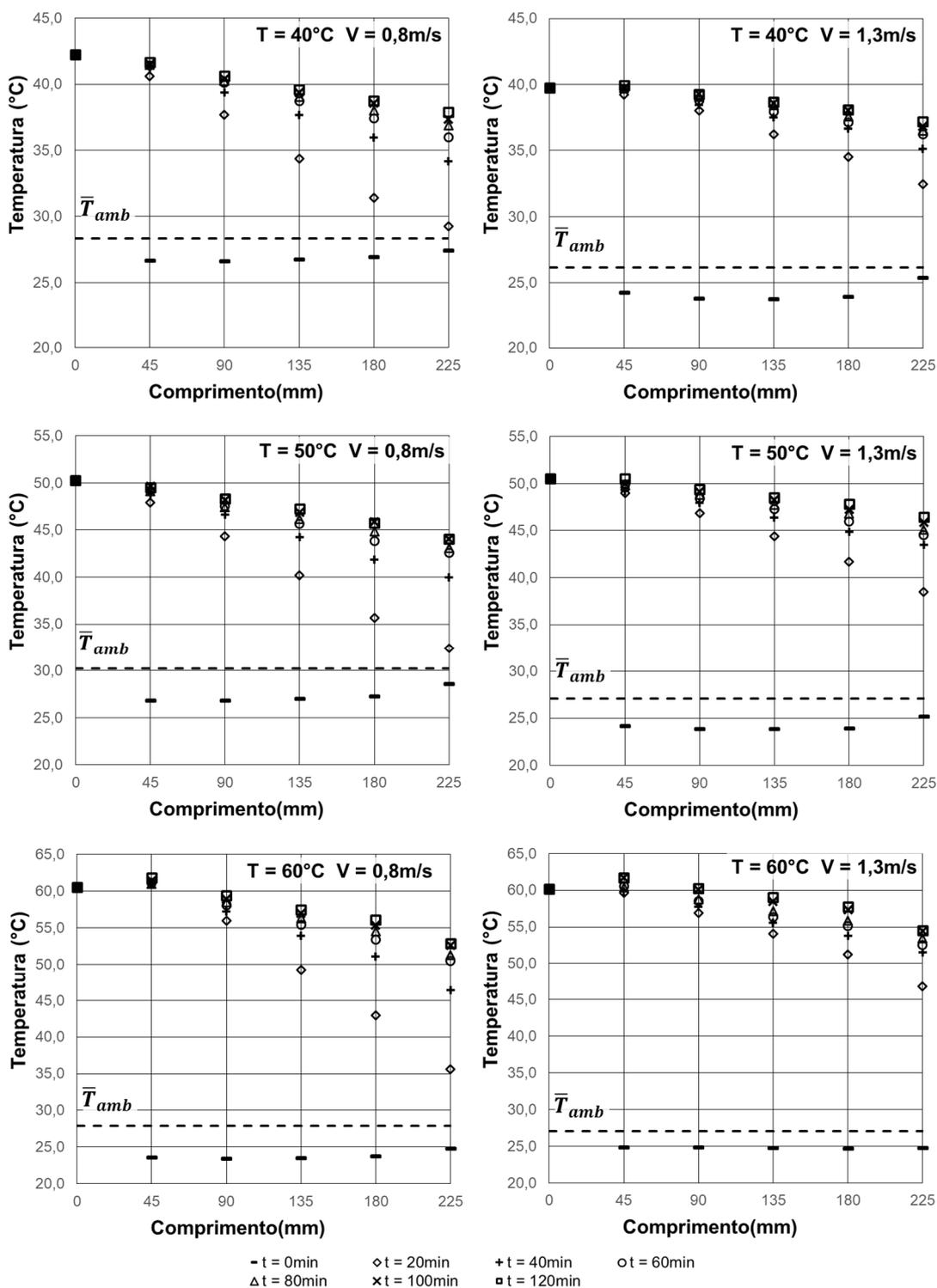
Por outro lado, a velocidade do ar de entrada, apesar de não ter uma influência relevante no valor médio da taxa, influência nos valores instantâneos da mesma. Nos gráficos da Figura 45, é possível ver que para uma mesma temperatura o aumento da velocidade, ocasiona um aumento do valor nominal do pico de taxa, além de deslocar esse pico para tempos menores de experimento. Dessa forma, ligando a influência da temperatura e da velocidade nesse fenômeno é possível concluir que o valor da taxa tem uma relação com a velocidade com que o leito ganha temperatura, o que é muito relacionado a variação do valor do teor de umidade de equilíbrio já discutida.

Assim, quanto mais rápido é o ganho de temperatura do leito, mais cedo ocorrerá o pico da taxa de secagem, porque quanto maior a temperatura do grão menor será o teor de umidade de equilíbrio e maior será a variação de pressão que resulta na retirada de umidade do grão. De uma maneira geral, quanto mais energia estiver disponível para realizar o aquecimento do grão e a sua evaporação de umidade, maior será a taxa de secagem. Por isso para velocidades maiores os picos são maiores. Entretanto, como à medida que o teor de umidade dos grãos diminui a dificuldade de retirar essa umidade aumenta, da mesma forma que os picos aparecem mais cedo, a queda da taxa também ocorre mais cedo, o que faz com que a média não seja influenciada pelo crescimento da velocidade.

Outro fator em que a velocidade de entrada influencia na secagem, e que já foi comentado anteriormente, é a temperatura do leito de grãos. Na Figura 46, estão as temperaturas do leito em seu comprimento para alguns tempos dos experimentos. O leito possui 200mm de comprimento no total, sendo que as posições 0 e 225mm são referentes aos termopares 1 e 6 indicados na metodologia, e representam a temperatura do ar de entrada e de saída respectivamente. As demais posições de 45 a 180mm são temperaturas medidas pelos termopares de 2 a 5 da metodologia, e

correspondem as temperaturas do leito de grãos. Assim, existem quatro pontos de medição dentro do leito de grãos e foi através da média desses pontos que foi obtida a temperatura média do leito de grãos durante os experimentos.

Figura 46 – Temperatura do leito de grãos pelo tempo de experimento.



Fonte: Próprio autor.

De maneira geral a temperatura de entrada, para uma mesma velocidade, causou um achatamento nas curvas inversamente proporcional a temperatura, ou seja, quanto maior a temperatura maior a diferença de temperatura entre as extremidades do leito. Por outro lado, a velocidade de entrada, para uma mesma temperatura, teve um efeito de achatamento diretamente proporcional a velocidade, ou seja, quanto maior a velocidade menor a diferença de temperatura entre as extremidades do leito. Ambos esses efeitos estão evidenciados na Tabela 16, nela estão apresentadas as diferenças de temperatura entre as extremidades do leito, representados pelo ponto mais próximo a entrada (45mm) e o ponto mais próximo à saída (180mm) dentro do leito de grãos. Essas diferenças de temperatura estão apresentadas em dois tempos, um o mais próximo do início do experimento (20min) e o outro ao fim do experimento (120min).

Tabela 16 – Diferença de temperatura entre as extremidades do leito de grãos para 20 e 120 minutos para cada experimento.

Exp.	\bar{T}_e (°C)	\bar{V}_e (ms ⁻¹)	$\Delta T_{180-45mm,20min}$ (°C)	$\Delta T_{180-45mm,120min}$ (°C)
1	42,3 ± 0,2	0,8 ± 0,2	9,2	2,9
2	39,8 ± 0,3	1,3 ± 0,2	4,7	1,8
3	50,3 ± 0,2	0,9 ± 0,2	12,3	3,8
4	50,5 ± 0,3	1,3 ± 0,2	7,2	2,7
5	60,6 ± 0,2	0,8 ± 0,2	18,2	5,7
6	60,2 ± 0,7	1,3 ± 0,2	8,4	4,0

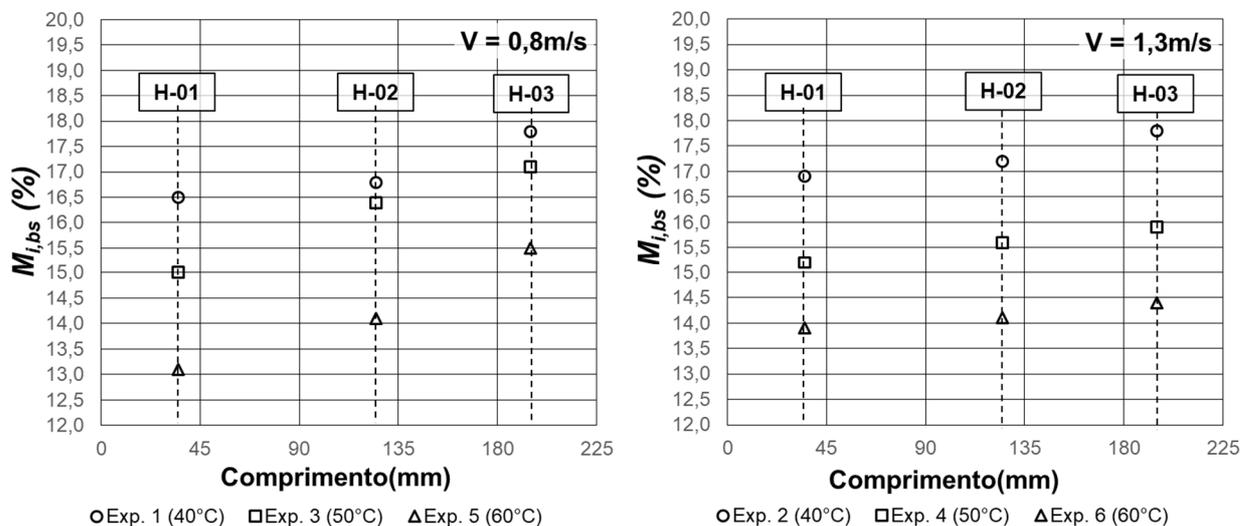
Fonte: Próprio autor.

Do ponto de vista da temperatura, seu comportamento inversamente proporcional ao achatamento da curva, ou seja, diretamente proporcional ao gradiente de temperatura do leito para uma mesma velocidade, está ligado ao fato de que as maiores temperaturas trocam mais calor com o milho de entrada, devido a maior diferença de temperatura. Assim, a energia utilizada para o aquecimento dos grãos tende a ser consumida mais rapidamente criando um maior gradiente de temperatura, mas ao mesmo tempo uma redução no tempo de aquecimento do leito.

Quanto a velocidade, seu efeito para a mesma temperatura, está ligado a maior vazão mássica, que representa mais energia disponível para realizar o aquecimento do milho para uma mesma diferença de temperatura. Assim, sobra mais energia para aquecer outras regiões do leito, o que acaba gerando uma redução do gradiente e consequentemente um achatamento das curvas de temperatura do leito.

Por fim também foi analisada o teor de umidade final dos grãos em três profundidades do leito, as amostras recolhidas ao final dos experimentos foram retiradas da superfície do leito, da região próxima abaixo da altura do termopar 4 (135mm), e próximo abaixo da altura do termopar 2 (45mm). Essas três alturas foram identificadas como H-03 referente ao topo do leito (região de 190 a 180mm), H-02 referente ao meio do leito (região de 130 a 120mm) e H-01 referente a base do leito (região de 40 a 30mm), os resultados dos testes de estufa realizado nessas amostras estão detalhados no APÊNDICE G. O gradiente de umidade no leito de grãos ao final do experimento está apresentado na Figura 47. Além disso, as regiões pontuais apresentadas no gráfico corresponde ao centro da região da qual foram retiradas as amostras de milho, pois, uma vez que o teste de teor de umidade realizado em estufa necessita de uma certa quantidade de milho, essa medida acaba sendo realizada em uma região do leito correspondente ao volume das bandejas utilizadas na estufa.

Figura 47 – Umidade final do leito em estufa, com a profundidade para cada experimento.



Fonte: Próprio autor.

Como pode ser observado, novamente o aumento da temperatura para uma mesma velocidade, causa a elevação do gradiente de umidade no leito. Ao passo que o aumento de velocidade, para a mesma temperatura, causa uma redução desse gradiente, o que evidencia que a velocidade minimiza do efeito de camada, garantindo que o ar que absorveu a umidade dos grãos seja substituído por uma nova porção de

ar com maior capacidade de absorção de umidade. Dessa forma, o comportamento apresentado é semelhante ao encontrado na temperatura do leito em cada comprimento, demonstrando que existe uma relação entre a temperatura atingida pelos grãos com o seu teor de umidade final. Um provável motivo para essa relação é o valor do teor de umidade de equilíbrio, muito ligado a temperatura e a capacidade de absorção de umidade do ar de entrada. Assim, à medida que o tempo passar a tendência é que o teor de umidade do grão se aproxime cada vez mais do teor de umidade de equilíbrio, até o ponto em que esse teor de umidade é atingido e não há mais variação.

Os valores da variação do teor de umidade entre os extremos do leito, correspondendo a diferença entre o teor de umidade de H-01 e H-03, estão apresentados na Tabela 17, em que também estão apresentados o erro percentual encontrado entre a medida do teor de umidade médio final do leito de grãos realizada durante os experimentos pelo processo de pesagem do leito, e a média do teor de umidade dos grãos amostrados em três alturas do leito ao final do experimento, sendo essa medição do teor de umidade realizada pelo processo em estufa conforme descrito na metodologia. Essa comparação teve como objetivo validar o processo de obtenção do teor de umidade do leito pelo processo de pesagem.

Tabela 17 – Variação do teor de umidade entre os extremos do leito e erro entre o teor de umidade médio final do leito e a média do teor de umidade final realizada em estufa.

Exp.	$M_{H-01}(\%)$	$M_{H-02}(\%)$	$M_{H-03}(\%)$	$\Delta M_{Ext}(\%)$	$\bar{M}_{H,l}(\%)$	$M_{f,l,bs}(\%)$	Erro M (%)
1	16,5 ± 0,5	16,8 ± 0,5	17,8 ± 0,5	1,3	17,0 ± 0,5	17,0 ± 0,1	0,1
2	16,9 ± 0,5	17,2 ± 0,5	17,8 ± 0,5	0,9	17,3 ± 0,5	17,3 ± 0,1	0,2
3	15 ± 0,5	16,4 ± 0,5	17,1 ± 0,5	2,1	16,2 ± 0,5	15,6 ± 0,1	3,4
4	15,2 ± 0,5	15,6 ± 0,5	15,9 ± 0,5	0,7	15,6 ± 0,5	15,9 ± 0,1	2,4
5	13,1 ± 0,5	14,1 ± 0,5	15,5 ± 0,5	2,4	14,2 ± 0,5	14,6 ± 0,1	2,7
6	13,9 ± 0,5	14,1 ± 0,5	14,4 ± 0,5	0,5	14,1 ± 0,5	14,4 ± 0,1	1,6

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 17, pode-se reavaliar o que foi observado na Figura 47 através da variação do teor de umidade dos grãos entre as extremidades do leito. Assim, os valores demonstram que a impressão retirada pelo gráfico de que, para uma mesma velocidade, a temperatura de entrada é diretamente proporcional ao gradiente do teor de umidade do leito, é válida apenas para a condição de menor velocidade. A condição de maior velocidade por sua vez acabou tendo o comportamento oposto ao discutido, fato esse, que pode estar relacionado a incerteza de medição. Como a incerteza da medição do teste do teor de umidade em estufa está ligado a relação entre a incerteza da balança e a massa de milho utilizada no teste, os testes do teor de umidade com a profundidade tiveram uma massa inferior as utilizadas para a amostra inicial, uma vez que a quantidade de milho disponível para o teste é limitada nas amostras de profundidade. Assim, com erros de 0,5% em base seca, o fato de a velocidade ter diminuído o gradiente de umidade no leito causou um problema de proximidade entre os valores, uma vez que quando avaliam-se os limites superiores e inferiores de cada caso conclui-se que não se pode afirmar que existe diferença entre os valores encontrados. Dessa forma, a conclusão de que para velocidades maiores existe uma mudança de comportamento de proporcionalidade entre a temperatura de entrada e o gradiente do teor de umidade dos grãos não pode ser afirmada.

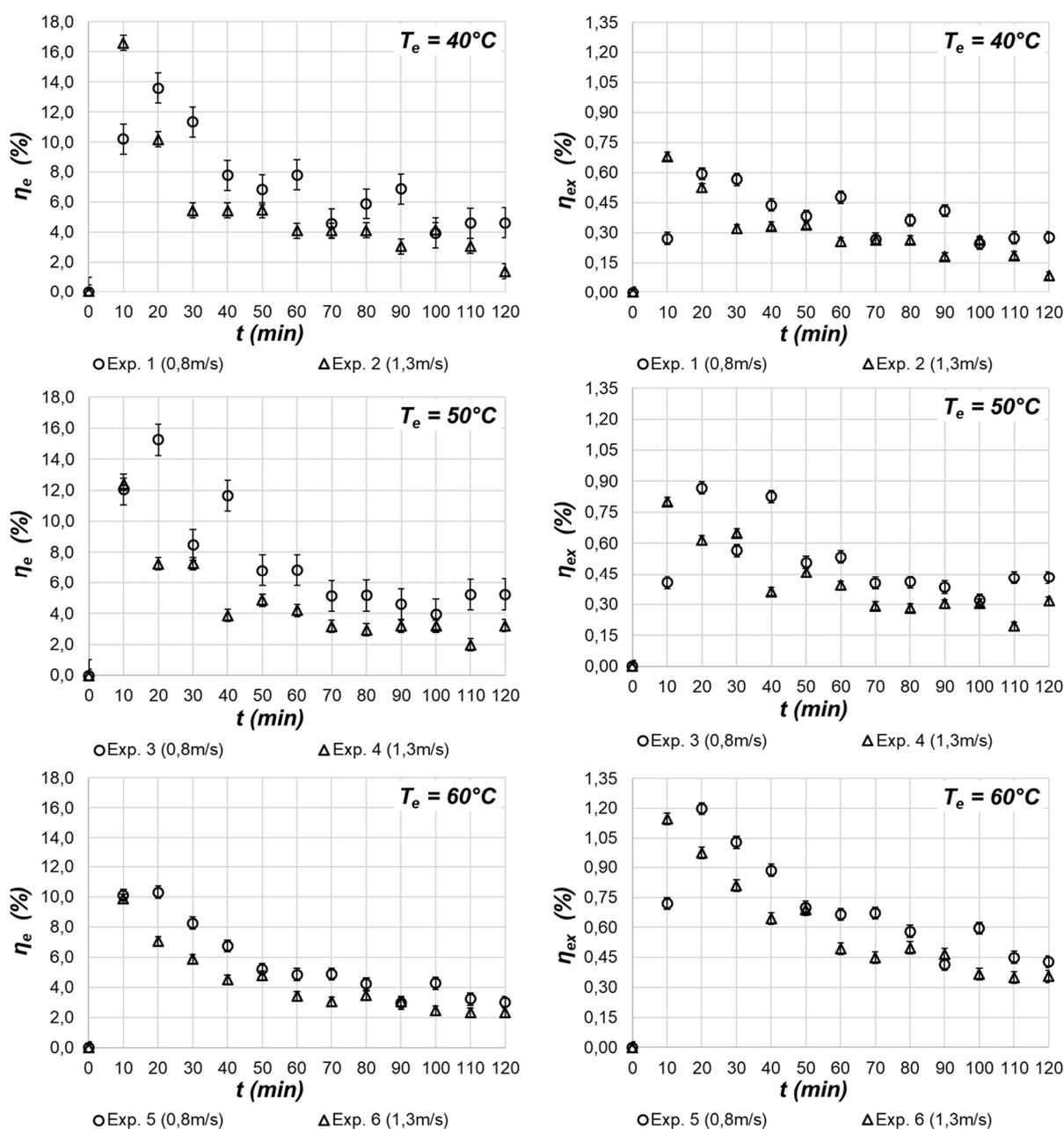
Por outro lado, a avaliação realizada anteriormente sobre as temperaturas de entrada e as temperaturas do leito podem ser feitas porque a incerteza das temperaturas ligadas aos termopares não causa o mesmo problema de comparação encontrado no teor de umidade. Por fim, pode-se concluir que para medição do teor de umidade final de amostras com massa limitada é mais interessante o uso de balanças com uma maior precisão de medida, a fim de minimizar a incerteza e garantir a possibilidade de afirmação de comportamentos observados nos valores experimentais coletados.

Quanto a comparação entre o teor de umidade medida pelo peso do leito e a média do teor de umidade das amostras coletadas com a profundidade e medidas por teste em estufa, o erro percentual máximo encontrado foi de apenas 3,4%, fato que poderia ser reduzido ainda mais com a utilização de uma balança com maior precisão. Entretanto esse resultado já é suficiente para demonstrar a conformidade da utilização da técnica descrita na metodologia desse trabalho, na definição do teor de umidade médio do leito de grãos durante a secagem.

4.3. Análise Energética e Exergética

Além dos resultados sobre a dinâmica de secagem, também foram realizadas as análises energética e exergética de secagem dos experimentos. Na Figura 48, é apresentado o efeito da velocidade de entrada nas eficiências dos experimentos realizados.

Figura 48 – Efeito da velocidade na eficiência energética e exergética de secagem dos experimentos realizados.



Fonte: Próprio autor.

Como pode ser observado comparando os valores encontrados de eficiência energética de secagem com os de eficiência exergética de secagem, tem-se que os valores de eficiência energética, são sempre maiores que os da eficiência exergética, da mesma forma como é encontrado no trabalho de Amantéa *et al.* (2013) e Tolentino (2018). Além disso, no início da secagem há um rápido crescimento das eficiências energéticas e exergéticas devido as elevadas taxas de secagem do período, que são resultado da evaporação da umidade superficial dos grãos, que possui uma facilidade maior para ser removida. Assim, após atingirem o ápice as curvas passam a ter uma tendência decrescente devido à queda da taxa de secagem, resultante do fim da umidade superficial e início da remoção da umidade intersticial, que depende do gradiente de pressão osmótica entre as partes internas e externas do grão. Portanto, à medida que o teor de umidade dos grãos reduz, a diferença de pressão também reduz, ocasionando essa tendência de queda na eficiência até o fim do experimento. Além disso, a não utilização da energia para remoção de umidade provoca uma maior exaustão de ar de entrada com grande potencial energético, o que contribui ainda mais para a redução da eficiência do processo. Esse comportamento também é demonstrado nos trabalhos de Amantéa *et al.* (2013), Ranjbaran *et al.* (2014) e Tolentino (2018).

Observando esse aspecto crescente no início da secagem, chegando em um pico e depois tornando-se decrescente, tem-se que o aspectos das curvas de eficiência encontradas possuem semelhança as curvas da taxa de secagem já apresentadas, o que é esperado, visto que as eficiências de secagem estão ligadas a quantidade de energia utilizada para retirar umidade dos grãos, assim como a taxa de secagem é ligada a quantidade de umidade retirada, existe uma relação entre a energia e taxa encontrada. Nas eficiências assim como na taxa, novamente a velocidade contribui para o deslocamento do pico para a esquerda, ou seja, um aumento de velocidade faz com que a máxima eficiência seja atingida em tempos menores, tanto para a eficiência energética de secagem, quanto para a eficiência exergética de secagem. Outro fator análogo é que assim como a taxa, o aumento da velocidade também provoca uma queda mais rápida do valor da eficiência energética de secagem.

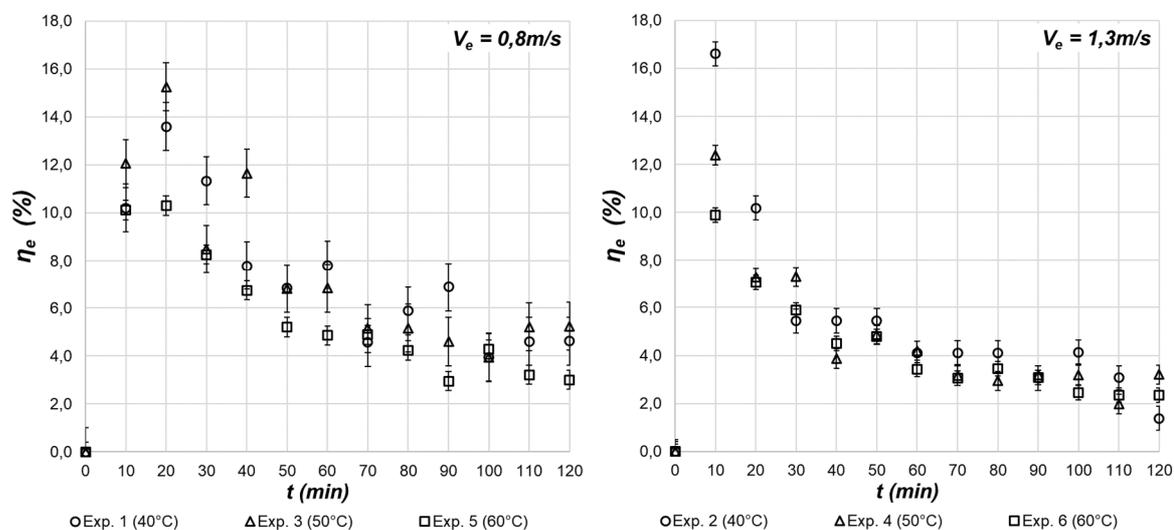
Por outro lado, ao contrário da taxa de secagem que possui sempre um valor maior de pico para a velocidade mais alta, considerando a mesma temperatura. Nas

eficiências, ocorre o contrário, as velocidades mais altas geram picos menores, porque mais energia é perdida na massa de ar que sai do secador, assim, os picos de taxa não conseguem vencer a perda de energia por exaustão. Dessa forma, maiores valores de velocidade de entrada fazem com que os grãos tenham um tempo reduzido para consumir a energia contida no ar de secagem e evaporar a umidade, dessa forma, uma maior quantidade de entalpia do ar de entrada sai do secador sem ser aproveitada, diminuindo as eficiências.

Um detalhe importante, também observado no comportamento da taxa de secagem, é que a diferença entre os picos de velocidade para a mesma temperatura, tende a ser menor que as curvas de temperaturas maiores. Ou seja, se avaliando-se o gráfico das eficiências percebe-se que para a temperatura de 40°C ocorre uma inversão do comportamento descrito anteriormente, de que os picos de eficiência são menores para velocidades maiores. Observando esse fato e o detalhe sobre a taxa, percebe-se que, nesse caso, a influência do aumento da taxa foi mais significativa do que a perda de energia pelo ganho de velocidade, o que faz sentido porque para menores temperaturas, além da perda de energia ser menor, o aumento na taxa é maior, dessa forma a velocidade acaba tendo um pico maior de eficiência energética para o caso que compara os experimentos 1 e 2.

Assim, de uma forma geral, pode-se dizer que as eficiências são um balanço da taxa de secagem e da quantidade de energia necessária para manter a temperatura de entrada, e, portanto, diretamente ligada a quantidade de energia desperdiçada no ar de secagem que sai ainda com energia do secador. Na Figura 49 o efeito da temperatura na eficiência energética de secagem dos experimentos realizados está apresentado. Da mesma forma, que ocorreu na comparação entre as velocidades para uma mesma temperatura, a eficiência energética de secagem para temperaturas diferentes em uma mesma velocidade também apresenta influência das perdas térmicas do equipamento, seja das resistências elétricas com o ar, ou mesmo das perdas da tubulação do secador. Assim a influência da temperatura nos experimentos foi diferente dependendo da velocidade de entrada. No caso da velocidade mais alta, quanto maior a temperatura menor a eficiência, o que é ligado ao fato da maior perda de energia pela exaustão de gases ainda com capacidade energética alta, além das perdas térmicas do equipamento.

Figura 49 – Efeito da temperatura na eficiência energética de secagem dos experimentos realizados.



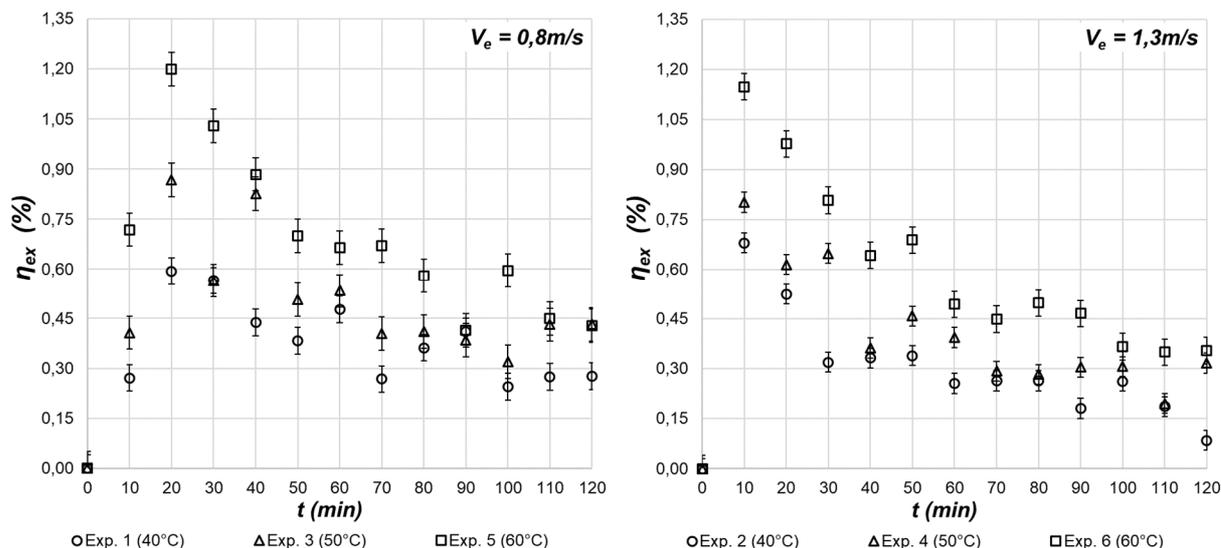
Fonte: Próprio autor.

Por outro lado, na velocidade menor, a maior eficiência ocorreu para a temperatura de 50°C, assim a eficiência é resultado de um balanço entre as perdas por exaustão, as perdas do equipamento e os ganhos na taxa de secagem obtidos com o ganho de temperatura, dessa forma, essa temperatura obteve o melhor balanço entre esses fatores, o que a conferiu a maior eficiência para o equipamento desenvolvido nesse trabalho. Dessa forma, esse fato está relacionado as condições de funcionamento do equipamento de secagem utilizado e não apenas ao processo de secagem, isso ocorre porque no cálculo das eficiências, é utilizado o consumo total do secador medido no wattímetro, assim existe uma influência da eficiência térmica sobre o resultado tanto da eficiência energética de secagem quanto exergética. Dessa forma, todas as perdas envolvidas no processo devido as condições operacionais do secador estão presentes nos valores das eficiências, o que quer dizer que as conclusões sobre eficiência energética desse trabalho são ligadas tanto ao equipamento utilizado, quando ao processo de secagem em si. Portanto, é importante salientar que esse resultado encontrado não é geral do processo de secagem uma vez que foi a influência do equipamento que conferiu esse padrão de comportamento.

Quanto a eficiência exergética de secagem, os efeitos da temperatura para uma mesma velocidade estão apresentados na Figura 50. Ao contrário da eficiência energética real, a eficiência exergética de secagem obteve um comportamento

semelhante para ambas as velocidades, assim, para uma mesma velocidade o aumento da temperatura significa aumento da eficiência exergética de secagem.

Figura 50 - Efeito da temperatura na eficiência exergética de secagem dos experimentos realizados.



Fonte: Próprio autor.

Esse aumento devido a maiores temperaturas de entrada, se deve principalmente ao termo de Carnot $\left(1 - \frac{T_{00}}{T_l}\right)$ que faz parte da equação da exergia de secagem presente na Equação (27). Assim, o aumento da temperatura de entrada, aumenta a temperatura média do leito, dessa forma, como a temperatura do estado morto é a temperatura ambiente que possui uma variação máxima de 6,5°C para os experimentos realizados, sendo o valor máximo utilizado igual a 31,2°C e mínimo de 24,6°C. O aumento da temperatura de entrada faz com que a fração da equação fique cada vez menor e o termo de Carnot cada vez maior, o que eleva a eficiência exergética. Este comportamento também foi observado por Amantéa *et al.* (2013), Ranjabaren e Zare (2013), Ranjbaran *et al.* (2014) e Tolentino (2018).

Além disso, segundo Amantéa *et al.* (2013), quanto mais alto o valor da eficiência exergética mais adequadas são as condições aplicadas ao trabalho realizado e mais exergia estará disponível na saída do secador, o que significa, que essa exergia poderia ser utilizada para outros usos, como por exemplo a recirculação de ar.

Ainda avaliando os resultados das eficiências energéticas e exergéticas tem-se a Tabela 18 que apresenta os valores médios e de pico para as eficiências de cada experimento. Iniciando pela avaliação da eficiência energética, o maior pico ocorreu no experimento 2 seguido pelo experimento 3 e depois o 1, sendo que todos os picos dos experimentos com a velocidade de entrada mais baixa ocorreram no tempo de 20 minutos e os dos experimentos com a velocidade mais alta com 10 minutos. Avaliando as médias, tem-se que para os 120 minutos de experimento a média mais alta ocorreu no experimento 3 seguido pelo experimento 1 e depois o 5. De maneira geral, para a eficiência energética, tem-se que o aumento da taxa de secagem devido à elevação da velocidade não necessariamente é capaz de elevar a eficiência energética do processo, devido ao aumento das perdas de energia tanto pela exaustão, quanto pela eficiência térmica do secador, assim com exceção da temperatura de 40°C, que é a menor testada, todas as demais temperaturas sofreram redução tanto do pico quanto da média devido ao aumento da temperatura.

Tabela 18 – Valores de eficiência energética e exergética de pico e média para os experimentos com incerteza e probabilidade de enquadramento de 95%.

Exp.	\bar{T}_e (°C)	\bar{V}_e (ms ⁻¹)	η_e (%)		η_{ex} (%)	
			<i>Pico</i>	<i>Média</i>	<i>Pico</i>	<i>Média</i>
1	42,3 ± 0,2	0,8 ± 0,2	14 ± 1	7 ± 1	0,59 ± 0,04	0,38 ± 0,04
2	39,8 ± 0,3	1,3 ± 0,2	16,6 ± 0,5	5,6 ± 0,5	0,68 ± 0,05	0,31 ± 0,05
3	50,3 ± 0,2	0,9 ± 0,2	15 ± 1	8 ± 1	0,87 ± 0,05	0,51 ± 0,05
4	50,5 ± 0,3	1,3 ± 0,2	12,4 ± 0,4	4,8 ± 0,4	0,80 ± 0,03	0,41 ± 0,03
5	60,6 ± 0,2	0,8 ± 0,2	10,3 ± 0,4	5,7 ± 0,4	1,20 ± 0,04	0,69 ± 0,04
6	60,2 ± 0,7	1,3 ± 0,2	9,9 ± 0,3	4,4 ± 0,3	1,15 ± 0,04	0,60 ± 0,04

Fonte: Próprio autor.

Do ponto de vista da eficiência exergética, tem-se que o range de velocidade testado é inversamente proporcional tanto do pico quanto da média de seus valores, para uma mesma temperatura, com exceção do pico da temperatura de 40°C, que apresentou o comportamento contrário demonstrando, porque conforme dito anteriormente nesse caso, a influência do aumento da taxa foi mais significativa do que a perda de exergia de exaustão pelo ganho de velocidade. Assim os maiores valores de médias ocorreram para os experimentos com a menor velocidade e mais alta temperatura, portanto o experimento 5 foi o que obteve os valores mais altos, seguido pelo 3 e depois o 1. Quanto aos maiores valores de pico o comportamento é

semelhante com exceção do caso da temperatura mais baixa, assim o experimento 5 obteve os valores mais altos, seguido pelo 3 e depois o 2.

Analisando os resultados tem-se que devido as perdas do equipamento envolvidas, os resultados obtidos das eficiências, com destaque para a eficiência energética, dialogam diretamente com o próprio secador desenvolvido e não apenas com o processo de secagem como um todo. De tal modo, que a fim de realizar uma comparação do comportamento da eficiência encontrada aos resultados teóricos normalmente obtidos nas simulações, também foi estudada a eficiência energética de secagem teóricas, que desprezam as perdas envolvidas no secador de forma a possibilitar uma melhor visualização do processo de secagem dentro dos resultados da eficiência.

No cálculo dessa eficiência foi considerado apenas a energia de entrada, logo, a eficiência será o resultado da energia utilizada para retirar umidade dos grãos dividida pela energia necessária para aquecer o ar da temperatura ambiente até a condição de entrada. Assim, através da Equação (35) e a Equação (36) é possível calcular a eficiência energética de secagem teórica.

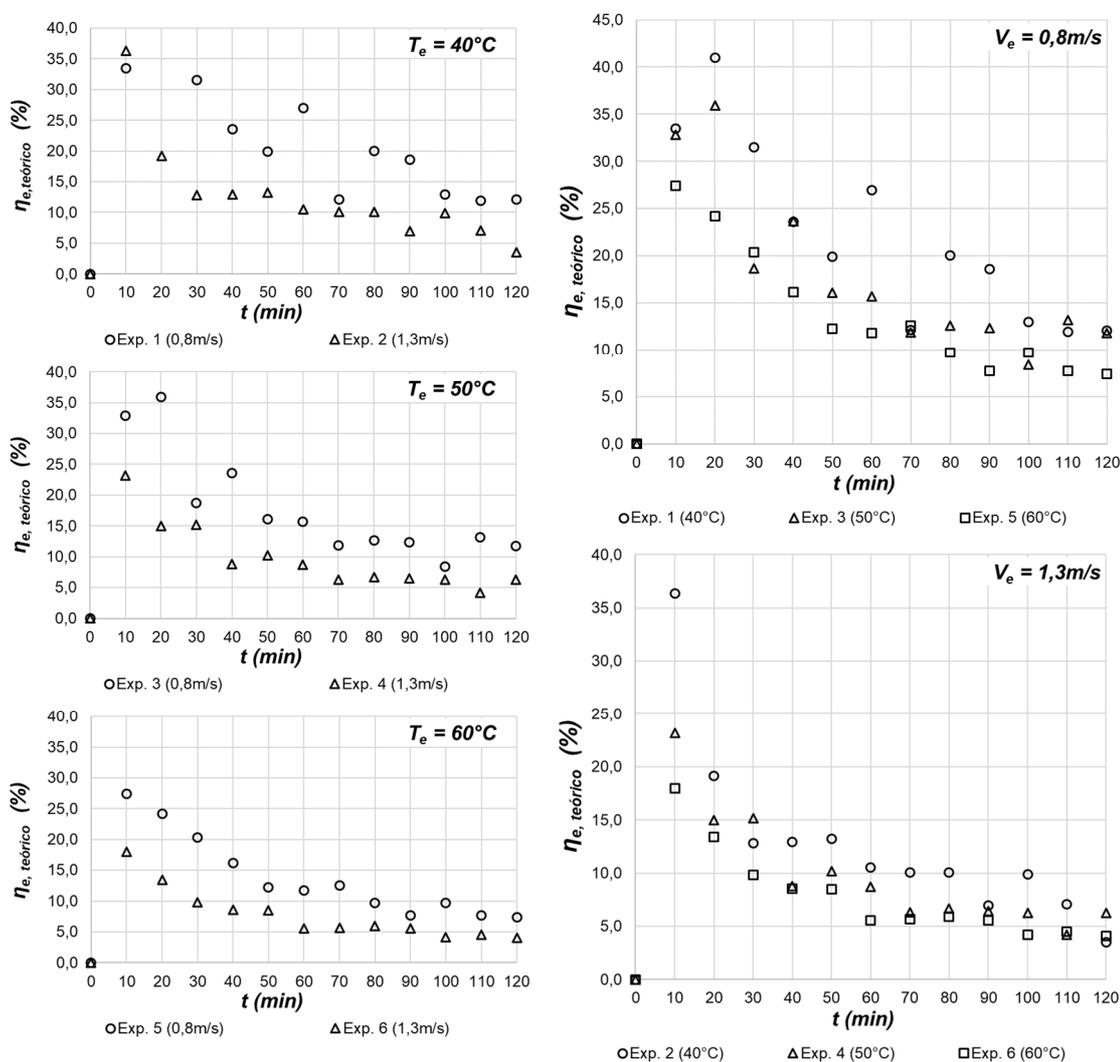
$$\eta_{e,teórico} = \frac{E_V}{E_e} \quad (35)$$

$$E_e = m_a(h_e - h_{amb}) \quad (36)$$

Onde, $\eta_{e,teórico}$ é a eficiência energética de secagem teórica, E_V é a energia de vaporização da umidade dos grãos, E_e é a energia de entrada que corresponde a energia necessária para aquecer o ar da temperatura ambiente até a temperatura de entrada do secador, m_a é a massa de ar que ganhou temperatura, h_e é a entalpia do ar na condição de entrada, h_{amb} é a entalpia do ar ambiente.

Assim, na Figura 51 estão apresentados os efeitos da velocidade de entrada e da temperatura, na eficiência energética de secagem teórica calculada conforme descrito anteriormente. Dessa forma, tem-se uma eficiência energética que independe das perdas que são específicas do secador desenvolvido e destarte mais ligadas apenas ao processo de secagem.

Figura 51 - Efeito da velocidade e da temperatura na eficiência energética teórica de secagem dos experimentos realizados.



Fonte: Próprio autor.

Os comportamentos encontrados na Figura 51 dialogam de forma mais clara com os resultados encontrados nos trabalhos de Amantéa *et al.* (2013) e Tolentino (2018), tanto do ponto de vista do comportamento ligado a variação de parâmetros de entrada, quanto do ponto de vista de valores. Do ponto de vista de comportamento, na eficiência energética teórica, quanto maior a temperatura menor a eficiência para uma mesma velocidade de entrada. Além disso, para uma mesma temperatura, quanto maior a velocidade menor a eficiência energética, isso tudo porque para ambos os casos o ganho na taxa de secagem não é suficiente para reduzir as perdas devido à exaustão de ar ainda com capacidade de aproveitamento. Assim, a eficiência energética teórica não apresentou nenhum caso de divergência com esses

enunciados como ocorrido no caso da eficiência energética que utilizou os valores do wattímetro como entrada em seu cálculo.

Essa diferença entre a eficiência calculada inicialmente e a teórica se deve as condições específicas do equipamento utilizado nos experimentos, dessa forma, observando a eficiência térmica do secador, pode-se compreender melhor como funcionam essas influências. A eficiência térmica diz respeito a quanto da energia elétrica utilizada realmente provoca aquecimento do ar de secagem e quanto dessa energia é perdida, assim seu valor é calculada através da energia total consumida pelo secador obtida pela leitura do wattímetro (E_T) e a energia necessária para aquecer o ar ambiente até a temperatura de entrada (E_e) conforme a Equação (37).

$$\eta_{térmica} = \frac{E_e}{E_T} \quad (37)$$

Na Tabela 19 estão os valores das eficiências energéticas de secagem médias teórica e real, bem como a eficiência térmica média do secador para cada um dos experimentos. Além disso, é mostrado o produto entre as eficiências térmicas médias do secador e as eficiências de secagem teóricas, a fim de demonstrar como esses valores se aproximam com os encontrados para a eficiência energética de secagem real.

Tabela 19 – Eficiências médias de secagem teórica e real, eficiências térmicas médias do secador e produto das eficiências teórica e térmica.

Exp.	$\bar{\eta}_e$ (%)	$\bar{\eta}_{e,teórico}$ (%)	$\bar{\eta}_{térmica}$ (%)	$\bar{\eta}_{e,teórico} \cdot \bar{\eta}_{térmica}$ (%)
1	7	22	34	7
2	5,6	13	42	5,3
3	8	18	43	8
4	4,8	10	49	4,7
5	5,7	14	41	5,9
6	4,4	8	56	4,4

Fonte: Próprio autor.

Conforme apresentado a eficiência energética de secagem real é praticamente o resultado do produto da eficiência de secagem teórica e a eficiência térmica do

secador. Isso deixa aberta a possibilidade de propor um estudo de eficiência em secadores de grande porte, que utilize os resultados teóricos de simulações computacionais para propor resultados mais próximos da eficiência real de dado equipamento, através do estudo experimental da eficiência térmica do secador a ser utilizado. Assim, como o estudo da eficiência térmica é muito mais simples que o estudo de secagem, uma vez que pode ser realizado por menos tempo e sem produto, desde que seja possível manter as condições de entrada a serem testadas na simulação.

Além disso, na Tabela 19 fica claro a causa das divergências de valores ocorridos na eficiência energética de secagem real. A eficiência térmica do secador deste trabalho tem uma tendência a ser maior quanto maior a velocidade de entrada, o que está ligado a melhoria do coeficiente de convecção na área das resistências elétricas. Assim, quanto maior a velocidade melhor ocorre a troca de calor das resistências com o ar de entrada, o que eleva a eficiência do processo de aquecimento do ar. Quanto a temperatura, para a velocidade mais baixa a temperatura de 50°C obteve a melhor eficiência térmica, e para a velocidade mais alta quanto maior a temperatura maior a eficiência térmica. Assim, a eficiência energética de secagem real acaba sendo um balanço entre essas duas eficiências, o que resultou nos comportamentos já comentados anteriormente.

Outro parâmetro avaliado foi a exergia destruída, apresentada na Tabela 20. Dessa forma, a tabela possui a exergia destruída média, a exergia destruída e a eficiência exergética obtida em cada experimento.

Tabela 20 – Exergia destruída média a cada 10 minutos de experimento, total e comparação entre a energia total consumida e a quantidade de exergia destruída.

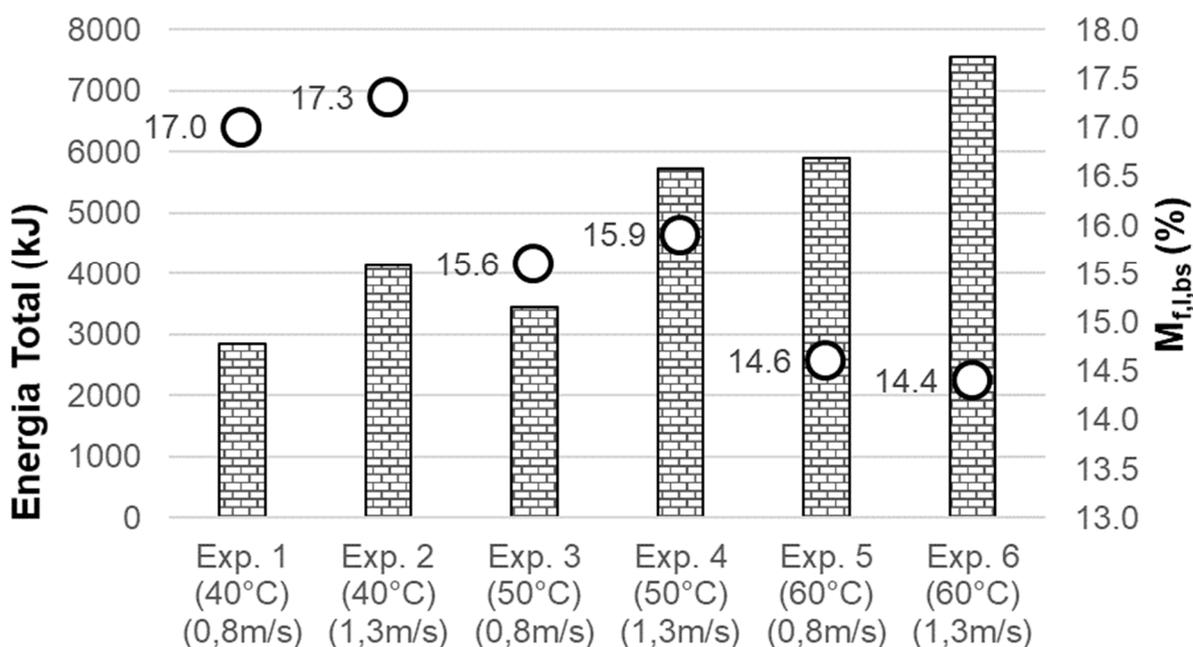
Exp.	$\bar{E}_{x_{destruída}}$ (kJ)	$E_{x_{destruída,total}}$ (kJ)	$\bar{\eta}_{ex}$ (%)
1	140	1678	0,38
2	224	2693	0,31
3	187	2243	0,51
4	326	3909	0,41
5	316	3798	0,69
6	426	5117	0,60

Fonte: Próprio autor.

De uma forma geral, quanto maior a temperatura e maior a velocidade mais exergia é destruída. Isso demonstra que apesar da eficiência exergética demonstrar um crescimento devido ao aumento da temperatura, mais exergia é destruída, o que também se deve ao fato que porque existe mais energia envolvida no processo e menos energia sendo aproveitada para retirar especificamente a umidade dos grãos. Assim, o valor da exergia destruída reafirma o fato destacado anteriormente com relação a eficiência exergética, quanto mais exergia não foi aproveitada mais exergia poderia ser reaproveitada através da recirculação do ar que deixa o secador ainda com capacidade de ser utilizado. Dessa forma, a possibilidade de reaproveitar a capacidade restante do ar que deixa o secador, através de sua recirculação, torna-se mais relevante quanto maior a temperatura e a velocidade de entrada, uma vez que nesses casos mais ar deixa o processo com alta capacidade de reaproveitamento.

A quantidade total de energia consumida medida pelo wattímetro e a umidade média final do leito de grãos para cada experimento estão apresentadas na Figura 52, todos os experimentos foram conduzidos por 120 minutos. Como pode ser visto o aumento da velocidade provoca aumento do consumo total de energia, o que está ligado ao aumento da vazão mássica na entrada do secador, mais massa significa mais energia para manter uma mesma temperatura de entrada. Assim, o aumento da velocidade gerou para 40°C um aumento de 46% no consumo de total de energia, sendo que para 50°C o aumento é de 66% e para 60°C o aumento é de 28%. Quanto ao aumento de temperatura, seu resultado também ocasiona aumento de consumo uma vez que é necessária mais energia para aquecer o ar da temperatura ambiente para uma temperatura mais elevada. Assim para a velocidade mais baixa, o aumento de temperatura gerou um aumento de 22% para 50°C e de 107% para 60°C considerando como base a temperatura de 40°C. Da mesma forma, para a velocidade mais alta, o aumento foi de 38% para 50°C e de 83% para 60°C considerando a temperatura de 40°C como base.

Figura 52 – Quantidade total de energia consumida e teor de umidade médio final do leito de grãos para cada experimento de secagem.



■ Energia total ○ Teor de umidade médio final do leito em base seca

Fonte: Próprio autor.

Os valores de teor de umidade médio final do leito de grãos para cada experimento de secagem demonstram que o aumento de velocidade, por esse ponto de vista, não foi interessante, uma vez que tal ganho de consumo não representou um ganho na retirada do teor de umidade médio do leito, fato também comprovado pelo valor médio da taxa de secagem no tempo total de experimento. Entretanto, conforme visto anteriormente, o aumento da velocidade trouxe uma maior homogeneidade no teor de umidade final do leito, apresentando menores diferenças de teor de umidade entre as diferentes profundidades do leito, fato que revela a importância da velocidade na redução do efeito de camada gerado pela formação da frente de secagem em leitos profundos. Esse ganho de homogeneidade pode ser interessante do ponto de vista de não ocorrerem perdas de produto devido a não retirada de umidade, visto que para o armazenamento adequado dos grãos, seu teor de umidade final deve ser próximo de 14% na base seca. Segundo Ranjbaran *et al.* (2014), a diferença do teor de umidade entre a entrada e as regiões mais distantes dela, podem levar a uma degradação da qualidade dos grãos, devido à maior atividade

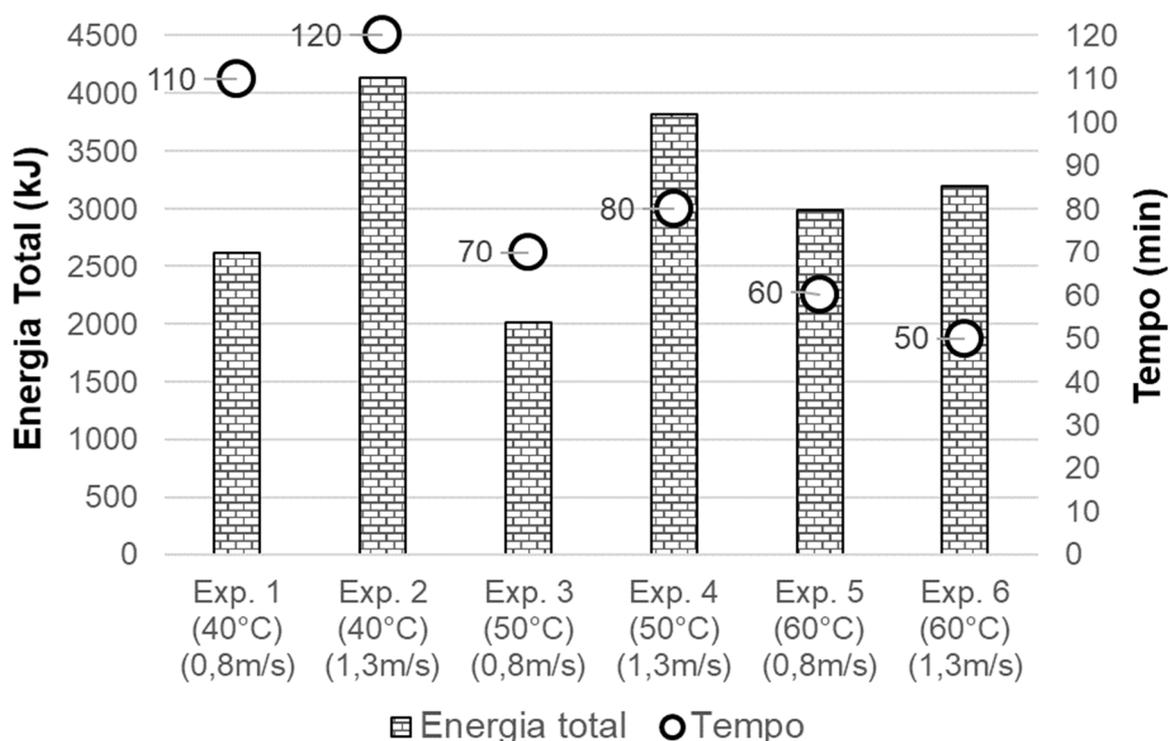
metabólica destes pela presença de maior percentual de teor de umidade e à possibilidade de geração de mofo nessas áreas.

Contudo, existem outras formas de garantir uma homogeneidade do leito que não sejam a velocidade de entrada, como por exemplo, o revolvimento do leito, que visa mover os grãos de posição dentro do leito para que no final o produto seja seco de forma mais homogênea. É claro que para realizar uma comparação entre essas duas alternativas é necessário compreender os custos energéticos da implementação de tal sistema, bem como as consequências de sua utilização na qualidade do produto secado, o que não foi objetivo deste trabalho.

Outro fator importante a ser avaliado é o tempo de secagem, porque para temperaturas mais baixas o tempo de secagem costuma ser muito maior, dessa forma a energia perdida na exaustão também é maior, de forma que a eficiência média do final do processo pode ser afetada por esse fator. Assim, para analisar esse fator foi realizado um estudo comparativo do consumo de energia total até um certo valor de umidade média do leito. É claro que a maneira correta de realizar esse tipo de comparação é realizar a secagem até a umidade final desejada, uma vez que a taxa de secagem varia de forma diferente à medida que o tempo passa, entretanto, o tempo de experimento seria variável e longo principalmente para os casos de temperatura mais baixa. Assim, a melhor forma de realizar essas observações da maneira mais adequada seja talvez através da simulação computacional do secador.

Tendo essas limitações em mente, neste trabalho foi analisado o consumo de energia total e o tempo de secagem de cada experimento até que o teor de umidade médio do leito de grãos fosse de 17,3% na base seca, esse valor foi escolhido por ser o teor de umidade final mais alto encontrado dentre todos os experimentos realizados. O que tornou possível a comparação do tempo utilizando todos os experimentos realizados. Na Figura 53, portanto, está apresentado a quantidade de energia consumida e o tempo para atingir o teor de umidade médio do leito de grãos de 17,3% na base seca.

Figura 53 – Quantidade de energia consumida e tempo para atingir 17,3% de teor de umidade médio do leito de grãos na base seca.



Fonte: Próprio autor.

Novamente o aumento de velocidade provoca aumento de consumo, e na maioria das vezes provoca aumento do tempo, com exceção para a temperatura de 60°C, cujo aumento de velocidade ocasionou uma redução do tempo de secagem, fato que resultou em uma redução acentuada da diferença de consumo entre as duas velocidades para essa temperatura. Isso demonstra a importância do tempo de secagem para a avaliação dos parâmetros operacionais mais adequados do secador do ponto de vista de consumo energético. Além disso, o comportamento das eficiências energéticas também seguiu o mesmo padrão uma vez que, quanto maior o tempo de secagem menor a eficiência de secagem, o que acaba reduzindo a eficiência média de secagem.

Outro fato interessante é que se os experimentos realizados forem ordenados em ordem crescente de consumo obtido na Figura 53, tem que os três menores consumos foram o do experimento 3, seguido pelo experimento 1 e pelo experimento 5. Que é a mesma ordem de maior eficiência energética de secagem média encontrada nos experimentos. Dessa forma, existe uma relação do tempo de

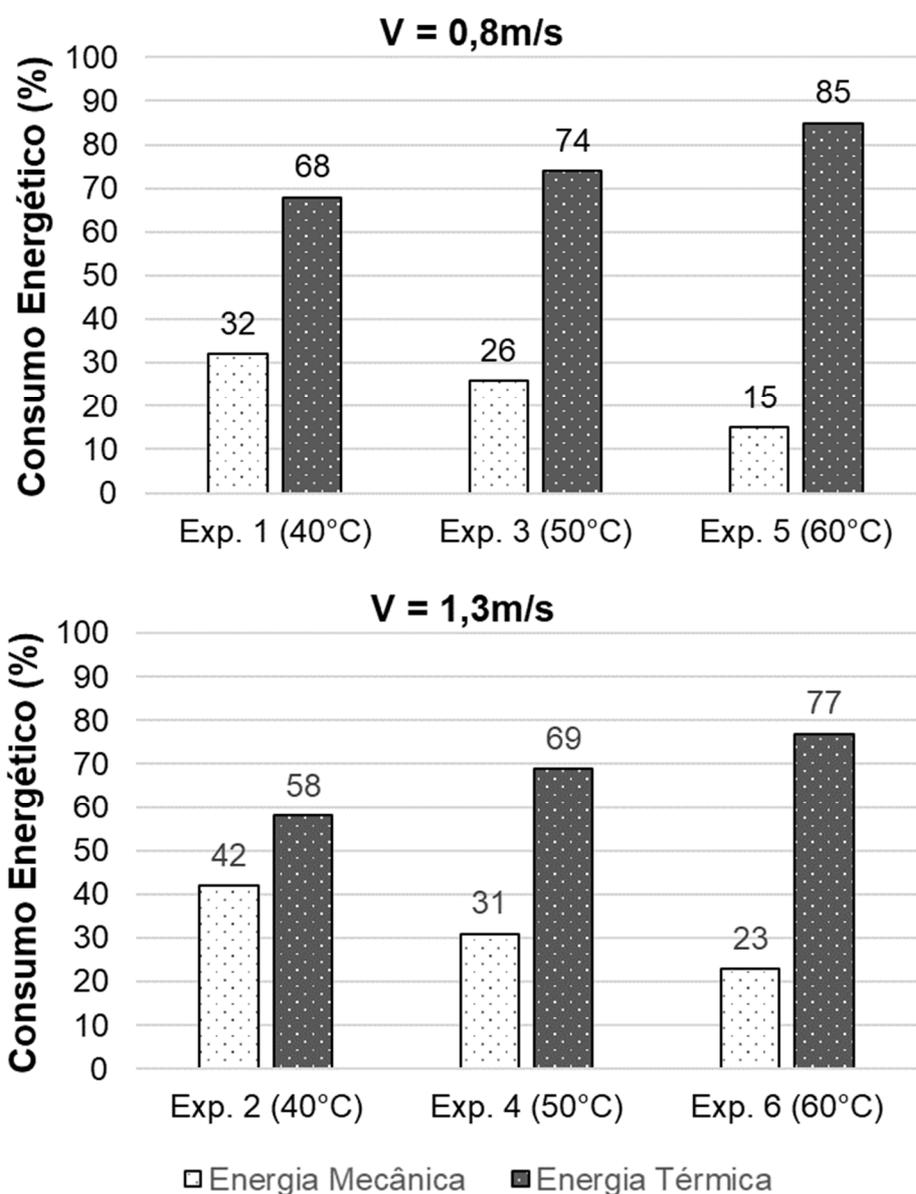
secagem, da temperatura e da velocidade de entrada na eficiência e consequentemente no consumo de energia do secador, além disso, esses fatores são dependentes tanto do processo de secagem, como do equipamento, assim cada equipamento pode apresentar uma condição ideal de operação de acordo com o produto a ser secado.

Quanto ao tempo, pode-se observar que quanto maior a temperatura, menor o tempo de secagem, o que como dito anteriormente não ocorre sempre com o aumento de velocidade. Por outro lado, a redução do tempo não foi para todos os casos suficiente para reduzir o consumo total de energia, principalmente pelo fato de que para maiores temperaturas, mais energia é necessária para aquecer o ar ambiente até a condição de entrada, dessa forma, o consumo acaba sendo o balanço entre a redução de tempo obtida com o aumento de temperatura, e a quantidade de energia necessária para manter as condições de entrada no secador.

Além disso, existe um fator predominante para decidir a temperatura do ar de secagem que é o destino da aplicação final do produto, que está diretamente ligada à sua qualidade. Assim, dependendo da destinação do produto existirá um limite de temperatura de entrada a ser respeitado e, portanto, a decisão da condição de operação só será influenciada pelas eficiências caso seja possível.

Por fim, também foi avaliada a percentagem de energia destinada ao aquecimento do ar de entrada e a energia utilizada para movimentação do ventilador e do funcionamento dos demais componentes eletrônicos do secador. Dessa forma, como a energia consumida nos componentes eletrônicos é desprezível quando comparada ao consumo do ventilador e das resistências elétricas, a percentagem de consumo foi dividida em energia térmica e mecânica, sendo a energia térmica destinada apenas ao aquecimento do ar, sobre forma do consumo das resistências elétricas utilizadas, e a energia mecânica como sendo a energia necessária para movimentar o ar de secagem através do consumo do ventilador. Assim, a Figura 54 apresenta as percentagens do consumo energético térmico e mecânico do secador para cada um dos experimentos realizados.

Figura 54 – Porcentagens do consumo energético térmico e mecânico do secador para cada experimento.



Fonte: Próprio autor.

A porcentagens do consumo energético térmico e mecânico do secador varia de acordo com aumento da temperatura e a velocidade de entrada do ar. Para uma mesma velocidade, o aumento de temperatura eleva a energia térmica utilizada, uma vez que as resistências elétricas são mais acionadas, entretanto para uma mesma temperatura o aumento da velocidade aumenta a participação da energia mecânica no processo devido ao maior nível de consumo do ventilador com o aumento de velocidade. De maneira geral, independente da condição de entrada a energia térmica

sempre é maior que a energia mecânica necessária, assim, possíveis soluções para melhoria de eficiência do secador devem em um primeiro momento ser focadas na melhoria da eficiência térmica do mesmo. A maior discrepância entre as porcentagens térmica e mecânica ocorreram no experimento 6, que possui a maior temperatura e a menor velocidade, atingindo um nível de 85% de consumo em energia térmica contra apenas 15% de consumo em energia mecânica. Por outro lado, a menor discrepância entre os dois termos ocorreu no experimento 2, onde a temperatura é a menor e a velocidade é a maior, atingindo 58% de energia térmica e 42% de energia mecânica.

Portanto, os experimentos realizados no secador desenvolvido demonstraram a capacidade do equipamento em realizar testes de dinâmica de secagem de grãos e de análise energética e exergética do processo. Apresentado resultados que dialogam com a bibliografia de secagem, demonstrando o potencial da utilização do equipamento para validação de modelos matemáticos de secagem de grãos.

Através do cálculo das eficiências foi analisado as perdas energéticas e exegéticas envolvidas e destacado as melhores condições de operação do secador desenvolvido dentre as condições de velocidade e temperatura experimentadas. Dessa forma, novas soluções podem ser propostas para a melhoria da eficiência do secador desenvolvido, tanto do ponto de vista do processo de secagem através da implementação do revolvimento do leito, ou mesmo da recirculação de parte do ar de secagem, quanto do ponto de vista do secador, através da melhoria do isolamento térmico do equipamento e da melhoria da troca de calor entre o ar ambiente e as resistências elétricas.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho visa desenvolver um secador experimental em pequena escala para a realização de experimentos de secagem do milho em leito profundo, a fim de analisar o processo de secagem e realizar a análise energética e exergética do secador produzido. Os experimentos foram conduzidos na segunda quinzena do mês de outubro de 2018, no laboratório de secagem do DEMAT e o milho utilizado foi colhido nos campos experimentais da EMBRAPA Milho e Sorgo, localizado em Sete Lagoas, no dia 25 de setembro de 2018, e armazenado em ambiente refrigerado até a data dos experimentos.

O secador experimental deste trabalho, baseou-se nas dimensões e recomendações encontradas na literatura, e possui câmara de secagem cilíndrica de 130mm de diâmetro e altura total de 450mm, dos quais 200mm foram utilizados como leito de grãos. O custo do secador, sem considerar a mão de obra, foi de aproximadamente R\$1600,00, e com esse investimento, mais a estrutura do laboratório do CEFET-MG, foi possível realizar as medidas experimentais da secagem do milho, com controle de temperatura e regulação de velocidade do ar de secagem.

No total foram realizados seis testes de secagem com duração de 120 minutos, cujas condições de entrada, saída e do ambiente foram monitoradas. Foram testadas como condição de entrada as temperaturas de 40, 50 e 60°C e as velocidades de 0,8ms⁻¹ e 1,3ms⁻¹. Os teores de umidade inicial do milho utilizado foram definidos em teste em estufa a 105°C por 24h, e além disso, ao final de cada experimento de secagem, amostras do produto em três posições diferentes no leito foram retiradas para realização do teste em estufa, tanto para confirmação dos valores do teor de umidade médio do leito quanto para observação de seu gradiente do teor de umidade.

O teor de umidade médio do leito de grãos teve uma redução de umidade na base seca entre 7,9 e 4,9%, sendo que o teste que obteve o maior valor foi o experimento 5, com temperatura de entrada igual a 60°C e velocidade igual a 0,8m/s. Foi constatado que o aumento da temperatura do ar de entrada reduz o tempo de secagem devido à queda da umidade de equilíbrio e ao aumento da disponibilidade de energia para a vaporização da água. Por outro lado, as velocidades utilizadas nesse trabalho não apresentaram influência sobre a umidade média retirada do leito

de grãos devido ao predomínio da influência da difusão de umidade no interior dos grãos para a faixa testada.

A taxa de secagem apresentou, para todos os experimentos, um comportamento de pico no início e uma tendência de redução à medida que o tempo de experimento avança, o que ocorreu devido a redução da diferença entre a umidade instantânea dos grãos e a umidade de equilíbrio. Assim, a temperatura do ar de secagem é diretamente proporcional a taxa de secagem, ao passo que a velocidade do ar de entrada, apesar de não ter uma influência relevante no valor médio da taxa de secagem, influencia nos seus valores instantâneos ocasionando picos maiores.

Quanto ao gradiente de temperatura do leito, a temperatura de entrada é diretamente proporcional ao gradiente do leito de grãos para uma mesma velocidade, enquanto a velocidade é inversamente proporcional ao gradiente para uma mesma temperatura de entrada. Da mesma forma, o gradiente de umidade dos grãos do leito diminui com o aumento da velocidade, ao passo que para uma mesma velocidade o aumento da temperatura gerou comportamentos não conclusivos devido à coincidência dos limites superiores e inferiores da incerteza nessas medidas. Dessa forma, para medição de umidade final com a profundidade é interessante o uso de balanças com uma maior precisão, a fim de minimizar a incerteza e garantir a possibilidade de afirmação acerca de seu comportamento. Por fim, a comparação da umidade medida pelo peso do leito e a umidade média das amostras coletadas com a profundidade e medidas por teste em estufa, obtiveram o erro percentual máximo de 3,4%, demonstrando a conformidade dos valores médios obtidos.

O aspecto das curvas de eficiência energética e exergética obtidas foram semelhantes aos da taxa de secagem, apresentando um crescimento rápido no início seguido de um pico e redução até o fim da secagem. O experimento que apresentou maior eficiência energética real foi o teste três, com temperatura de 50°C e velocidade de entrada de $0,8\text{ms}^{-1}$, cuja eficiência energética média real foi de 8%. Quanto a eficiência energética teórica tem-se que quanto menor a temperatura e a velocidade de entrada, maior a eficiência energética do processo, o que ocorre porque quanto maior esses fatores mais energia deixa o secador na exaustão sem que tenha sido aproveitada para a secagem dos grãos. Essa diferença entre as eficiências energéticas teóricas e reais, deve-se a eficiência térmica do secador, que é específica

do equipamento desenvolvido, assim, o produto da eficiência energética teórica e a eficiência térmica do secador é igual a eficiência real, com um erro inferior a 3%.

Quanto a eficiência exergética, o aumento de temperatura para uma mesma velocidade ocasiona aumento de eficiência exergética, devido ao aumento do termo de Carnot que faz parte da equação da exergia. Por outro lado, para uma mesma temperatura o aumento da velocidade de entrada gera redução da eficiência exergética, pelo aumento da perda por exaustão ocasionado pelo aumento da vazão. Assim, a maior eficiência exergética média real obtida foi de 0,69% e ocorreu no experimento cinco, com temperatura de entrada de 60°C e velocidade de 0,8ms⁻¹.

A exergia destruída foi maior, quanto maior a temperatura e maior a velocidade. Do ponto de vista da velocidade seu aumento está relacionado as perdas de ar por exaustão. Por outro lado, a temperatura demonstra que apesar da eficiência exergética apresentar crescimento devido ao aumento da temperatura, mais exergia é destruída, fato que se deve também a existência de mais energia disponível no processo. Assim, a exergia destruída aponta que quanto maior a eficiência exergética mais energia poderia ser reaproveitada para outros fins, como por exemplo a recirculação de ar.

Durante os experimentos de secagem a energia total consumida variou de 2844kJ a 7560kJ, sendo que quanto maior a temperatura e a velocidade maior o consumo de energia. Desse consumo, em média 28% da energia é dedicada a movimentação do ventilador e 72% ao aquecimento do ar de secagem, sendo que quanto maior a temperatura maior a participação térmica no consumo e quanto maior a velocidade maior a participação mecânica. Portanto, como a energia térmica é a parcela mais relevante do consumo do secador, os esforços para aumento da eficiência desse equipamento, devem ser destinados a melhoria de sua eficiência térmica. Assim, ações como melhoria do isolamento, recirculação de ar de exaustão do ar de secagem e adoção de homogeneizadores de ar na região de aquecimento são mais adequadas para melhorar a eficiência do equipamento. Além disso, do ponto de vista de processo de secagem a utilização de velocidades menores está ligada a melhores valores de eficiência energética e exergética, entretanto o seu uso gera maiores gradientes de umidade o que pode ocasionar problemas de umidade inadequada de grãos nas regiões mais afastadas da entrada do secador. Assim, a

implementação do revolvimento dos grãos para baixas velocidades pode ser a melhor maneira de garantir mais homogeneidade no leito de grãos sem perda de eficiência.

Portanto, os experimentos realizados no secador desenvolvido, demonstraram a capacidade do equipamento em realizar testes e gerar resultados condizentes com a bibliografia de secagem, demonstrando o potencial de utilização do equipamento para validação de modelos matemáticos de secagem de grãos. Além disso, foi possível avaliar as eficiências energéticas e exergética do equipamento e propor melhorias no mesmo.

5.1. Sugestão para trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, pode-se avaliar a utilização do revolvimento de grãos no leito a fim de testar sua influência na secagem, tanto do ponto de vista da dinâmica do processo, quanto da sua eficiência energética e exergetica. Além disso, seria interessante realizar os avanços propostos por esse trabalho como a melhoria do isolamento térmico do secador, a utilização de homogeneizadores de ar na região de aquecimento e o estudo da reutilização do ar de exaustão para o pré-aquecimento do ar de entrada do secador, tudo isso a fim de verificar os ganhos energéticos da implementação desses sistemas.

Outra oportunidade de trabalho futuro é a utilização do secador para testes experimentais de outros grãos importantes mundialmente como o arroz e a soja. Também é possível testar outros formatos de câmara de secagem no mesmo equipamento, a fim de observar a influência de sua geometria na eficiência do equipamento. Seria interessante também realizar a validação de um modelo numérico computacional de secagem utilizando os experimentos realizados neste trabalho.

Por fim, seria interessante desenvolver uma metodologia de análise de eficiência de secadores industriais através do estudo teórico da secagem e o estudo experimental da eficiência térmica do secador, assim seria possível analisar melhores condições de operação para o secador real considerando as peculiaridades térmicas do equipamento.

REFERÊNCIAS

- AGHBASHLO, M.; MOBILI, H.; RAFIEE, S.; MADADLOU, A. A review on exergy analysis of drying processes and systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p.1-22, 2013.
- ALBERTAZZI, A. G. Jr.; SOUZA, A. R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. 1. ed. Barueri: Manole, 2008.
- ALPUCHE, M. G; HEARD, C.; BEST, R.; ROJAS, J. Exergy analysis of air cooling systems in buildings in hot humid climates. **Applied Thermal Engineering**, v. 25, p. 507-517, 2005.
- AMANTÉA, R. P.; FORTES, M.; MARTINS, J. H.; FERREIRA, W. R. Numerical simulation techniques for optimizing thermodynamic efficiencies of cereal grain dryers. **Drying Technology**, v. 31, n. 6, p. 672-683, 2013.
- ASAE STANDARDS – S448. 1998. **Thin - Layer drying of grains and crops**. p. 581-583.
- BALBY, A.; SAHIN, O.; ULKER, H. Modeling of convective drying kinematics of pistachio kernels in a fixed bed drying system. **Thermal Science**, v. 17, p. 839-846, 2013.
- BAMPI, S. L.; PAULA, C. V.; ZILLI, J. B. A competitividade das exportações de milho do Brasil para a União Europeia no período de 2000 a 2014. **Tiempo&Economía**, v. 3, p. 115-136, 2016.
- BARRE, H. J.; BAUGHMAN, C. R.; HAMDY, M. Y. Application of the logarithmic model to deep bed drying. **Transactions of ASAE**, v. 14, n. 6, p. 1061-1064, 1971.
- BEIGI, M.; TOHIDI, M.; TORIKI-HARCHEGANI, M. Exergetic analysis of deep-bed drying of rough rice in a convective dryer. **Energy**, v. 140, p. 374-382, 2017.
- BEIGI, M.; TORIKI-HARCHEGANI, M.; TOHIDI M. Experimental and ANN modeling investigations of energy traits for rough rice drying. **Energy**, v. 141, p. 2196-2205, 2017.
- 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). Porto Alegre: UFRGS, 2011.
- BRASIL. **Regras para análise de sementes**. Ministério da Agricultura e da Reforma Agrária, 2009, 365 p.

BRASKEM. **Propriedades de referência dos compostos de PVC**. Boletim Técnico 03 PVC, Rev. 1, 2002. Disponível em: <https://www.braskem.com.br/boletim-tecnico>. Acesso em: 10 de setembro. 2018.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying cereal grains**. Westport: AVI Publishing, 1974.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and Storage of Grains and Oilseeds**. New York: AVI Publishing, 1992.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7.ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CENKOWSKI, S.; JAYAS, D. S.; PARBIS, S. Deep-bed grain - a review of particular theories. **Drying Technology**, v. 11, n. 7, p. 1553-1581, 1993.

CHEN, C.; WU, P. Thin Layer drying model for rough rice with high moisture content. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 80, p. 45-52, 2001.

Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB). **Acompanhamento da safra brasileira de grãos**. v7 Safra 2017/18 – Sétimo levantamento, Brasília, abril 2018.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O; MARTINAZZO, A. P.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. Modelagem matemática para descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, v. 27, p. 501-510, 2007.

DALPASQUALE, V. A., PEREIRA, D. A M., SINICIO, R., FILHO, D. O. **Secado de granos a altas temperaturas**. Santiago: FAO, 1991.

DARVISH, H.; AZADBAKHT, M.; NORALAH, B. Experimental performance of mushroom fluidized-bed drying: Effect of osmotic pretreatment and air recirculation. **Renewable Energy**, v. 120, p. 201-208, 2018.

DINCER, I.; ROSEN M. A. Thermodynamic aspects of renewables and sustainable development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 9, p. 169-189, 2005.

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**, v. 161, p. 135-144, 2017.

EMBRAPA. **Sistema de Produção: Cultivo do Milho**, (Versão Eletrônica). 9.ed. 2015. Disponível em: <https://www.spo.cnptia.embrapa.br/>. Acesso em: 04 abr. 2018.

ERBAY Z., HEPBASLI A., Advanced Exergy Analysis of a Heat Pump Drying System Used in Food Drying. **Drying Technology**, v. 31, p. 802-810, 2013.

FADHEL, A.; CHARFI, K.; BALGHOUYHI, M.; KOOLI, S. Experimental investigation of the solar drying of Tunisian phosphate under different conditions. **Renewable Energy**, v. 116, p. 762-774, 2018.

FAO. **FAOSTAT: World total, Production, Cereals list, 2017**. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 03 jun. 2019.

FARKAS, I., REMÉNYI, P., BIRÓ A. A neural network topology for modelling grain Drying. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 26, p. 147-158, 2000.

FERREIRA, A. G.; GONÇALVES, L. M.; MAIA, C. B. Solar drying of a solid waste from steel wire industry. **Applied Thermal Engineering**, v. 73, p.104-110, 2014.

FERREIRA, A. G.; MAIA, C. B.; CORTEZ, M. F. B.; VALLE, R. M. Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying. **Solar Energy**, v. 82, p. 198-205, 2008.

FORTES, M.; MARTINS, J. H; AMANTÉA, R. P.; FERREIRA, W. R. Transient and spatial energy and exergy analysis of deep-bed corn drying. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**. ASABE Annual International Meeting, Nevada, 2009.

FRANÇA, A. S.; MARTINS, M.; HAGHIGHI, K. Numerical simulation of intermittent and continuous deep-bed drying of biological materials. **Drying Technology**, v. 12, n. 7, p. 1537-1560, 1994.

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

HUKIL, W. V. Basic principles in drying corn and grain sorghum. **Agricultural Engineering**, v. 28, n. 8, p. 335-338, 1947.

IBRAM. **Ventilador siroco VSI**. Disponível em: http://www.ibram.ind.br /ventilador_siroco_vsi.php. Acesso em: 16 set. 2018.

INMET - Instituto Nacional de Metrologia. **Temperatura mínima média e umidade relativa média de Belo Horizonte – MG (2007 – 2017)**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: 18/07/2019.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L. G. Thin-layer drying characteristics and modelling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 1, p. 98-108, 2007.

KRIBS JD, SPOLEK GA. Drying energy conservation for deep bed barley–malt kilns. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 68, p. 307-73, 1997.

LIU, Q.; BAKKER-ARKEMA, F. W. Automatic control of crossflow grain dryers, part 1: Development of a process model. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 80, n. 1, p. 81-86, 2001.

LIU, Z., WU, Z., WANG, X., SONG, J, WU, W. Numerical Simulation and Experimental Study of Deep Bed Corn Drying Based on Water Potential. **Mathematical Problems in Engineering**, Volume 2015, 2015.

MACIEL, P. F. F. **Análise energética e exergética da secagem de cacau em secador elétrico e em secador solar**. 109 f. Dissertação de Mestrado. Belo Horizonte: CEFET-MG, 2017.

MADHIYANON, T.; SOPONRONNARIT, S.; TIA, W. A tow- region mathematical model for batch drying of grains in a two-dimensional spoiled bed. **Drying Technology**, v. 19, n. 6, p. 1045-1064, 2001.

MAIA, C. B.; CASTRO SILVA, J. O.; CABEZAS_GÓMEZ, L.; HANRIOT, S. M.; FERREIRA, A. G. Energy and exergy analysis of the airflow inside a solar chimney. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 350-361, 2013.

MARTINS, E. A. S. **Dimensionamento e experimentação de um secador de leito fixo para a secagem de produtos agrícolas**. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Dourados. UFGD, 2015.

MELO, E. C.; LOPES, D. C. **GRAPSI**. Programa para cálculo das propriedades psicrométricas do ar mediante o conhecimento de duas variáveis. Versão 5.1. 2003. Disponível em: <http://www.centreinar.org.br/software.php>.

MISRA, M. K.; BROOKER, D. B. Thin-layer drying and rewetting equations for shelled yellow corn. **Transactions of the ASAE**, v. 23, n. 5, p. 1254-1260.1980.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. LTC editora, 2008.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. 2007. **Conceitos de processos e equipamentos de secagem**. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/1203257/conceito-de-processos-e-equipamentos-de-secagem>. Acesso em 17 set. 2018.

PARRY, J. L. Mathematical modelling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying: a review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 32, p. 1-29, 1985.

PARTI, M. Selection of mathematical models for drying grain in thin-layers. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 54, n. 4, p. 339-352. 1993.

PIRASTEH, G., SAIDUR, R., RAHMAN, S.M.A., RAHIM, N.A. A review on development of solar drying applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 133-148, 2014.

RABHA, D. K.; MUTHUKUMAR, P.; SOMAYAJI, C. Experimental investigation of thin layer drying kinetics of ghost chilli pepper (*Capsicum Chinese Jacq.*) dried in a forced convection solar. **Renewable Energy**, v. 105, p. 583-589, 2017.

- RANJABARAM, M.; ZARE, D. Simulation of energetic and exergetic performance of microwave-assisted fluidized bed drying of soybeans. **Energy**, v. 59, p. 484-493, 2013.
- RANJBARAN, M.; EMADI, B.; ZARE, D. CFD simulation of deep-bed paddy drying process and performance. **Drying Technology**, v. 32, n.8, p. 919-934, 2014.
- RYU, J.; JUNG, C.; YI, S. Three-dimensional simulation of humid-air dryer using computational fluid dynamics. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 19, p. 1092-1098, 2013.
- SABBAH, M.A; KEENER, H.M; MEYERS, G.E. Simulation of solar drying of shelled corn using the logarithmic model. **Transactions of ASAE**, v. 22, p. 637-643, 1979.
- SHARON, M., PRIYA., E.P., SUBHASHINI, S. Thin layer and deep bed drying basic theories and modelling: a review. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 18, n. 1, p. 314-325, 2016.
- SHARP, J. R. A review of low temperature drying simulation models. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 27, n. 3, p. 169-190, 1982.
- SILVA, J.S. **Secagem e armazenamento de produtos agrícolas**. 2.ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008.
- SITOMPUL, J. P., ISTADI, WIDIASA, I. N. Modeling and simulation of deep – bed grain dryers. **Drying Technology**, v. 19, n. 2, p. 269-280, 2001.
- SOPONRONNARIT, S. Energy model of grain drying system. **ASEAN Journal on Science and Technology**, v. 5, n. 2, p. 43-68, 1988.
- SOUZA, J. L. F. **Simulação de secador cilíndrico de grãos com fluxos radial e axial de ar**. 1996. 97 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- SRIVASTAVA, V. K.; JOHN, J. Deep bed grain drying modeling. **Energy Conversion and Management**, v. 43, n. 13, p. 1689-1708, 2002.
- TANG, Z.; CENKOWSKI, S.; MUIR, W. E. Modelling the superheated – steam drying of a fixed bed of brewer's spent grain. **Biosystems Engineering**, v. 87, n. 1, p. 67-77, 2004.
- TIRAWANICHAKUL, Y.; PRACHAYAWARAKORN, S; TUNGTRAKUL, P.; CHAIWATPONGSKORN, SOPONRONNARIT, S. Experiments on in-store paddy drying under tropical climate: simulation and product quality. **Drying Technology**, v. 21, n. 6, p. 1045-1064, 2003.
- TOHIDI, M.; SADEGHI, M.; TORKI-HARCHEGANI, M. Energy and quality aspects for fixed deep bed drying of paddy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 519-528, 2017.

TOLENTINO, E. L. **Análise energética e exergética da secagem de grãos de milho em leito fixo utilizando o modelo CFD**. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia). Belo Horizonte: CEFET-MG, 2018.

TORKI HARCHEGANI, M.; MOHEB, A.; SADEGHI, M.; TOHIDI, M.; NAGHAVI, Z. Experimental study of deep-bed kinetics of rough rice. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 14, n. 4, p. 195-202, 2012.

TORKI-HARCHEGANI, M.; SADEGHI, M.; MOHEB, A.; NAGHAVI, Z. Investigation on rough rice drying kinetics at various thin layers of a deep bed. **Heat Mass Transfer**, v. 50, p.1717-1725, 2014.

USDA. **World Agricultural Production**: Novembro de 2018. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/world-agricultural-production>. Acesso em: 28 de Novembro de 2018.

VUKIĆ, M.; JANECSKHI, J.; VUČKOVIĆ, G.; STOJANOVIĆ, B. Experimental investigation of the drying kinetics of corn in a packed and fluidized bed. **Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering**, v. 34, p. 43-49, 2015.

WEBER, E. A. **Excelência em beneficiamento e armazenagem de grãos**. Canoas, RS: Editora Salles, 2005.

ZARE, D., CHEN, G. Evaluation of a simulation model in predicting the drying parameters for deep-bed paddy drying. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 68, p. 78-87, 2009.

ZHAO, Y.; HUANG, K.; CHEN, X.F., WANG, F.H., CHEN, P.X., TU, G. YANG, D.Y. Tempering-Drying Simulation and Experimental Analysis of corn kernel. **International Journal of food engineering**, v. 14, n. 1, p. 1-10, 2018.

APÊNDICE A – MANUAL DE UTILIZAÇÃO DO AGILENT 34980A

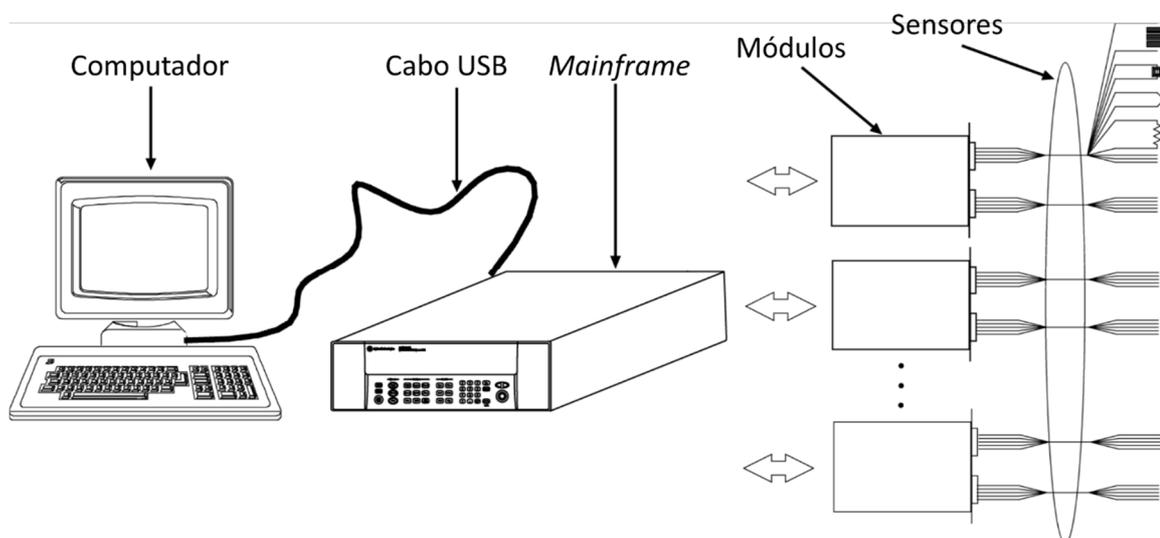
1. OBJETIVO

Operar o módulo de aquisição de dados 34980A da Agilent para medição de temperatura utilizando um computador.

2. INTRODUÇÃO

O módulo de aquisição de dados Agilent 34980A é uma unidade multifuncional de medição que pode ser utilizada como instrumento autônomo, mas que na maioria das aplicações é utilizado conectado a um computador. No caso desse manual será apresentado a sua utilização especificamente com o auxílio do computador, devido a facilidade de monitoramento e exportação dos dados. O sistema de aquisição de dados de uma forma simplificada (Figura 1) é composto por um computador, um mainframe, um cabo USB, um ou mais módulos e os sensores de medição.

Figura 1 – Sistema básico de aquisição de dados.



Fonte: Adaptação de Agilent Technologies, Inc. 2017.

O computador será o componente responsável monitoramento e a aquisição dos dados do Agilent, sendo responsável pela exportação dos dados para planilhas de Excel onde os mesmos podem ser tratados. O mainframe é o componente que faz a leitura e a interpretação dos dados enviados pelos sensores pelos módulos e envia isso para o computador, o *mainframe* é capaz de receber até 8 módulos e varrer até mil canais. Os módulos são responsáveis por fazerem um pré tratamento dos sinais e facilitam a aplicação dos sensores, existem 21 módulos diferentes e cada módulo possui uma forma de conexão com os sensores e são destinados a aplicações específicas, dessa maneira os módulos são uma forma de diversificar a quantidade de aplicações do mainframe sem onerar muito o usuário. Por fim tem-se os sensores que vão de fato criar sinais de acordo com a interação externa do ambiente.

3. EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

Para a operação de aquisição de dados serão necessários os seguintes componentes:

- Computador;
- Mainframe;
- Módulo 34921T 40-Ch Arm MUX;
- Bloco terminal;
- Chaves para fixação;
- Termopares;
- Transdutores de Pressão;
- Fonte de corrente contínua;
- Fios de 1,5mm de duas cores diferentes;
- Fios de termopar;
- Braçadeiras de nylon pequenas.

3.1. Computador

É necessário que o computador possua os seguintes requisitos de sistema:

- Sistema Operacional: *Windows 10 Pro, Windows 7 Pro, Enterprise e Ultimate, Windows Vista, XP SP 3.* (Não é compatível com *Home edition*);
- Processador: Recomendado: *Pentium 4 800MHz* ou maior. Mínimo *Pentium III, 500MHz*;
- RAM: Recomendado: *256MB* ou maior. Mínimo de *128MB*;
- Espaço de disco: Recomendado *200MB*. Mínimo *100MB*;
- Display: *1024x768* resolução, *256* cores;
- Última versão do *Keysight IO Libraries*;
- *Adobe Acrobat Reader V5.0* ou maior.

3.2. Mainframe

Mainframe Agilent 34980A (Figura 2) com o cabo de energia e o cabo USB. O modulo deve estar com *slots* vagos para colocar os módulos a serem utilizados.

Figura 2 – Mainframe Agilent 34980A.

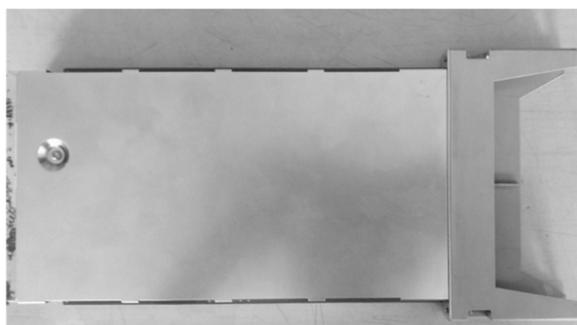


Fonte: Próprio autor.

3.3. Módulo 34921T 40-Ch Arm MUX

Módulo 34921T 40-Ch Arm MUX com o suporte de manga para fixação do bloco terminal. (Figura 3). Esse modulo comporta 4 canais para medição de corrente e 40 para medição de voltagem.

Figura 3 – Módulo 34921T 40-Ch Arm MUX com suporte de manga para fixação do bloco terminal.

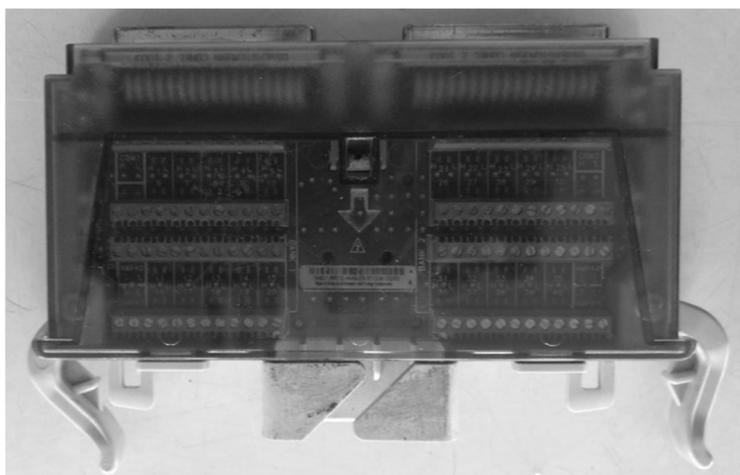


Fonte: Propria.

3.4. Bloco terminal

Bloco terminal (Figura 4) disponível e com a quantidade de canais necessárias para a aplicação.

Figura 4 – Bloco terminal.



Fonte: Próprio autor.

3.5. Chaves para fixação

Será necessária uma chave *philips* média para fixação do módulo no *mainframe* e uma chave de fenda pequena para fixar os fios dos sensores nos bornes Termopares;

3.6. Termopares

O Agilent suporta qualquer tipo de termopar, portanto ele deve ser escolhido tanto pela faixa de trabalho da medição a ser realizada, quanto pelo custo do equipamento.

3.7. Transdutores de Pressão

O transdutor de pressão converte a pressão em um sinal elétrico analógico. Dependendo do módulo acoplado ao mainframe mais ou menos sensores podem ser utilizados. Para o módulo trabalhado nesse manual tem-se a possibilidade de utilizar até quatro sensores. Os transdutores devem ser escolhidos de acordo com a faixa de medição e a precisão necessária. O transdutor utilizado nesse manual é o mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Transdutor de Pressão.



Fonte: Próprio autor.

3.8. Fonte de corrente contínua

A fonte deve ter a voltagem e a corrente necessária para a alimentação do transdutor, no caso do utilizado nesse trabalho a entrada do transdutor comporta de 11 a 33V de corrente contínua.

3.9. Fios elétricos

Necessários para fazer a ligação da fonte com o transdutor, usar fios de bitolas pequenas como 1 ou 1,5mm, e duas cores diferentes, uma vez que a polaridade é importante.

3.10. Fios de termopar

Fios de termopar para realizar a medição no transdutor.

3.11. Braçadeiras de nylon

Duas braçadeiras de nylon, uma pequena e uma média para fixar melhor os fios no bloco terminal.

4. PROCEDIMENTO

O procedimento de aquisição de dados será dividido em três fases, preparação de hardware e de software, medição dos dados e exportação de dados.

4.1. Preparação

4.1.1. Hardware

Nessa fase todos os componentes serão conectados e preparados para que a aquisição de dados ocorra da maneira esperada. O primeiro passo é preparar o *mainframe*, para isso é necessário verificar se o módulo a ser utilizado já se encontra conectado ao *mainframe* ou não. Na Figura 6 a esquerda tem-se o *mainframe* sem o módulo e a direita o *mainframe* com o módulo.

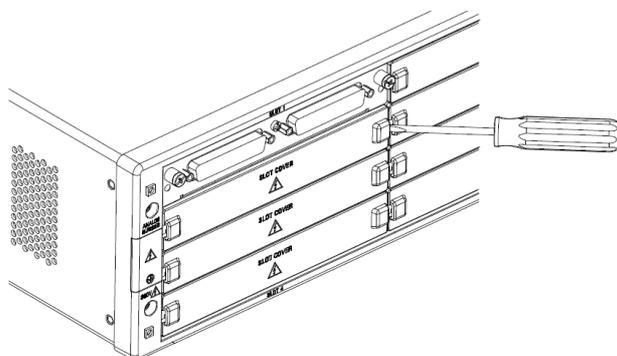
Figura 6 – Mainframe com e sem módulo.



Fonte: Próprio autor.

As regiões do *mainframe* que estão tampadas também podem receber módulos, mas para isso é necessário remover a capa protetora. Isso pode ser feito com uma chave de fenda, use a chave para erguer as laterais da capa até que a mesma se destaque do slot. (Figura 7)

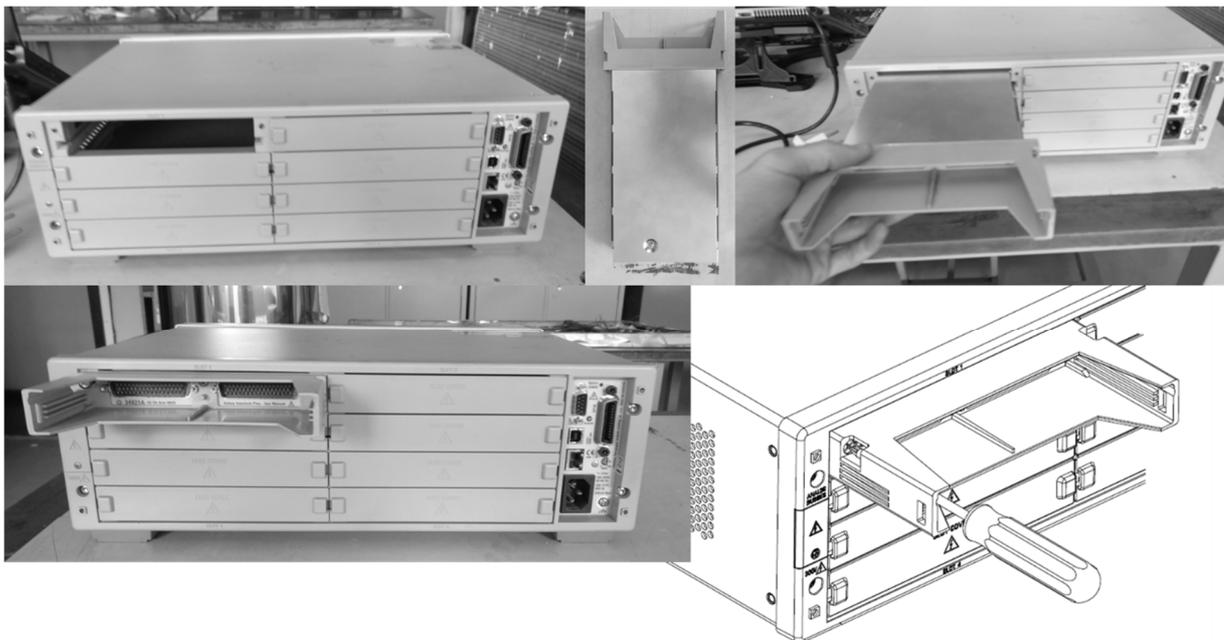
Figura 7 – Remoção da capa do slot.



Fonte: Agilent Technologies, Inc. 2017.

Com a capa removida agora é possível conectar o módulo no *slot*, assim coloque o módulo no *slot* deslizando-o até que ele se conecte no fundo do slot. Após encaixado parafuse o módulo. (Figura 8)

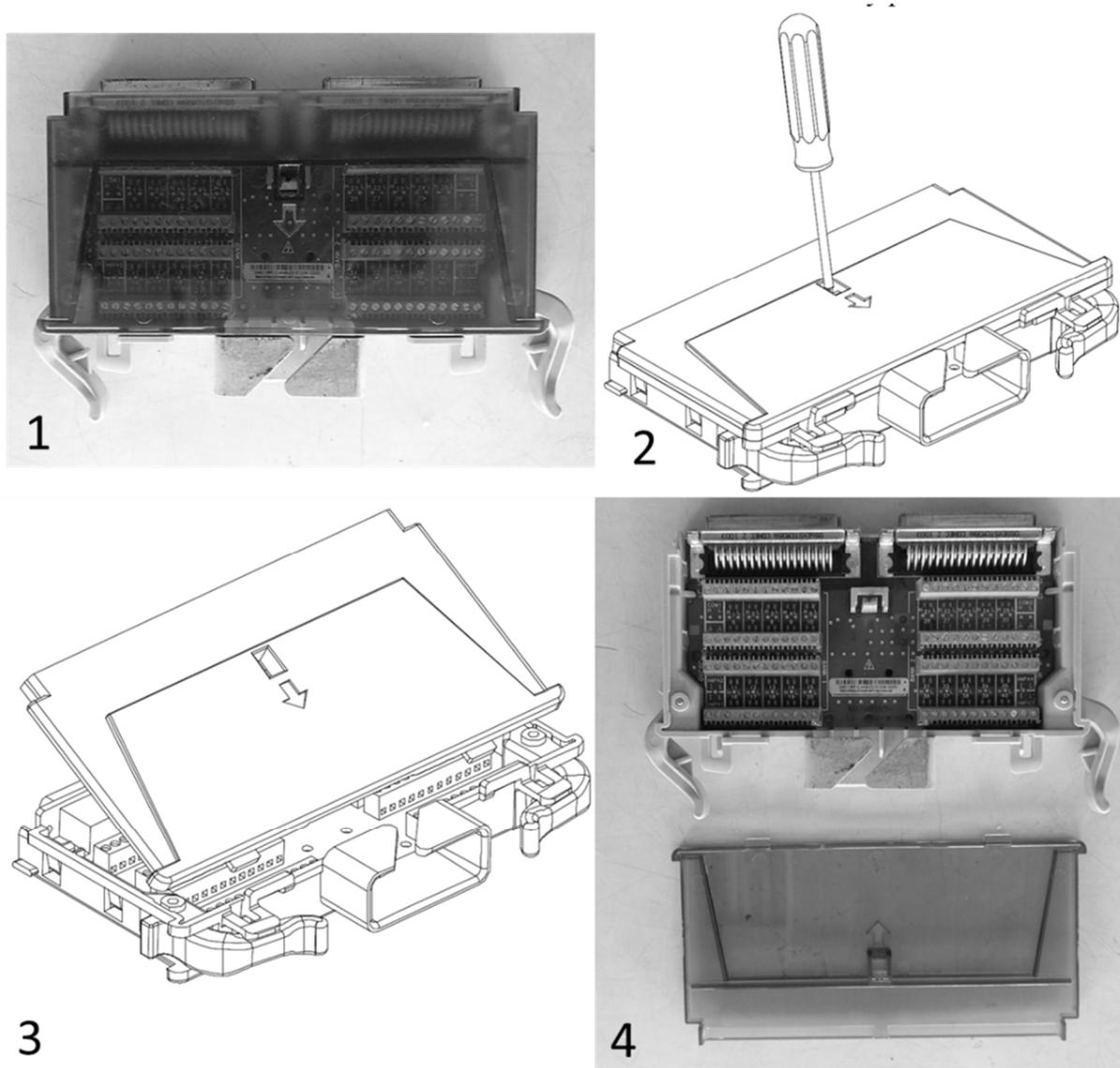
Figura 8 – Conexão do módulo no *mainframe*.



Fonte: Próprio autor.

O *mainframe* está pronto para receber o bloco terminal, portanto é necessário preparar o bloco. Para retirar a capa do bloco pode-se utilizar uma chave de fenda para pressionar a trava da capa na direção da seta indicada na capa, conforme apresentado no item 2 da Figura 9. Enquanto estiver pressionando a trava puxe a parte de trás da capa para cima conforme o item 3 e puxe para trás para liberar a capa.

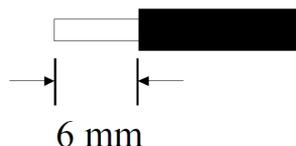
Figura 9 – Bloco terminal e procedimento para retirar sua capa.



Fonte: Adaptação de Agilent Technologies, Inc. 2017.

Agora é preciso conectar os fios dos sensores nos bornes do terminal, os fios dos sensores de maneira ideal devem ser de bitola igual a 20 AWG (0,8128 mm) ou no máximo 18 AWG (1,0236mm). A ponta a ser conectada no terminal deve ter 6mm conforme a Figura 10.

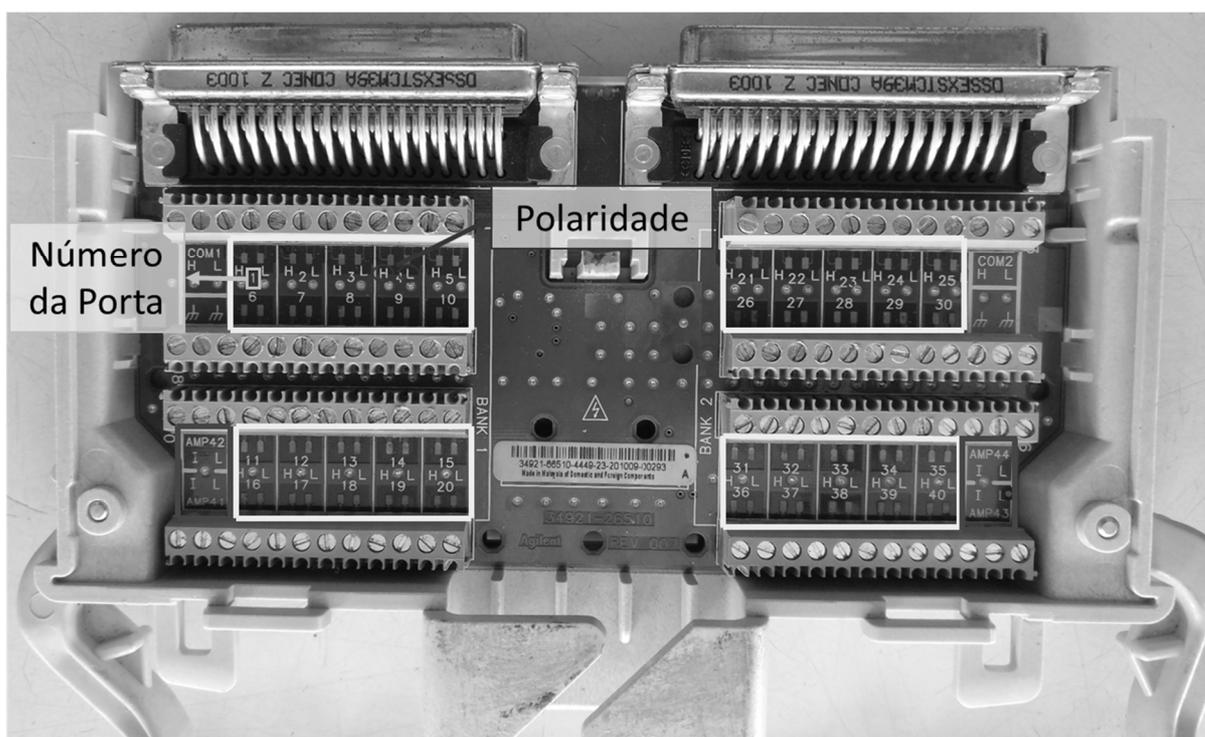
Figura 10 - Tamanho da ponta do fio que deve ser desencapada.



Fonte: Agilent Technologies, Inc. 2017.

Os termopares podem ser ligados em qualquer posição da região amarela da Figura 11, os sensores de pressão transdutores devem ser ligados na região roxa. Os fios dos sensores precisam respeitar a polaridade apresentada pelos círculos vermelhos, sendo H (*High*) para positivo e L (*Low*) para negativo, no caso dos transdutores I é a ligação positiva e L a negativa. Ligar os fios trocados no caso do termopar resultam em medidas invertidas, por exemplo, se a tendência correta era aumento de temperatura o termopar vai sofrer redução, caso se depare com esse problema, significa que a ligação realizada está invertida. Em laranja tem-se o número da porta, é de suma importância que o termopar seja identificado por esse número, pois no *software* a identificação é feita com base no número da porta em que ele foi conectado.

Figura 11 – Esquema de ligação do bloco terminal.



Fonte: Próprio autor.

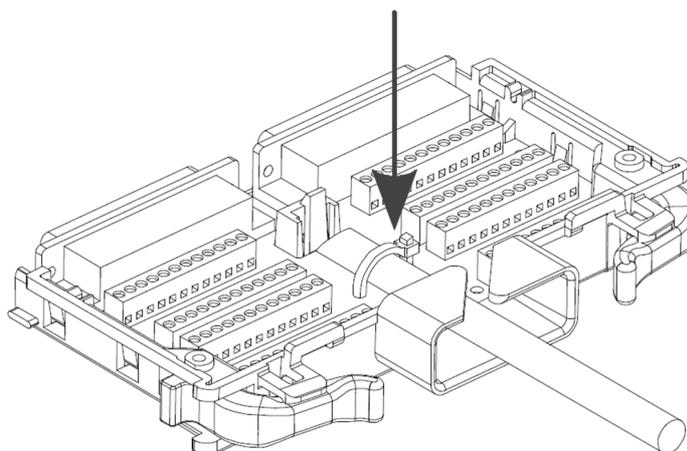
A polaridade do termopar tem a ver com o tipo de termopar utilizado, dessa forma na Figura 12 estão os padrões de três normas para o tipo de termopar e a cor de seus fios. Dessa forma, se por exemplo o termopar a ser trabalhado é o tipo T e o fio segue a norma ANSI, então o fio azul deve ser ligado na posição H e o fio vermelho na L.

Figura 12 – Cores dos fios dos termopares para quatro normas diferentes.

Tipo	Condutor +	Condutor -	ANSI MC 96 1	Internacional IEC 584-3	DIN 43710	JIS C1610-1981
J	Ferro (Fe) (Magnético)	Constantan (Cu-Ni)				
K	Níquel-Cromo (Ni-Cr)	Níquel-Alum Ni- Al (magnético)				
T	Cobre (Cu)	Constantan Cobre-Níquel (Cu-Ni)				
E	Níquel-Cromo (Ni-Cr)	Constantan Cobre-Níquel (Cu-Ni)				
N	Nicrosil (Ni- Cr-Si)	Nisil (Ni-Si-Mg)			Não previsto	Não previsto
R	Cobre (Cu)	LIGA 11 (Cu-Ni)				
S	Cobre (Cu)	LIGA 11 (Cu-Ni)				
B	Cobre (Cu)	Cobre (Cu)		Não previsto		

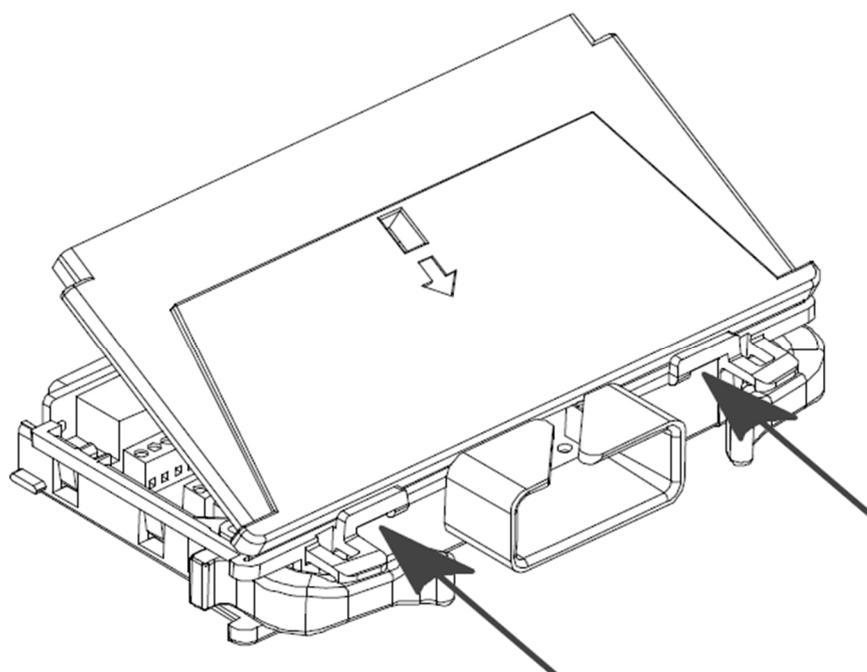
Fonte: Contemp, 2018.

Todos os fios devem ser conectados nos *bornes* e organizados de forma a ficarem firmes e seguros. Recomenda-se prender os fios na placa com uma braçadeira de nylon, para que os mesmos fiquem presos sem que os fios sejam forçados no encaixe dos *bornes*. (Figura 13)

Figura 13 – Organização dos fios.

Fonte: Agilent Technologies, Inc. 2017.

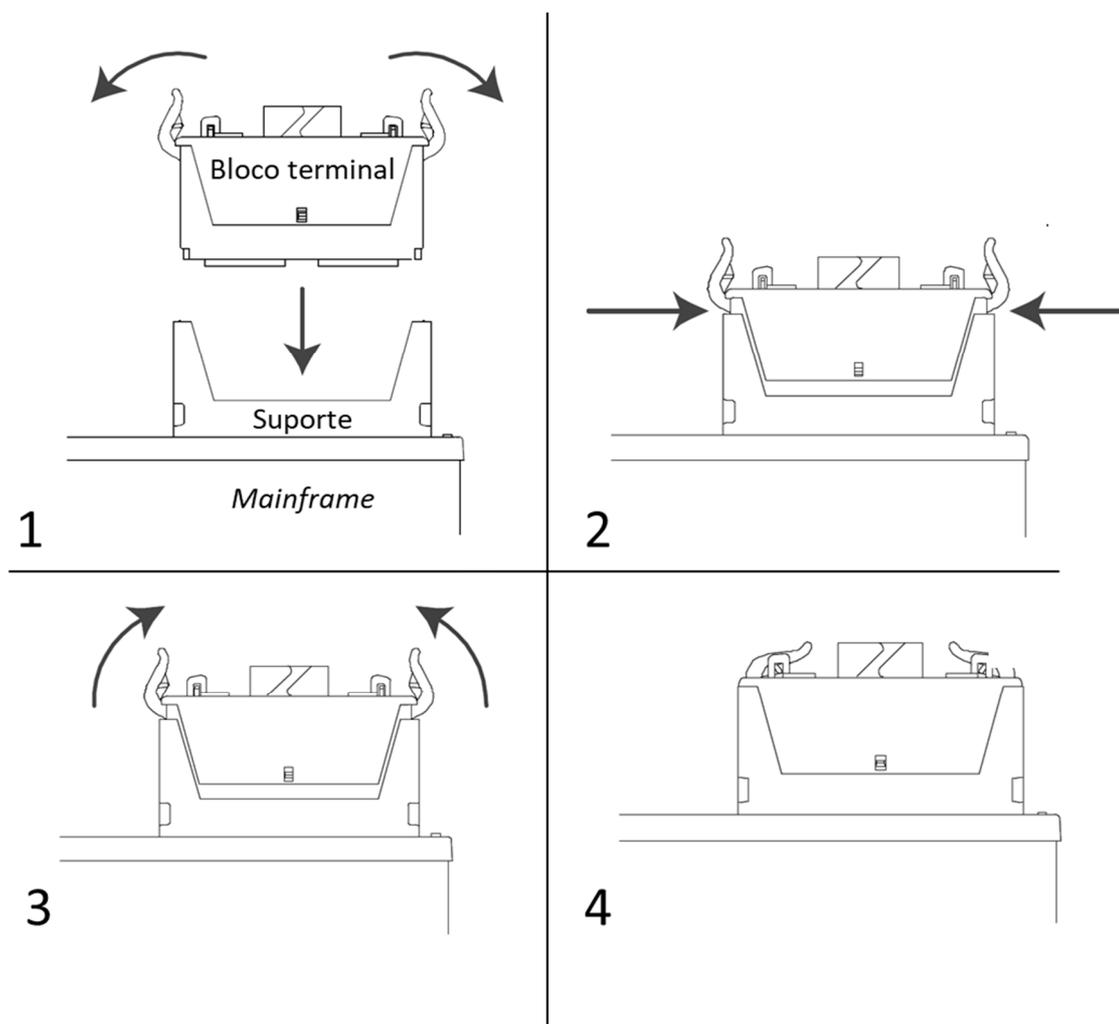
Com todos os fios dos sensores ligados nas suas polaridades corretas e identificados a capa do terminal pode ser colocada novamente no bloco e o mesmo pode ser encaixado no *mainframe*. (Figura14). Para colocar a capa deve-se encaixá-la no terminal da forma indicada e empurrá-la para baixo até que a mesma trave.

Figura 14 – Encaixe da tampa.

Fonte: Agilent Technologies, Inc. 2017.

Por fim o bloco terminal pode ser acoplado ao módulo seguindo os procedimentos descritos na Figura 15.

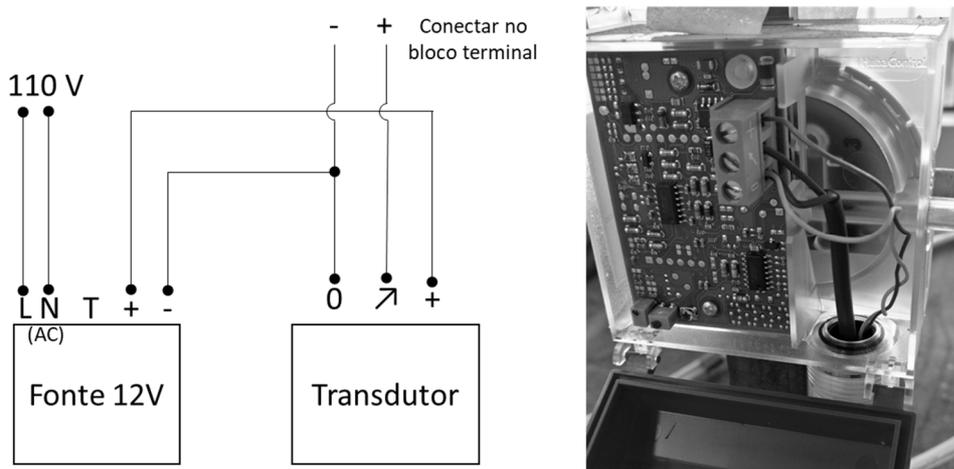
Figura 15 – Procedimento para acoplamento do bloco terminal no módulo.



Fonte: Adaptação de Agilent Technologies, Inc. 2017.

Por fim, tem-se que preparar o transdutor para que ele seja capaz de realizar as medidas de pressão. A ligação do transdutor envolve a conexão do sensor a uma fonte que no caso do transdutor desse manual, é necessária uma fonte de 11 a 33V. A ligação é realizada seguindo o esquema da esquerda da Figura 16, à direita está a ligação realizada no sensor propriamente dito. É preciso atentar-se para o sinal dos fios a serem conectados no bloco terminal, dessa forma o negativo é conectado ao L e o positivo ao I.

Figura 16 Esquema de Ligação do Transdutor.

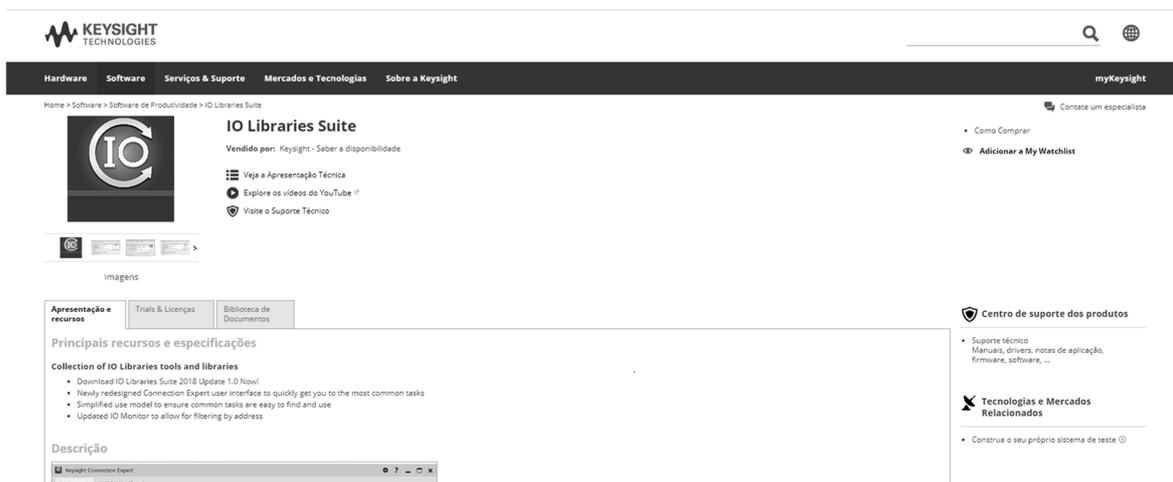


Fonte: Próprio autor.

4.1.2. Software

Nessa fase serão instaladas as bibliotecas e o programa necessário para fazer a conexão do computador ao mainframe. Primeiramente de posse de um computador que atenda aos requisitos do item 3.1 é preciso entrar no site da © Keysight Technologies e buscar pela última versão da *IO Libraries Suite* disponível em Produtos e Serviços > *Design* > *Test Software* > Software de Produtividade > *IO Libraries Suite*. (Figura 17) Nessa página é feita a *download* e a instalação da biblioteca.

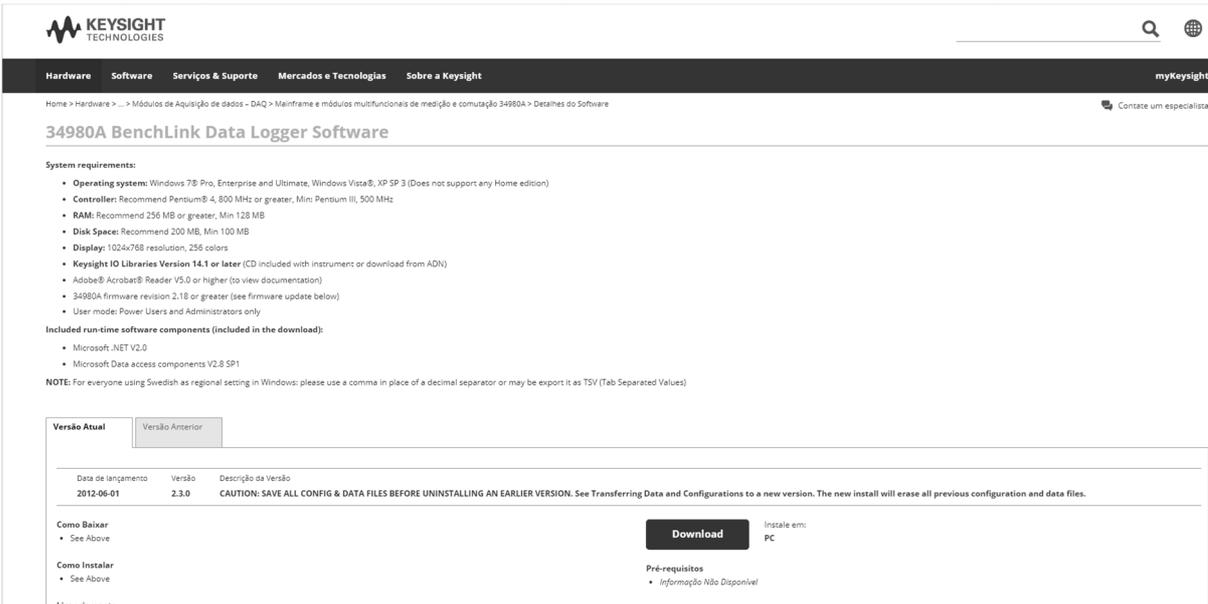
Figura 17 – Página do *IO Libraries Suite*.



Fonte: © Keysight Technologies, 2018.

Após instalado o *IO Libraries Suite* vá no mesmo site e procure pelo *software 34980A BenchLink Data Logger*, que pode ser encontrado em *Produtos e Serviços > Data Acquisition - DAQ > Produtos > Mainframe* e módulos multifuncionais de medição e comutação *34980A > Suporte Técnico > Driver, Firmware e Software > 34980A BenchLink Data Logger Software*. (Figura 18) Nessa página faça o download e a instalação do programa.

Figura 18 – Página do programa *BenchLink Data Logger*.



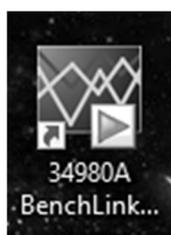
The screenshot shows the Keysight Technologies website interface. At the top, there is a navigation bar with links for Hardware, Software, Serviços & Suporte, Mercados e Tecnologias, and Sobre a Keysight. The main content area is titled "34980A BenchLink Data Logger Software". Below the title, there are sections for "System requirements" and "Included run-time software components (included in the download)". A "Download" button is prominently displayed. Below the button, there is a table with columns for "Data de lançamento", "Versão", and "Descrição da Versão". The table shows a release on 2012-06-01 for version 2.3.0. A warning message states: "CAUTION: SAVE ALL CONFIG & DATA FILES BEFORE UNINSTALLING AN EARLIER VERSION. See Transferring Data and Configurations to a new version. The new install will erase all previous configuration and data files." There are also links for "Como Baixar" and "Como Instalar".

Data de lançamento	Versão	Descrição da Versão
2012-06-01	2.3.0	CAUTION: SAVE ALL CONFIG & DATA FILES BEFORE UNINSTALLING AN EARLIER VERSION. See Transferring Data and Configurations to a new version. The new install will erase all previous configuration and data files.

Fonte: © Keysight Technologies, 2018.

Após a instalação da biblioteca e do programa já é possível realizar a conexão do computador com o Agilent. Acesse o ícone do *BenchLink* que foi criado na área de trabalho. (Figura 19)

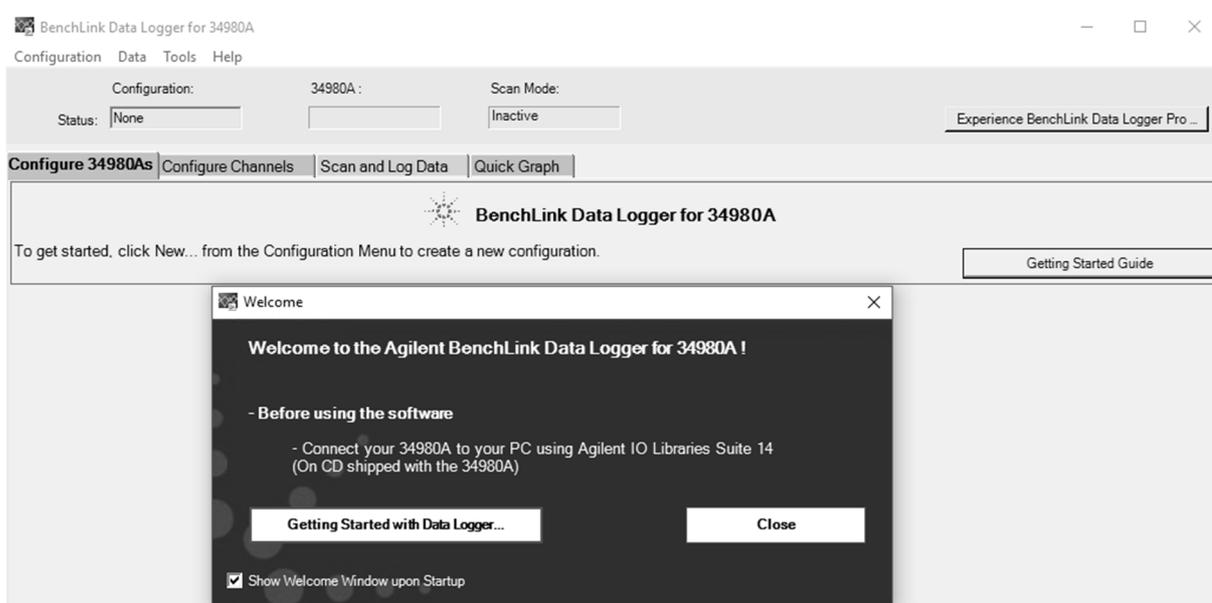
Figura 19 – Ícone do programa *BechLink*.



Fonte: Próprio autor.

Quando o programa abrir aparecerá a página da Figura 20, o aviso de boas-vindas pode ser fechado no botão close.

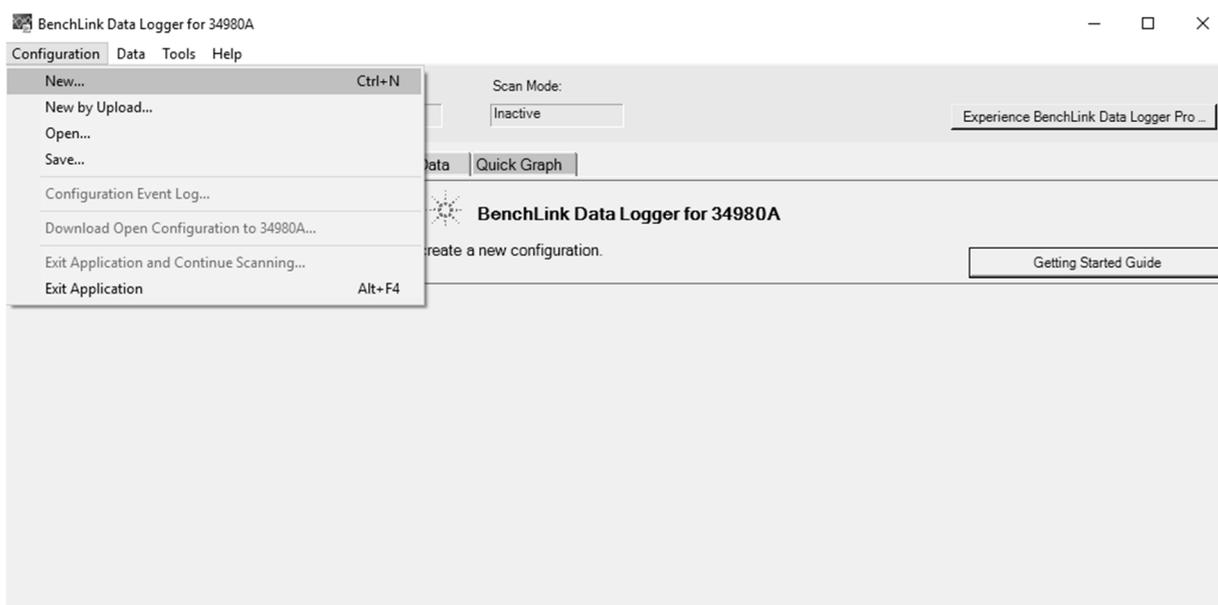
Figura 20 – Página inicial do programa.



Fonte: Próprio autor.

O primeiro passo é criar uma configuração. Vá na aba *configuration* na opção *new*. (Figura 21)

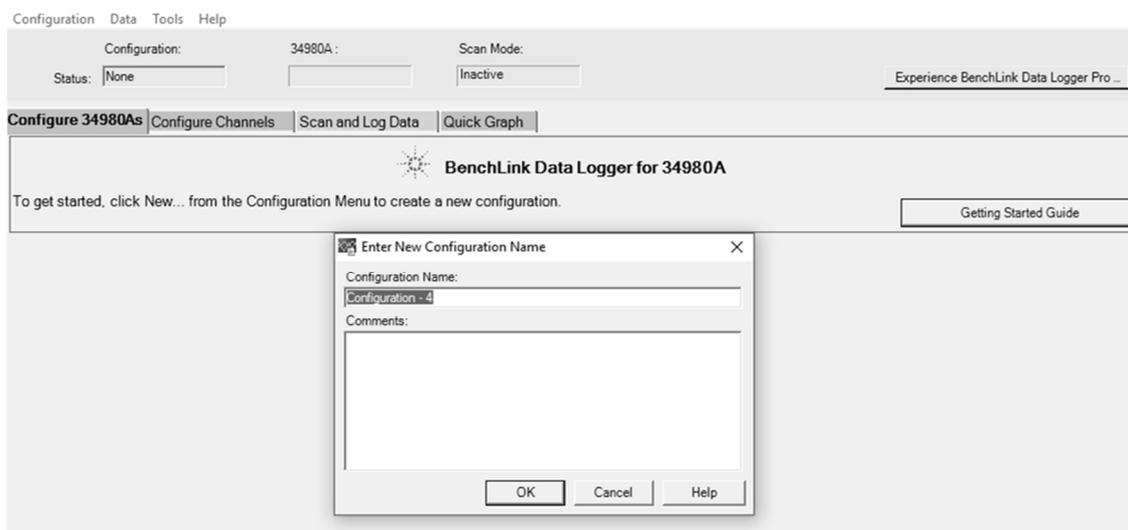
Figura 21 – Selecionando uma nova configuração.



Fonte: Próprio autor.

É preciso dar um nome para a configuração a ser criada, de preferência um nome baseado no dia e na medição a ser realizada. (Figura 22)

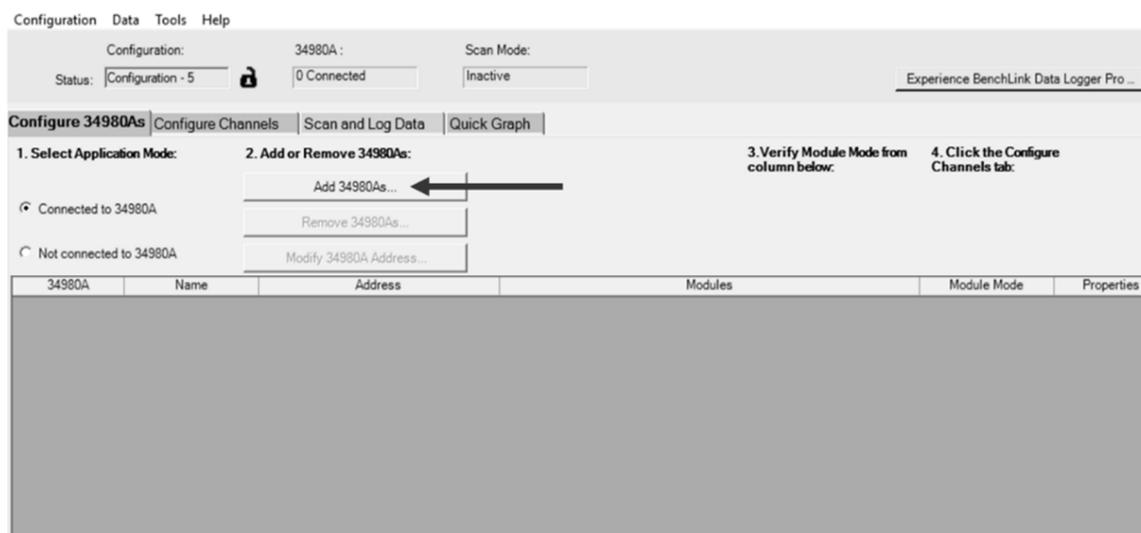
Figura 22 – Criando uma configuração.



Fonte: Próprio autor.

Com a configuração nomeada, pode-se ver as opções para a configuração. A primeira seleciona o modo de aplicação, no caso aqui é conectar ao 34980A, conforme está apresentado na Figura 23. Na segunda pode-se adicionar ou remover *mainframes* que estejam conectados, nessa opção pode-se conectar ao *mainframe* clicando no botão *Add 34980As*.

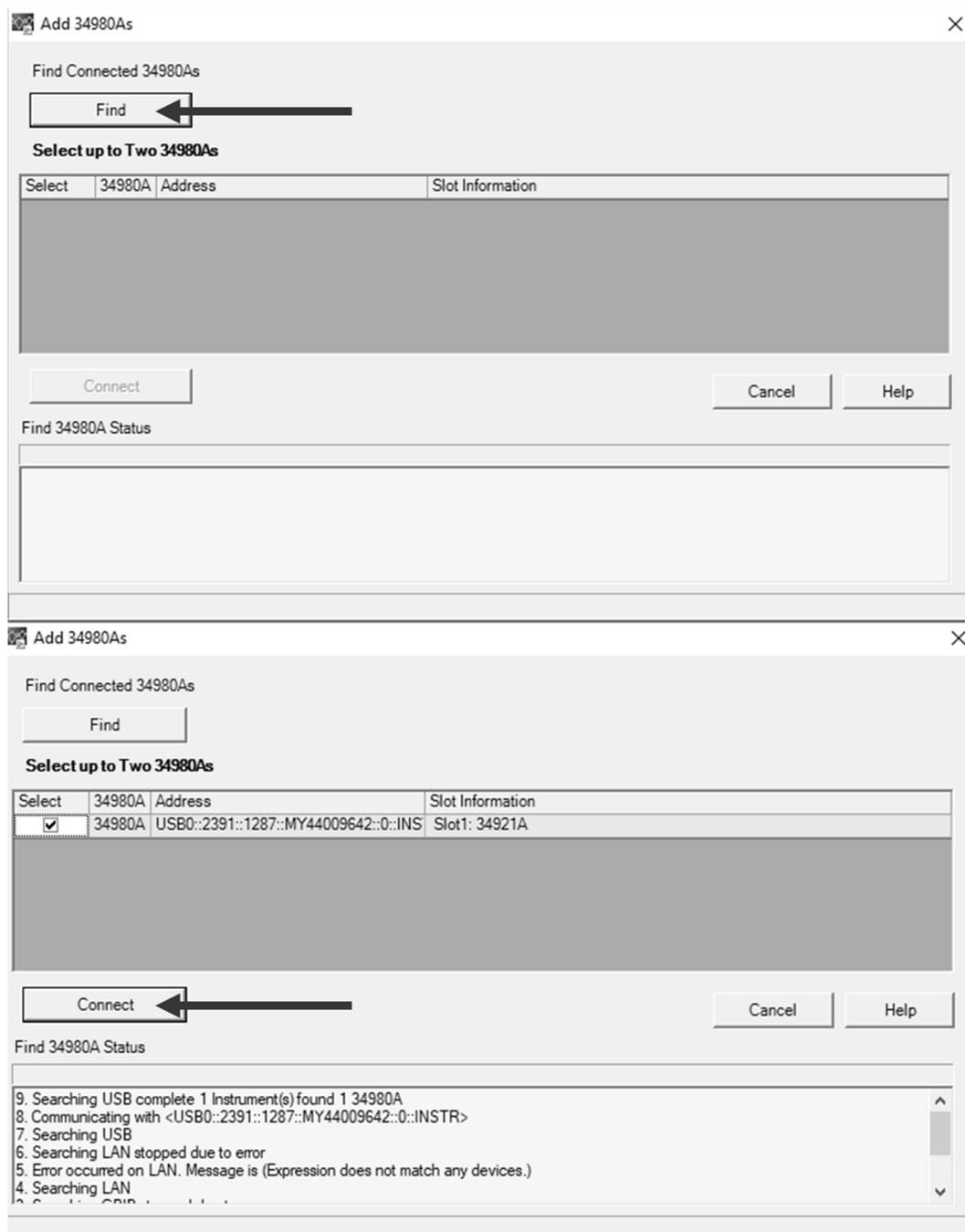
Figura 23 – Opções de configuração.



Fonte: Próprio autor.

Ao clicar no *Add 34980As* aparecerá a janela para conexão (Figura 24). Nela é preciso clicar no botão *Find* para encontrar o *mainframe*. O mesmo aparecerá no quadro e deve ser selecionado na caixa de seleção, para então clicar em conectar e finalizar o processo. Para que o programa encontre o *mainframe*, ele deve estar conectado ao computador pelo cabo USB e ligado a energia.

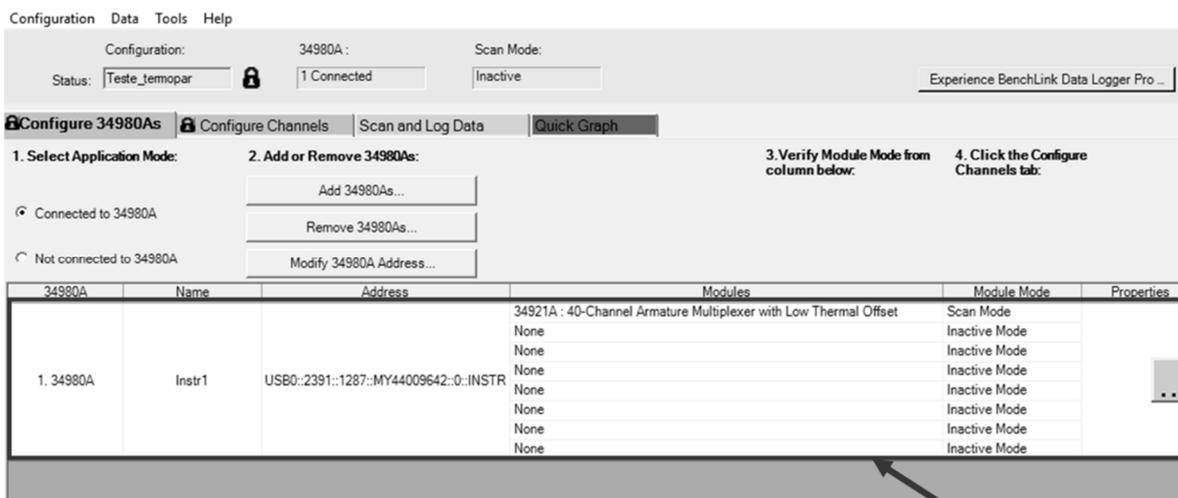
Figura 24 – Janela de conexão.



Fonte: Próprio autor.

Após conectado repare que o *mainframe* agora consta na página de opções de configurações. (Figura 25)

Figura 25 – Opções de configuração com o *mainframe* conectado.



Fonte: Próprio autor.

O próximo passo é configurar os canais na aba *Configure Channels*, conforme apresentado na Figura 26, nessa aba é preciso destacar as portas do bloco terminal que estão sendo usadas e o que tipo de sensor está conectado a cada porta. Nessa fase é importante a identificação dos termopares recomendadas na fase de conexão dos fios no bloco terminal no item 4.1.1.

Figura 26 – Aba de configuração de canais.

Channels	Enable Channel		Measurement				Scaling (Mx + B)			Alarm Limits					
	Scan	Name	Function	Range/Ref	Res	More	Scale	Gain (M)	Offset(B)	Label	Test	Low	High	Hw/Alarm	More
34980A															
1. Instr1															
34921A															
1001	<input checked="" type="checkbox"/>		Temp (Type J)	Internal	C	More	<input type="checkbox"/>	1	0	C	Off	0	1	Alarm 1	...
1002	<input checked="" type="checkbox"/>		Temp (Type J)	Internal	C	More	<input type="checkbox"/>	1	0	C	Off	0	1	Alarm 1	...
1003	<input checked="" type="checkbox"/>		Temp (Type J)	Internal	C	More	<input type="checkbox"/>	1	0	C	Off	0	1	Alarm 1	...
1004	<input checked="" type="checkbox"/>		Temp (Type J)	Internal	C	More	<input type="checkbox"/>	1	0	C	Off	0	1	Alarm 1	...
1005	<input checked="" type="checkbox"/>		Temp (Type J)	Internal	C	More	<input type="checkbox"/>	1	0	C	Off	0	1	Alarm 1	...
1006	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1007	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1008	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1009	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1010	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1011	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1012	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1013	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1014	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1015	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1016	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1017	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1018	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...

Fonte: Próprio autor.

Na aba de configuração de canais todas as portas do bloco terminal são apresentadas. O usuário deve marcar na caixa de seleção *Scan* todas as portas que foram conectados sensores e definir qual é a função, a referência ou range e a unidade. Na Figura 26 tem-se cinco termopares conectados nas portas de 1 a 5 do bloco terminal, repare que para ligação de termopares deve-se selecionar Temp. e o tipo de termopar utilizada, no caso o J. A referência de medição do termopar é colocada como interna e a unidade de medição escolhida foi o Celsius. O canal é nomeado com quatro dígitos, o primeiro se refere ao slot onde o módulo foi conectado, os dois últimos são referentes a porta conforme descrito no item 4.1.1. No caso da ligação do transdutor de pressão as portas disponíveis são as da 41 a 44 (Figura 27), a função acionada é a de corrente em DC (Corrente contínua) e o range é de 10mA. O range é definido de acordo com a escala apresentada no transdutor.

Figura 27 – Aba de configurações de canais das portas dos transdutores de pressão.

Configuration Data Tools Help

Configuration: 34980A : Scan Mode: Configuration - 2 1 Connected Inactive Experience BenchLink Data Logger Pro ...

Configure 34980As **Configure Channels** Scan and Log Data Quick Graph

Channels	Enable Channel		Measurement					Scaling (Mx + B)			Alarm Limits				
	Scan	Name	Function	Range/Ref	Res	More	Scale	Gain (M)	Offset(B)	Label	Test	Low	High	Hw/Alarm	More
34980A															
1027	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1028	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1029	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1030	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1031	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1032	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1033	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1034	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1035	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1036	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1037	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1038	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1039	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1040	<input type="checkbox"/>		DC Voltage	Auto	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	VDC	Off	0	1	Alarm 1	...
1041	<input checked="" type="checkbox"/>		DC Current	10 mA	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	ADC	Off	0	1	Alarm 1	...
1042	<input checked="" type="checkbox"/>		DC Current	10 mA	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	ADC	Off	0	1	Alarm 1	...
1043	<input checked="" type="checkbox"/>		DC Current	10 mA	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	ADC	Off	0	1	Alarm 1	...
1044	<input checked="" type="checkbox"/>		DC Current	10 mA	5.5	...	<input type="checkbox"/>	1	0	ADC	Off	0	1	Alarm 1	...
Computed Channel															

Fonte: Próprio autor.

4.2. Medição

Após a preparação de todos os sensores na aba de configuração, deve-se colocar os parâmetros de medição na aba *Scan and Log Data*. (Figura 28) Observe

que todos os sensores colocados na aba de canais estarão na listados na ordem de escaneamento.

Figura 28 – Aba de escaneamento.

Configuration Data Tools Help

Configuration: 34980A : Scan Mode: Experience BenchLink Data Logger Pro ...

Status: Configuration - 2 1 Connected Inactive

Configure 34980As Configure Channels **Scan and Log Data** Quick Graph

34980A	Scan Control				Scan Order		Data Control			Start/Stop	Scan Status	
	Set	Start	Interval	Stop	Set	Order	Set	Name	Export Data		Scan#	Elapsed Time
1. Instr1		Immediately	00:00:05.00	User		Channel		Data <Instrument Name> <Date ><Time>	Auto		Not Scanning	Not Scanning

Last Scan Results								
	34980A	Channel	Scan Order	Measurement	Data	Alarm	Min	Max
1	<1.Instr1>	1001	1	Temp (Type J)				
2	<1.Instr1>	1002	2	Temp (Type J)				
3	<1.Instr1>	1003	3	Temp (Type J)				
4	<1.Instr1>	1004	4	Temp (Type J)				
5	<1.Instr1>	1005	5	Temp (Type J)				
6	<1.Instr1>	1021	6	Temp (Type J)				
7	<1.Instr1>	1022	7	Temp (Type J)				
8	<1.Instr1>	1023	8	Temp (Type J)				
9	<1.Instr1>	1024	9	Temp (Type J)				
10	<1.Instr1>	1025	10	Temp (Type T)				
11	<1.Instr1>	1041	11	DC Current				
12	<1.Instr1>	1042	12	DC Current				
13	<1.Instr1>	1043	13	DC Current				
14	<1.Instr1>	1044	14	DC Current				

Fonte: Próprio autor.

Na aba de escaneamento pode-se definir vários aspectos sobre a medições e coleta de dados clicando nos botões indicados na Figura 29.

Figura 29 – Botões para configuração da medição.

Configuration - 2 - BenchLink Data Logger for 34980A

Configuration Data Tools Help

Configuration: 34980A : Scan Mode: Experience BenchLink Data Logger Pro ...

Status: Configuration - 2 1 Connected Inactive

Configure 34980As Configure Channels **Scan and Log Data** Quick Graph

34980A	Scan Control				Scan Order		Data Control			Start/Stop	Scan Status	
	Set	Start	Interval	Stop	Set	Order	Set	Name	Export Data		Scan#	Elapsed Time
1. Instr1		Immediately	00:00:05.00	User		Channel		Data <Instrument Name> <Date ><Time>	Auto		Not Scanning	Not Scanning

Last Scan Results								
	34980A	Channel	Scan Order	Measurement	Data	Alarm	Min	Max
1	<1.Instr1>	1001	1	Temp (Type J)				
2	<1.Instr1>	1002	2	Temp (Type J)				

1. **When Start Button Pressed, Start Scanning**

Immediately

On External Trigger

On Alarm

Alarm 1:

At Time

Date: 26/08/2018 Time: 15:46:25

Interval (Time Between Scans)

HH: MM: SS: mSec: : : .

2. **Scan Order**

1001
1002
1003
1004
1005
1021
1022
1023
1024
1025
1041
1042
1043
1044

Restore to Sequential Channel Order

3. **Set Datalog Fields**

Automatically generate the datalog name from the template: Edit Template...

Name: Data <Instrument Name> <Date> <Time>

Owner: jadas

Automatically export to csv during scan:

Folder: C:\Users\jadas\Documents Browse...

Comments:

Fonte: Próprio.

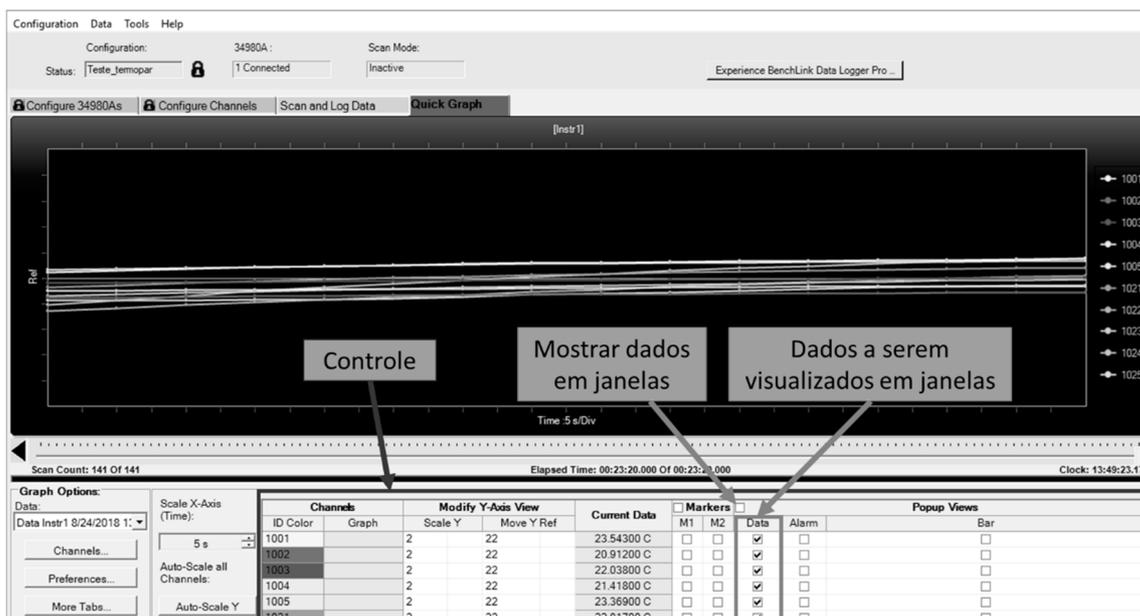
A primeira janela da Figura 29 define os parâmetros de controle do escaneamento quando ele se inicia, qual intervalo entre as medições e quando ele para as medições. Suas opções estão apresentadas na Figura 30, onde tem-se que o escaneamento se iniciará assim que o botão de início for pressionado, o intervalo das medições será de 5 segundos e as medições só se encerrarão quando o usuário pressionar o botão de fim.

Figura 30 – Janela de controle de escaneamento.

Fonte: Próprio autor.

A segunda janela da Figura 29 define a ordem de varredura dos sensores na qual as medições serão realizadas. E por fim a terceira janela define o nome da pasta criada para armazenar os dados coletados e onde esses dados serão salvos no computador. Assim para iniciar as medições basta apertar o botão Start/Stop e a varredura se iniciará. Durante a varredura é normal que o mainframe faça barulhos estalados durante cada varredura. Os valores medidos podem ser acompanhados na aba *Quick Graph* (Figura 31)

Figura 31 – Aba Quick Graph.



Fonte: Próprio autor.

Nessa aba os sensores são identificados por cores e é possível visualizar a medida atual na região denominada controle na Figura 31. Para facilitar a visualização é possível marcar os dados que o usuário deseja visualizar em forma de janela. Caso essa seja marcada os valores medidos aparecem conforme a Figura 32.

Figura 32 – Janelas de medição da aba Quick Graph.



Fonte: Próprio autor.

4.3. Exportação dos dados

Após a realização das medições é preciso exportar os dados para tabelas que possam ser trabalhadas a posteriori. Para isso é preciso parar as medições na aba *Scan and Log Data* no botão *Start/Stop*. Automaticamente ao parar as medições aparecerá uma janela que possibilita a exportação dos dados, conforme apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Janela de exportação de dados.

Export Data

Datalog Summary

Name: Data Instr1 9/4/2018 11:04:45

Scans: 16

Start Time: 9/4/2018 11:04:45 AM

Stop Time: 9/4/2018 11:06:00 AM

Format Options

Column Separator: Semicolon [;]

Decimal Symbols: Comma [,]

Include Configuration

Options...

Select Rows to Export

All Scans

Filter by Scan Number

Filter by Time

Total Rows (with Header): 36

Select Columns to Export

Scan Number

Channel Alarm

Start Time

Include Milliseconds

Elapsed Time

Include Milliseconds

Select by Channel

1001

1002

1003

1004

1005

1006

1007

Select All Unselect All

Select by Function Type:

Temperature

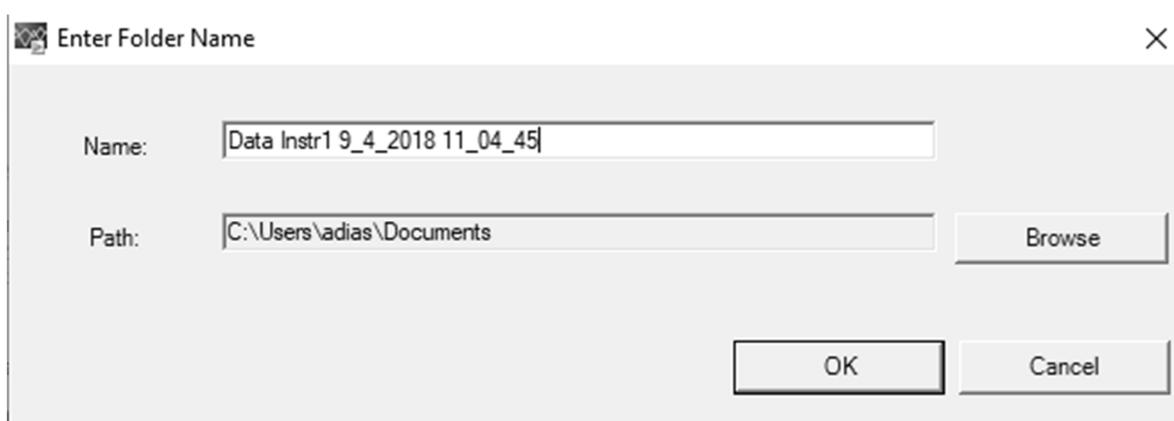
Total Columns 22

Export to File... Export to Clipboard Close Help

Fonte: Próprio autor.

Dentro da janela de exportação de dados é aconselhado utilizar o ponto e vírgula como separador das colunas, a fim de facilitar a identificação dos dados pelo Excel. Quanto ao separador decimal pode-se utilizar o que estiver configurado no computador com o qual os dados serão trabalhados. Também é possível escolher os dados e os sensores que vão ser exportados nas opções da região *Select Columns to Export*. Com todas as opções configuradas é só clicar em *Export to file*, o programa vai mostrar a janela apresentada na Figura 34, onde o usuário colocará o nome do arquivo, o seu destino e confirmará a exportação.

Figura 34 – Janela de nome e local do arquivo.



Fonte: Próprio autor.

O arquivo será salvo no local escolhido pelo usuário ou na pasta documentos que é o caminho padrão do arquivo. O Excel estará em uma pasta com o nome dado ao conjunto de dados e após aberto terá o aspecto da Figura 35. Os dados terão as informações pedidas pelo usuário e seguirão a nomenclatura das portas de cada canal definido de medição.

Figura 35 – Aspecto do arquivo exportado corretamente para o Excel.

Channel	Name	Function	Range	Resolution	AdvSettin	Scale	Gain	Offset	Label	Test	Low	High	HWAlarm
8	1001	Temp (Tyf	None	C	Temp (Tyf	False	1	0	C	Off	0	0	1 Alarm 1
9	1002	Temp (Tyf	None	C	Temp (Tyf	False	1	0	C	Off	0	0	1 Alarm 1
10	1003	Temp (Tyf	None	C	Temp (Tyf	False	1	0	C	Off	0	0	1 Alarm 1
11	1004	Temp (Tyf	None	C	Temp (Tyf	False	1	0	C	Off	0	0	1 Alarm 1
12	1005	Temp (Tyf	None	C	Temp (Tyf	False	1	0	C	Off	0	0	1 Alarm 1
13	1021	Temp (Tyf	None	C	Temp (Tyf	False	1	0	C	Off	0	0	1 Alarm 1
14	1022	Temp (Tyf	None	C	Temp (Tyf	False	1	0	C	Off	0	0	1 Alarm 1
15	1023	Temp (Tyf	None	C	Temp (Tyf	False	1	0	C	Off	0	0	1 Alarm 1
16	1024	Temp (Tyf	None	C	Temp (Tyf	False	1	0	C	Off	0	0	1 Alarm 1
17	1025	Temp (Tyf	None	C	Temp (Tyf	False	1	0	C	Off	0	0	1 Alarm 1

Scan Order	Time	1001 (C)	Alarm 100 1002 (C)	Alarm 100 1003 (C)	Alarm 100 1004 (C)	Alarm 100 1005 (C)	Alarm 100 1021 (C)	Alarm 102 1022 (C)	Alarm 102 1023 (C)	Alarm 102 1024 (C)	Alarm 102 1025 (C)	Alarm 1025									
21	1 8/24/2018	23,175	0	22,907	0	22,995	0	23,058	0	23,716	0	23,909	0	24,392	0	23,45	0	23,96	0		
22	2 8/24/2018	23,184	0	22,892	0	22,993	0	23,037	0	23,702	0	23,943	0	24,375	0	24,266	0	23,523	0	23,996	0
23	3 8/24/2018	23,19	0	22,909	0	22,994	0	23,043	0	23,72	0	23,987	0	24,415	0	24,285	0	23,615	0	24,049	0
24	4 8/24/2018	23,179	0	22,896	0	22,99	0	23,058	0	23,716	0	24,006	0	24,398	0	24,293	0	23,662	0	24,011	0
25	5 8/24/2018	23,184	0	22,917	0	23,005	0	23,058	0	23,735	0	23,995	0	24,409	0	24,299	0	23,702	0	24,028	0
26	6 8/24/2018	23,197	0	22,929	0	23,015	0	23,072	0	23,743	0	24,009	0	24,439	0	24,307	0	23,766	0	24,056	0
27	7 8/24/2018	23,22	0	22,943	0	23,029	0	23,088	0	23,767	0	24,038	0	24,449	0	24,331	0	23,815	0	24,053	0
28	8 8/24/2018	23,19	0	22,915	0	23,02	0	23,073	0	23,771	0	24,019	0	24,445	0	24,325	0	23,834	0	24,055	0
29	9 8/24/2018	23,205	0	22,934	0	23,028	0	23,081	0	23,769	0	24,018	0	24,465	0	24,344	0	23,88	0	24,061	0
30	10 8/24/2018	23,202	0	22,911	0	23,014	0	23,083	0	23,765	0	24,027	0	24,47	0	24,331	0	23,905	0	24,09	0
31	11 8/24/2018	23,209	0	22,894	0	23,003	0	23,087	0	23,758	0	24,031	0	24,449	0	24,329	0	23,932	0	24,08	0
32	12 8/24/2018	23,198	0	22,917	0	23,014	0	23,056	0	23,739	0	24,054	0	24,44	0	24,337	0	23,97	0	24,094	0
33	13 8/24/2018	23,188	0	22,907	0	22,991	0	23,049	0	23,754	0	24,027	0	24,444	0	24,321	0	23,974	0	24,09	0
34	14 8/24/2018	23,175	0	22,892	0	22,991	0	23,054	0	23,748	0	24,016	0	24,459	0	24,337	0	23,979	0	24,087	0
35	15 8/24/2018	23,161	0	22,886	0	22,982	0	23,045	0	23,744	0	23,993	0	24,448	0	24,306	0	23,97	0	24,018	0

Fonte: Próprio autor.

Também é possível acessar os dados através da aba Data, na opção *Data Manager*, conforme apresentado na Figura 36.

Figura 36 – Selecionando a gestão dos dados.

Order	Set	Name	Export Data	Start/Stop	Scan#	Elapsed Time
Channel	...	Data <Instrument Name> <Date> <Time>	Auto	[Start/Stop]	Not Scanning	Not Scanning

Order	Channel	Scan Order	Measurement	Data	Alarm	Min	Max
1	<1.Instr1>	1001	Temp (Type J)				
2	<1.Instr1>	1002	Temp (Type J)				
3	<1.Instr1>	1003	Temp (Type J)				
4	<1.Instr1>	1004	Temp (Type J)				
5	<1.Instr1>	1005	Temp (Type J)				
6	<1.Instr1>	1021	Temp (Type J)				
7	<1.Instr1>	1022	Temp (Type J)				
8	<1.Instr1>	1023	Temp (Type J)				
9	<1.Instr1>	1024	Temp (Type J)				
10	<1.Instr1>	1025	Temp (Type T)				

Fonte: Próprio autor.

Uma vez na janela de gestão de dados, mostrada na Figura 37, é possível selecionar o conjunto de dados que precisa ser exportado e fazer a exportação através do botão *Export Data*.

Figura 37 – Janela de gestão de dados.



Fonte: Próprio autor.

Assim, aparecerá a mesma janela de exportação de dados apresentada anteriormente na Figura 33. Dessa forma, é possível realizar a exportação de dados da mesma forma anteriormente descrita.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGILENT TECHNOLOGIES, INC. **Mainframe User's Guide**. 8. ed. 2017.

CONTEMP. **Termopares e Termo resistências**. 2018. Disponível em: < <http://www.contemp.com.br/fabricacao-de-termopares/> >. Acesso em: 25/08/2018.

© KEYSIGHT TECHNOLOGIES. **Home page**. 2018. Disponível em: < <https://www.keysight.com/br/pt/home.html> >. Acesso em: 25/08/2018.

APÊNDICE B – PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES

1. OBJETIVO

Calibrar os termopares em banho de óleo para as temperaturas de 15°C, 20°C, 25°C, 30°C, 35°C, 40°C, 45°C, 50°C e 52°C.

2. INTRODUÇÃO

O procedimento de calibração consiste em efetuar medições de um banho termostático nas temperaturas definidas para calibração, comparando as medições realizadas com o padrão e cada um dos termopares. As temperaturas avaliadas são definidas com base nas condições que serão encontradas no experimento. No caso desse procedimento, o instrumento para fazer a leitura dos termopares será o módulo de aquisição de dados da Agilent, entretanto essa medição pode ser realizada com auxílio de outro meio de leitura. Recomenda-se que a calibração seja realizada com o instrumento que será utilizado no experimento, além disso no caso do Agilent o ideal é que após a calibração dos termopares o bloco terminal onde os fios foram parafusados não sofra alterações.

3. EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

Para a calibração dos termopares serão necessários os seguintes componentes:

- Computador;
- *Mainframe*;
- Módulo 34921T 40-Ch Arm MUX;

- Bloco terminal;
- Chaves para fixação;
- Termopares;
- Termômetro de bulbo de mercúrio;
- Banho termostático;

3.1. Computador

Os requisitos do computador devem seguir os mesmos necessários para que consiga se conectar ao Agilent, uma vez que ele será utilizado para fazer a leitura dos termopares. Portanto o computador precisa possuir os seguintes requisitos:

- Sistema Operacional: *Windows 10 Pro, Windows 7 Pro, Enterprise e Ultimate, Windows Vista, XP SP 3.* (Não é compatível com *Home edition*);
- Processador: Recomendado: *Pentium 4 800MHz* ou maior. Mínimo *Pentium III, 500MHz*;
- RAM: Recomendado: 256MB ou maior. Mínimo de 128MB;
- Espaço de disco: Recomendado 200MB. Mínimo 100MB;
- Display: 1024x768 resolução, 256 cores;
- Última versão do *Keysight IO Libraries*;
- Adobe Acrobat Reader V5.0 ou maior.

3.2. Mainframe

Mainframe Agilent 34980A (Figura 2) com o cabo de energia e o cabo USB. O módulo deve estar com *slots* vagos para colocar os módulos a serem utilizados.

Figura 2 – Mainframe Agilent 34980A.



Fonte: Próprio autor.

3.3. Módulo 34921T 40-Ch Arm MUX

Módulo 34921T 40-Ch Arm MUX com o suporte de manga para fixação do bloco terminal. Esse modulo comporta 4 canais para medição de corrente e 40 para medição de voltagem.

3.4. Bloco terminal

Bloco terminal disponível e com a quantidade de canais necessárias para a aplicação.

3.5. Chaves para fixação

Será necessária uma chave *philips* média para fixação do módulo no mainframe e uma chave de fenda pequena para fixar os fios dos sensores nos bornes Termopares;

3.6. Termopares

O Agilent suporta qualquer tipo de termopar, portanto ele deve ser escolhido tanto pela faixa de trabalho da medição a ser realizada, quanto pelo custo do equipamento.

3.7. Termômetro de bulbo de mercúrio

O termômetro de bulbo de mercúrio é o padrão utilizado para calibração e sua faixa deve ser condizente com a escolhida para a calibração. Para essa aplicação foi utilizado o termômetro com leitura de -10°C a 52°C (Figura 2), cujo certificado de calibração pode ser encontrado no ANEXO A.. Caso necessário é possível utilizar mais de um padrão para atender completamente a faixa de calibração definida.

Figura 2 – Termômetro de bulbo de mercúrio com faixa de -10°C a 52°C .



Fonte: Próprio autor.

3.8. Banho termostático

O banho termostático é um aparelho de manutenção de temperatura constante, que torna possível a comparação do instrumento a ser calibrado com o padrão. O banho termostático utilizado é o modelo C35 da fabricante HAAKE. (Figura 3)

Figura 3 – Banho termostático.

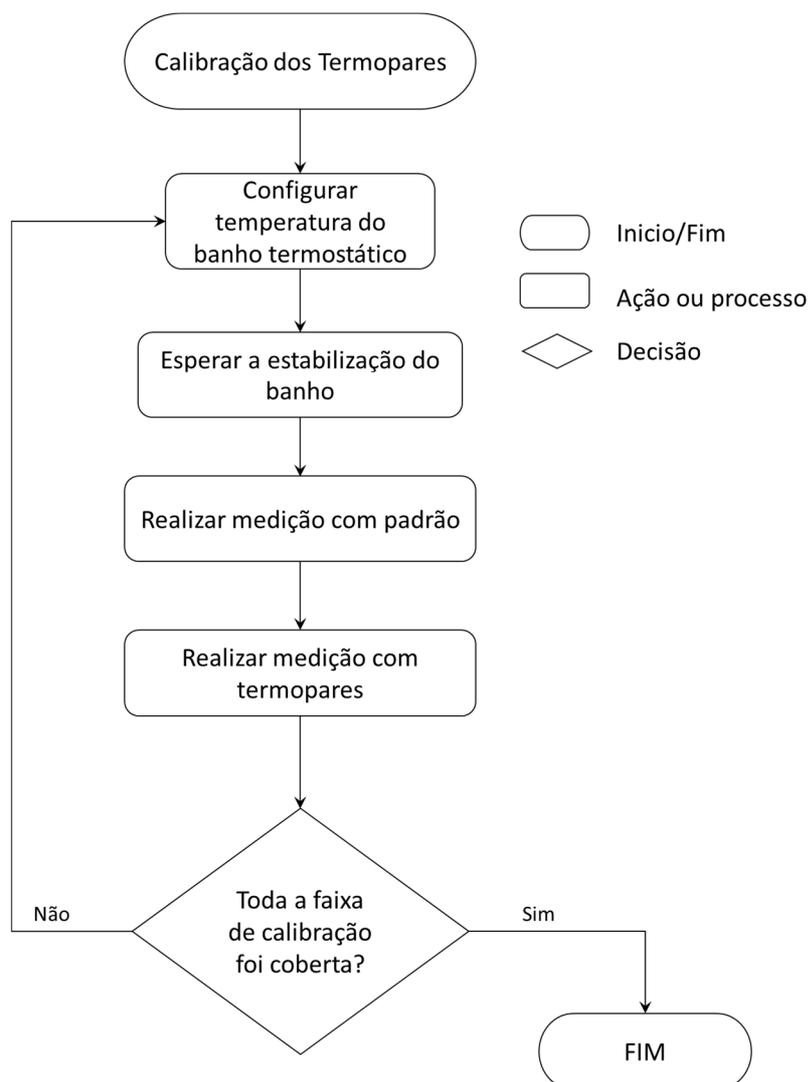


Fonte: Próprio autor.

4. PROCEDIMENTO

O procedimento de calibração está apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma básico do procedimento de calibração.



Fonte: Próprio autor.

Para configurar a temperatura do banho é preciso pressionar a tecla T, indicada na Figura 5 como 1. Assim aparecerá o valor definido como objetivo do controlador do aparelho, esse valor pode ser alterado pelas setas apontadas na figura como 2. Quando o valor estiver correto com o desejado deve-se apertar a tecla *enter* identificada como 3 na figura. Recomenda-se que a varredura de calibração se inicie das temperaturas mais baixas e siga progressivamente até as mais altas, uma vez que o processo de aquecimento do banho é mais rápido do que o de resfriamento.

Figura 5 – Menu do banho termostático.

Fonte: Próprio autor.

O tempo de estabilização do banho varia com a diferença entre o valor definido pelo usuário e a temperatura atual apresentada no display do aparelho. Entretanto de uma maneira geral seu comportamento normal pode ser definido. Quando o banho está aquecendo para chegar na temperatura desejada, ele costuma ultrapassar a temperatura por volta de $0,2^{\circ}\text{C}$, retornando, logo depois, ao valor desejado. Quando ele retorna a sua temperatura objetivo, o valor do display tende a ficar constante, ou seja, estabilizado. Entretanto é de boa prática definir um tempo de estabilização após o retorno a temperatura de pelo menos dois minutos. Feito isso remove-se a tampa do banho e realiza-se a medição do banho com o padrão, no caso o termômetro de bulbo, seguindo a profundidade de mergulho apontada pelo certificado de calibração do aparelho. Logo após a medida do termômetro de bulbo, pode-se realizar a medida com os termopares, mergulhando-os no banho e aguardando a estabilização da sua leitura no computador. Após a estabilização deve-se armazenar os valores medidos, retirar os termopares e mergulhá-los novamente, repetindo esse processo o número de ciclos definido para a calibração. Quanto mais ciclos mais a incerteza tende a diminuir, entretanto o volume de trabalho aumenta, dessa forma para esse trabalho foram realizados 5 ciclos de calibração para cada termopar. Por fim, após realizados

todos os ciclos de calibração, pode-se alterar a temperatura do banho e repetir o processo até que todas as temperaturas tenham sido varridas.

5. RELATÓRIO DA CALIBRAÇÃO DO TERMOPAR

Nesse tópico será apresentado o resultado esperado após o teste de calibração.

CALIBRAÇÃO TERMOPAR TIPO J

Calibração das temperaturas: 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 e 52°C

INSTRUMENTO PADRÃO

Dados do certificado de calibração do Padrão:

Termômetro de bulbo

Faixa de operação: -10°C a 52°C

Ciclos de calibração: n=3

Imersão: 80mm

Resolução: 0,1°C

Dados da Calibração: (5 pontos da faixa)

Tabela 1 - Correção do Padrão do Termômetro de Bulbo

Temperatura (°C)	Correção (°C)	U _{95%} (°C)
5,3	-0,1	±0,1
15,2	-0,3	±0,1
25,1	-0,3	±0,1
35,2	-0,4	±0,1
45,1	-0,3	±0,1

Fonte: Próprio autor.

INTERPOLAÇÃO LINEAR DOS RESULTADOS DE CALIBRAÇÃO DO PADRÃO

Os valores de Correção e de Incerteza para toda a faixa de temperatura necessitaram de **interpolação linear** para cada ponto da faixa de calibração. Além disso, é fundamental lembrar que $U_{95\%} = k_{95\%} \times u_{68\%}$. Sabendo que $k_{95\%} = 4,53$ para $v=2$ (3 ciclos), mas calibrador utilizou $k=2$.

Tabela 2 - Interpolação e Extrapolação dos Correções do Padrão

Controlador (°C)	$C_{\text{padrão}}$ (°C)	$U_{95\%}$ (°C)	$k_{\text{calibração}}$	$u_{68\%}$ (°C)
15	-0,3	$\pm 0,1$	2	$\pm 0,05$
20	-0,3	$\pm 0,1$	2	$\pm 0,05$
25	-0,3	$\pm 0,1$	2	$\pm 0,05$
30	-0,35	$\pm 0,1$	2	$\pm 0,05$
35	-0,4	$\pm 0,1$	2	$\pm 0,05$
40	-0,35	$\pm 0,1$	2	$\pm 0,05$
45	-0,3	$\pm 0,1$	2	$\pm 0,05$
50	-0,3	$\pm 0,1$	2	$\pm 0,05$
52	-0,3	$\pm 0,1$	2	$\pm 0,05$

Fonte: Próprio autor.

Fazendo as leituras com o padrão ($I_{\text{padrão}}$) para cada temperatura ajustada no controlador do banho termostático, é possível calcular o VVC.

$$VVC = I_{\text{padrão}} + C_{\text{padrão}}$$

Tabela 3 - Indicação do Padrão e Correção Segundo Certificado de Calibração.

(continua)

Controlador (°C)	$I_{\text{padrão}}$ (°C)	$C_{\text{padrão}}$ (°C)	VVC (°C)	$u_{68\%}$ (°C)
15	14,8	-0,3	14,5	$\pm 0,05$
20	19,8	-0,3	19,5	$\pm 0,05$

(conclusão)

Controlador (°C)	I _{padrão} (°C)	C _{padrão} (°C)	VVC (°C)	U _{68%} (°C)
25	24,9	-0,3	24,6	±0,05
30	30,0	-0,35	29,65	±0,05
35	35,0	-0,4	34,6	±0,05
40	40,0	-0,35	39,65	±0,05
45	45,0	-0,3	44,7	±0,05
50	50	-0,3	49,7	±0,05
52	52	-0,3	51,7	±0,05

Fonte: Próprio autor.

INSTRUMENTO A SER CALIBRADO

SM: Termopar tipo T acoplado ao Agilent.

Data da Calibração: 24/08/2018

Faixa de calibração: 15°C a 52°C

Resolução do Agilent: 0,001°C

Ciclos de Calibração: 5

CALIBRAÇÃO DO SENSOR

Sensor Termopar tipo T porta 1025

Tabela 4 - Medidas da Calibração do Sensor.

Controlador (°C)	VVC (°C)	I ₁ (°C)	I ₂ (°C)	I ₃ (°C)	I ₄ (°C)	I ₅ (°C)
15	14,5	14,244	14,295	14,23	14,218	14,301
20	19,5	19,214	19,184	19,263	19,207	19,269
25	24,6	24,384	24,319	24,357	24,378	24,322
30	29,65	29,326	29,309	29,319	29,348	29,355
35	34,6	34,522	34,503	34,435	34,455	34,459
40	39,65	39,574	39,56	39,583	39,569	39,543
45	44,7	44,56	44,546	44,565	44,586	44,583
50	49,7	49,718	49,719	49,706	49,708	49,688
52	51,7	51,778	51,734	51,729	51,673	51,717

Fonte: Próprio autor.

ANÁLISE DA CALIBRAÇÃO

Tabela 5 - Análise das Medidas para Calibração do Termopar.

Controlador (°C)	VVC (°C)	M _I (°C)	s (°C)	C (°C)
15	14,5	14,258	0,03807	0,242
20	19,5	19,227	0,03700	0,273
25	24,6	24,352	0,03047	0,248
30	29,65	29,331	0,01948	0,319
35	34,6	34,475	0,03622	0,125
40	39,65	39,566	0,01522	0,084
45	44,7	44,568	0,01663	0,132
50	49,7	49,708	0,01250	-0,008
52	51,7	51,726	0,03764	-0,026

Fonte: Próprio autor.

$$C = VVC - MI$$

APÊNDICE C – RELATÓRIO DE CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES

CALIBRAÇÃO TERMOPARES TIPO J E T

Calibração das temperaturas: 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 e 52°C

INSTRUMENTO PADRÃO

Dados do certificado de calibração do Padrão:

Termômetro de bulbo

Faixa de operação: -10°C a 52°C

Ciclos de calibração: n=3

Imersão: 80mm

Resolução: 0,1°C

Dados da Calibração: (5 pontos da faixa)

Tabela 1 - Correção do Padrão do Termômetro de Bulbo

Temperatura (°C)	Correção (°C)	$U_{95\%}$ (°C)
5,3	-0,1	$\pm 0,1$
15,2	-0,3	$\pm 0,1$
25,1	-0,3	$\pm 0,1$
35,2	-0,4	$\pm 0,1$
45,1	-0,3	$\pm 0,1$

Fonte: Próprio autor.

INTERPOLAÇÃO LINEAR DOS RESULTADOS DE CALIBRAÇÃO DO PADRÃO

Os valores de Correção e de Incerteza para toda a faixa de temperatura necessitaram de **interpolação linear** para cada ponto da faixa de calibração. Além disso, é fundamental lembrar que $U_{95\%} = k_{95\%} \times u_{68\%}$. Sabendo que $k_{95\%} = 4,53$ para $\nu = 2$ (3 ciclos), mas calibrador utilizou $k = 2$.

Tabela 2 - Interpolação e Extrapolação dos Correções do Padrão

Controlador (°C)	C _{padrão} (°C)	U _{95%} (°C)	k _{calibração}	U _{68%} (°C)
15	-0,3	±0,1	2	±0,05
20	-0,3	±0,1	2	±0,05
25	-0,3	±0,1	2	±0,05
30	-0,35	±0,1	2	±0,05
35	-0,4	±0,1	2	±0,05
40	-0,35	±0,1	2	±0,05
45	-0,3	±0,1	2	±0,05
50	-0,3	±0,1	2	±0,05
52	-0,3	±0,1	2	±0,05

Fonte: Próprio autor.

Fazendo as leituras com o padrão ($I_{\text{padrão}}$) para cada temperatura ajustada no controlador do banho termostático, é possível calcular o VVC.

$$VVC = I_{\text{padrão}} + C_{\text{padrão}}$$

Tabela 3 - Indicação do Padrão e Correção Segundo Certificado de Calibração.

Controlador (°C)	I _{padrão} (°C)	C _{padrão} (°C)	VVC (°C)	U _{68%} (°C)
15	14,8	-0,3	14,5	±0,05
20	19,8	-0,3	19,5	±0,05
25	24,9	-0,3	24,6	±0,05
30	30,0	-0,35	29,65	±0,05
35	35,0	-0,4	34,6	±0,05
40	40,0	-0,35	39,65	±0,05
45	45,0	-0,3	44,7	±0,05
50	50	-0,3	49,7	±0,05
52	52	-0,3	51,7	±0,05

Fonte: Próprio autor.

INSTRUMENTOS A SEREM CALIBRADOS

SM: Termopares tipo J acoplado ao Agilent.

Data da Calibração: 24/08/2018

Faixa de calibração: 15°C a 52°C

Resolução do Agilent: 0,001°C

Ciclos de Calibração: 5

CALIBRAÇÃO DO SENSOR

Sensor Termopar tipo J porta 1001

Tabela 4 - Medidas da Calibração do Sensor da porta 1001.

Controlador (°C)	VVC (°C)	I ₁ (°C)	I ₂ (°C)	I ₃ (°C)	I ₄ (°C)	I ₅ (°C)
15	14,5	14,661	14,622	14,652	14,625	14,629
20	19,5	19,529	19,479	19,432	19,509	19,481
25	24,6	24,41	24,407	24,404	24,425	24,419
30	29,65	29,298	29,304	29,285	29,321	29,348
35	34,6	34,373	34,384	34,373	34,373	34,414
40	39,65	39,383	39,361	39,384	39,352	39,366
45	44,7	44,289	44,336	44,345	44,383	44,355
50	49,7	49,193	49,169	49,225	49,27	49,262
52	51,7	51,266	51,271	51,279	51,267	51,236

Fonte: Próprio autor.

ANÁLISE DA CALIBRAÇÃO

Tabela 5 - Análise das Medidas para Calibração do Termopar 1001.

(continua)

Controlador (°C)	VVC (°C)	M _i (°C)	s (°C)	C (°C)
15	14,5	14,638	0,01754	-0,138
20	19,5	19,486	0,03663	0,014
25	24,6	24,413	0,00875	0,187

(conclusão)

Controlador (°C)	VVC (°C)	M _I (°C)	s (°C)	C (°C)
30	29,65	29,311	0,02430	0,339
35	34,6	34,383	0,01776	0,217
40	39,65	39,369	0,01399	0,281
45	44,7	44,342	0,03429	0,358
50	49,7	49,224	0,04344	0,476
52	51,7	51,264	0,01636	0,436

Fonte: Próprio autor.

Sensor Termopar tipo J porta 1002**Tabela 6 - Medidas da Calibração do Sensor da porta 1002.**

Controlador (°C)	VVC (°C)	I ₁ (°C)	I ₂ (°C)	I ₃ (°C)	I ₄ (°C)	I ₅ (°C)
15	14,5	14,675	14,632	14,654	14,673	14,667
20	19,5	19,541	19,556	19,445	19,429	19,452
25	24,6	24,421	24,413	24,44	24,436	24,417
30	29,65	29,304	29,285	29,294	29,33	29,348
35	34,6	34,311	34,342	34,355	34,388	34,393
40	39,65	39,375	39,377	39,415	39,407	39,384
45	44,7	44,199	44,242	44,281	44,317	44,306
50	49,7	49,347	49,345	49,36	49,416	49,39
52	51,7	51,253	51,267	51,257	51,234	51,241

Fonte: Próprio autor.

ANÁLISE DA CALIBRAÇÃO**Tabela 7 - Análise das Medidas para Calibração do Termopar 1002.**

(continua)

Controlador (°C)	VVC (°C)	M _I (°C)	s (°C)	C (°C)
15	14,5	14,660	0,01777	-0,160
20	19,5	19,485	0,05916	0,015
25	24,6	24,425	0,01193	0,175
30	29,65	29,312	0,02616	0,338

(conclusão)

Controlador (°C)	VVC (°C)	M _I (°C)	s (°C)	C (°C)
35	34,6	34,358	0,03391	0,242
40	39,65	39,392	0,01824	0,258
45	44,7	44,269	0,04860	0,431
50	49,7	49,372	0,03065	0,328
52	51,7	51,250	0,01307	0,450

Fonte: Próprio autor.

Sensor Termopar tipo J porta 1003**Tabela 8 - Medidas da Calibração do Sensor da porta 1003.**

Controlador (°C)	VVC (°C)	I ₁ (°C)	I ₂ (°C)	I ₃ (°C)	I ₄ (°C)	I ₅ (°C)
15	14,5	14,538	14,543	14,573	14,563	14,557
20	19,5	19,431	19,491	19,47	19,505	19,49
25	24,6	24,412	24,421	24,236	24,432	24,424
30	29,65	29,34	29,306	29,291	29,34	29,362
35	34,6	34,358	34,374	34,376	34,373	34,416
40	39,65	39,396	39,414	39,439	39,416	39,388
45	44,7	44,266	44,3	44,311	44,353	44,326
50	49,7	49,381	49,375	49,41	49,435	49,408
52	51,7	51,333	51,36	51,358	51,378	51,346

Fonte: Próprio autor.

ANÁLISE DA CALIBRAÇÃO**Tabela 9 - Análise das Medidas para Calibração do Termopar 1003.**

(continua)

Controlador (°C)	VVC (°C)	M _I (°C)	s (°C)	C (°C)
15	14,5	14,555	0,01436	-0,055
20	19,5	19,477	0,02878	0,023
25	24,6	24,385	0,08360	0,215
30	29,65	29,328	0,02871	0,322
35	34,6	34,379	0,02167	0,221

(conclusão)

Controlador (°C)	VVC (°C)	M _I (°C)	s (°C)	C (°C)
40	39,65	39,411	0,01982	0,239
45	44,7	44,311	0,03215	0,389
50	49,7	49,402	0,02428	0,298
52	51,7	51,355	0,01679	0,345

Fonte: Próprio autor.

Sensor Termopar tipo J porta 1004**Tabela 10 - Medidas da Calibração do Sensor da porta 1004.**

Controlador (°C)	VVC (°C)	I ₁ (°C)	I ₂ (°C)	I ₃ (°C)	I ₄ (°C)	I ₅ (°C)
15	14,5	14,597	14,593	14,608	14,627	14,609
20	19,5	19,493	19,495	19,485	19,536	19,554
25	24,6	24,425	24,457	24,444	24,469	24,421
30	29,65	29,334	29,342	29,317	29,367	29,421
35	34,6	34,324	34,35	34,359	34,384	34,424
40	39,65	39,422	39,384	39,413	39,397	39,403
45	44,7	44,276	44,317	44,332	44,368	44,366
50	49,7	49,261	49,219	49,272	49,343	49,343
52	51,7	51,307	51,336	51,341	51,337	51,333

Fonte: Próprio autor.

ANÁLISE DA CALIBRAÇÃO**Tabela 11 - Análise das Medidas para Calibração do Termopar 1004.**

(continua)

Controlador (°C)	VVC (°C)	M _I (°C)	s (°C)	C (°C)
15	14,5	14,607	0,01324	-0,107
20	19,5	19,513	0,03048	-0,013
25	24,6	24,443	0,02050	0,157
30	29,65	29,356	0,04046	0,294
35	34,6	34,368	0,03786	0,232
40	39,65	39,404	0,01462	0,246

(conclusão)

Controlador (°C)	VVC (°C)	M _I (°C)	s (°C)	C (°C)
45	44,7	44,332	0,03812	0,368
50	49,7	49,288	0,05430	0,412
52	51,7	51,331	0,01361	0,369

Fonte: Próprio autor.

Sensor Termopar tipo J porta 1005**Tabela 12 - Medidas da Calibração do Sensor da porta 1005.**

Controlador (°C)	VVC (°C)	I ₁ (°C)	I ₂ (°C)	I ₃ (°C)	I ₄ (°C)	I ₅ (°C)
15	14,5	14,653	14,641	14,648	14,644	14,646
20	19,5	19,481	19,51	19,499	19,507	19,459
25	24,6	24,427	24,427	24,461	24,459	24,444
30	29,65	29,321	29,329	29,333	29,374	29,364
35	34,6	34,341	34,354	34,3405	34,403	34,409
40	39,65	39,409	39,441	39,462	39,46	39,396
45	44,7	44,332	44,387	44,415	44,43	44,424
50	49,7	49,323	49,321	49,362	49,401	49,373
52	51,7	51,386	51,404	51,399	51,391	51,367

Fonte: Próprio autor.

ANÁLISE DA CALIBRAÇÃO**Tabela 13 - Análise das Medidas para Calibração do Termopar 1005.**

(continua)

Controlador (°C)	VVC (°C)	M _I (°C)	s (°C)	C (°C)
15	14,5	14,646	0,00451	-0,146
20	19,5	19,491	0,02124	0,009
25	24,6	24,444	0,01652	0,156
30	29,65	29,344	0,02332	0,306
35	34,6	34,370	0,03382	0,231
40	39,65	39,434	0,02990	0,216
45	44,7	44,398	0,04020	0,302

(conclusão)

Controlador (°C)	VVC (°C)	M _I (°C)	s (°C)	C (°C)
50	49,7	49,356	0,03415	0,344
52	51,7	51,389	0,01433	0,311

Fonte: Próprio autor.

Sensor Termopar tipo J porta 1021**Tabela 14 - Medidas da Calibração do Sensor da porta 1021.**

Controlador (°C)	VVC (°C)	l ₁ (°C)	l ₂ (°C)	l ₃ (°C)	l ₄ (°C)	l ₅ (°C)
15	14,5	14,777	14,711	14,701	14,723	14,699
20	19,5	19,627	19,567	19,668	19,606	19,641
25	24,6	24,525	24,53	24,52	24,537	24,539
30	29,65	29,438	29,408	29,423	29,445	29,422
35	34,6	34,334	34,335	34,366	34,396	34,34
40	39,65	39,284	39,247	39,356	39,322	39,388
45	44,7	44,167	44,244	44,302	44,31	44,294
50	49,7	49,16	49,126	49,169	49,227	49,238
52	51,7	51,221	51,287	51,311	51,322	51,299

Fonte: Próprio autor.

ANÁLISE DA CALIBRAÇÃO**Tabela 15 - Análise das Medidas para Calibração do Termopar 1021.**

(continua)

Controlador (°C)	VVC (°C)	M _I (°C)	s (°C)	C (°C)
15	14,5	14,722	0,03208	-0,222
20	19,5	19,622	0,03802	-0,122
25	24,6	24,530	0,00798	0,070
30	29,65	29,427	0,01455	0,223
35	34,6	34,354	0,02676	0,246
40	39,65	39,319	0,05601	0,331
45	44,7	44,263	0,05972	0,437
50	49,7	49,184	0,04725	0,516

(conclusão)

Controlador (°C)	VVC (°C)	M _I (°C)	s (°C)	C (°C)
52	51,7	51,288	0,03967	0,412

Fonte: Próprio autor.

Sensor Termopar tipo J porta 1022**Tabela 16 - Medidas da Calibração do Sensor da porta 1022.**

Controlador (°C)	VVC (°C)	l ₁ (°C)	l ₂ (°C)	l ₃ (°C)	l ₄ (°C)	l ₅ (°C)
15	14,5	14,663	14,568	14,547	14,58	14,582
20	19,5	19,498	19,434	19,463	19,408	19,439
25	24,6	24,497	24,494	24,501	24,504	24,5
30	29,65	29,372	29,336	29,316	29,356	29,364
35	34,6	34,347	34,347	34,335	34,375	34,4
40	39,65	39,339	39,339	39,392	39,365	39,409
45	44,7	44,14	44,208	44,231	44,27	44,268
50	49,7	49,261	49,263	49,281	49,322	49,35
52	51,7	51,337	51,357	51,337	51,341	51,342

Fonte: Próprio autor.

ANÁLISE DA CALIBRAÇÃO**Tabela 16 - Análise das Medidas para Calibração do Termopar 1022.**

Controlador (°C)	VVC (°C)	M _I (°C)	s (°C)	C (°C)
15	14,5	14,588	0,04418	-0,088
20	19,5	19,448	0,03392	0,052
25	24,6	24,499	0,00383	0,101
30	29,65	29,349	0,02270	0,301
35	34,6	34,361	0,02639	0,239
40	39,65	39,369	0,03140	0,281
45	44,7	44,223	0,05341	0,477
50	49,7	49,295	0,03914	0,405
52	51,7	51,343	0,00826	0,357

Fonte: Próprio autor.

APÊNDICE D – PROCEDIMENTO DE DETERMINAÇÃO DA UMIDADE INICIAL DO PRODUTO EM ESTUFA

1. OBJETIVO

Determinar a umidade inicial do milho úmido.

2. INTRODUÇÃO

O procedimento de determinação da umidade inicial do milho consiste na pesagem de uma dada quantidade de grãos antes e após a exposição deles por 24 horas no interior de uma estufa de secagem com renovação de ar ajustada na temperatura de 105°C.

O teor de umidade médio para os grãos pode ser determinado pelas Equação (5) e Equação (6), para base seca e base úmida respectivamente.

$$M_{0s} = \frac{m_{gu} - m_{gs}}{m_{gs}} \quad (5)$$

$$M_{0u} = \frac{m_{gu} - m_{gs}}{m_{gu}} \quad (6)$$

Sendo M_{0s} o teor de umidade inicial dos grãos em base seca e M_{0u} em base úmida, m_{gu} a massa inicial dos grãos úmidos em gramas e m_{gs} a massa final dos grãos secos após o teste em estufa também em gramas.

3. EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

Para a determinação da umidade inicial do milho serão necessários os seguintes componentes:

- Amostra de grãos de milho úmido;
- Balança digital;
- Bandejas;
- Estufa de secagem.

3.1. Amostra de grãos de milho úmido

Foram utilizadas 100 gramas de grãos úmidos de milho para cada bandeja utilizada no experimento.

3.2. Balança digital

A balança digital deve ser instalada em uma superfície plana e estar devidamente nivelada para a realização das pesagens, também deve-se ligar a balança durante 30 minutos antes de qualquer medição para garantir a estabilização dos componentes eletrônicos da mesma. Para o caso desse manual foi utilizada uma balança da marca Toledo modelo 9094/4 com incerteza de 1 grama. (Figura 1)

Figura 1 – Balança digital Toledo modelo 9094/4.



Fonte: Próprio autor.

3.3. Bandejas

As bandejas devem ser constituídas de material metálico a fim de resistir as temperaturas da estufa de secagem. Para esse manual foram utilizadas 3 bandejas de aço galvanizado com tela metálica de 100 x 100 milímetros. (Figura 2)

Figura 2 – Bandejas teladas.



Fonte: Próprio;

3.4. Estufa de Secagem

A estudo de secagem deve possuir a capacidade de manter uma temperatura desejada e realizar a renovação de ar, a fim de realizar a secagem do seu interior. Nesse manual foi utilizado uma estufa de secagem, com renovação de ar e regulagem de temperatura via termostato, da marca Nova técnica com volume interno de 40 litros. (Figura 3)

Figura 3 – Estufa de secagem.



Fonte: Próprio autor.

4. PROCEDIMENTO

O procedimento para determinação da umidade inicial do milho úmido tem as seguintes etapas:

1. Retirada das amostras de milho úmido do ambiente refrigerado, 24 horas antes do experimento a fim de garantir o equilíbrio do grão com a temperatura ambiente.
2. Pesagem e identificação das bandejas vazias;

3. Preenchimento das bandejas com aproximadamente 100 gramas de milho; (Figura 4)

Figura 4 – Amostras de milho nas bandejas antes do ensaio.



Fonte: Próprio autor.

4. Ajustar a temperatura da estufa para a temperatura do ensaio, que no caso é de 105°C; (Figura 5)

Figura 5 – Termômetros e ajuste do termostato na temperatura de 105°C



Fonte: Próprio autor.

5. Colocar as bandejas dentro da estufa e aguardar 24 horas até o fim do ensaio, a Figura 6 mostra o aspecto das amostras antes e depois da realização do ensaio.

Figura 6 – Aspecto das amostras antes e depois do ensaio de secagem.



Fonte: Próprio autor.

6. Retirar as bandejas da estufa e realizar a pesagem.
7. Efetuar os cálculos da umidade do grão em base seca e úmida.

Dessa forma o procedimento descrito possibilita a determinação da umidade das amostras de milho resultando no relatório apresentado no próximo item.

5. RELATÓRIO DA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE INICIAL DO MILHO

Nesse tópico será apresentado o resultado esperado após o teste.

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE INICIAL DO MILHO

Equipamento: Estufa de secagem com renovação de ar.

Início do Ensaio: 11 horas e 40 minutos do dia 28/08/2018

Término do Ensaio: 11 horas e 41 minutos do dia 29/08/2018

Temperatura do Ensaio: 105°C

Tempo mínimo de ensaio: 24 horas

Instrumento de medição: Balança Toledo $\pm 0,001$ kg

ANÁLISE DO ENSAIO

Tabela 1 – Resultado das medições de peso.

ID	m_{vazio} (kg)	m_u (kg)	m_s (kg)	m_{mu} (kg)	m_{ms} (kg)	M_{0seco} (%)
01	0,101	0,253	0,150	0,152	0,103	47,6
02	0,100	0,245	0,147	0,145	0,098	48,0
03	0,107	0,249	0,152	0,145	0,097	46,4
\overline{M}_{0seco}						47,3

Onde:

ID: Identificação da amostra;

m_{vazio} : massa da bandeja vazia;

m_u : massa da bandeja com milho úmido (massa inicial);

m_s : massa da bandeja com milho seco (massa final);

m_{mu} : massa de milho úmido;

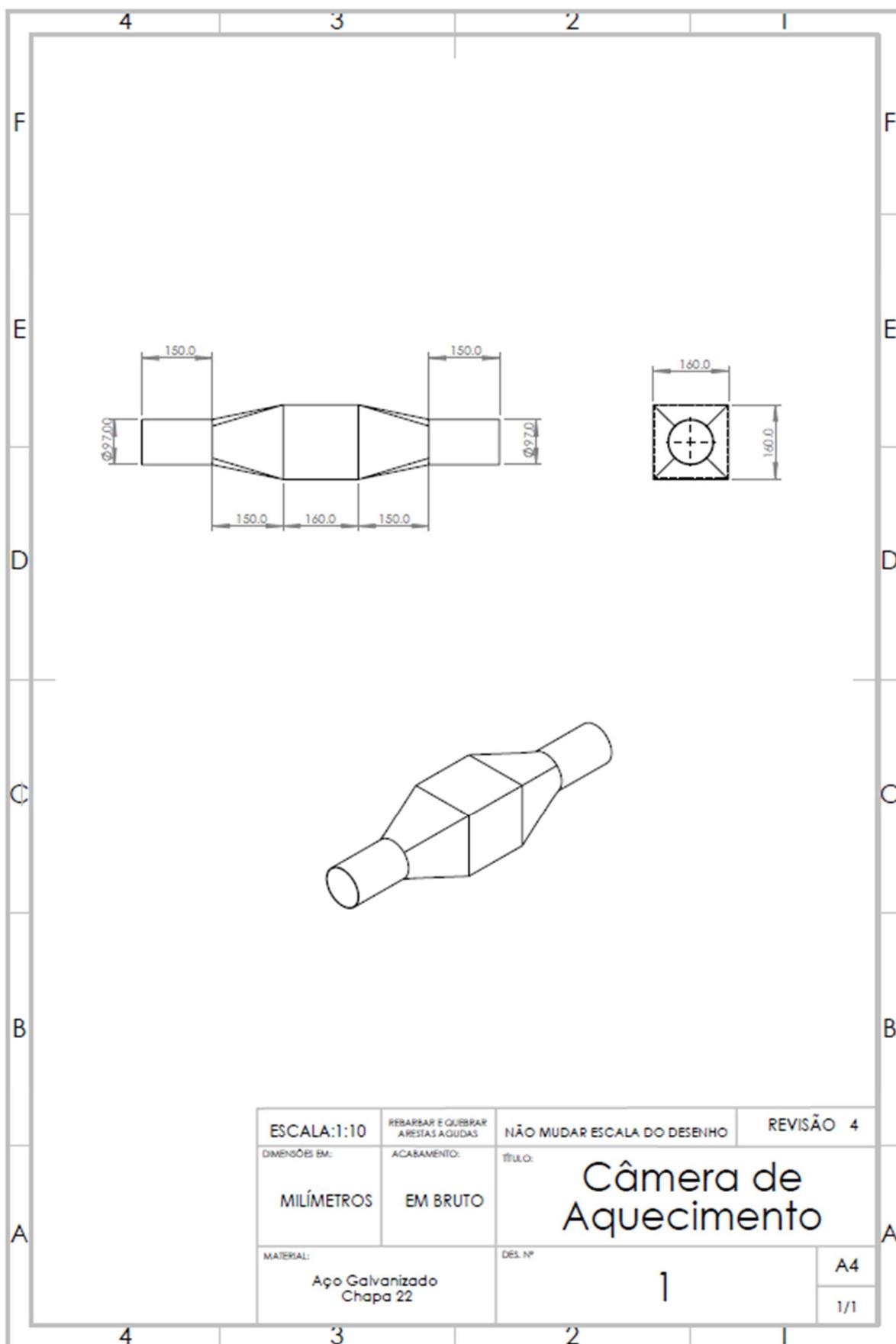
m_{ms} : massa de milho seco;

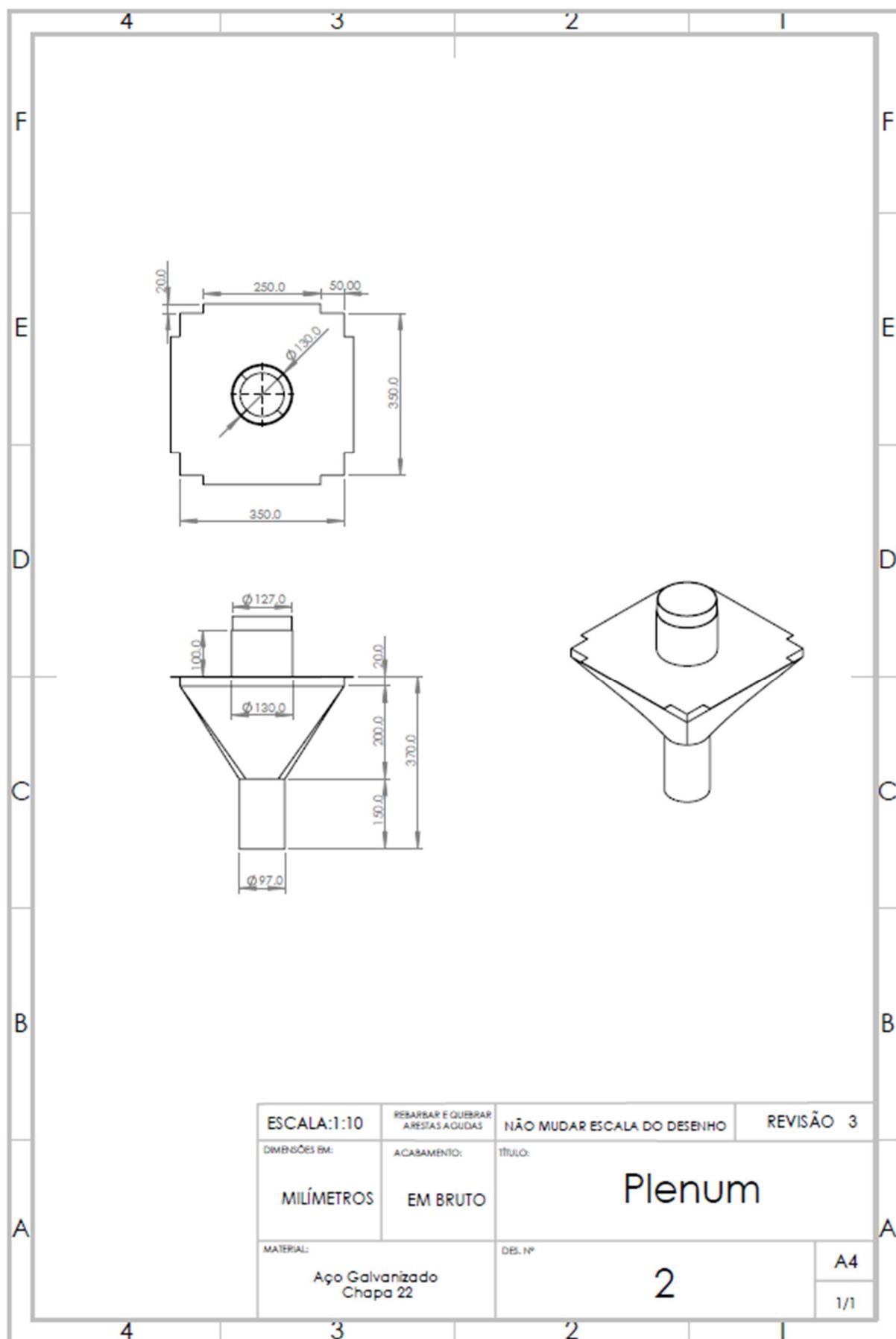
M_{0seco} : Umidade percentual do milho na base seca;

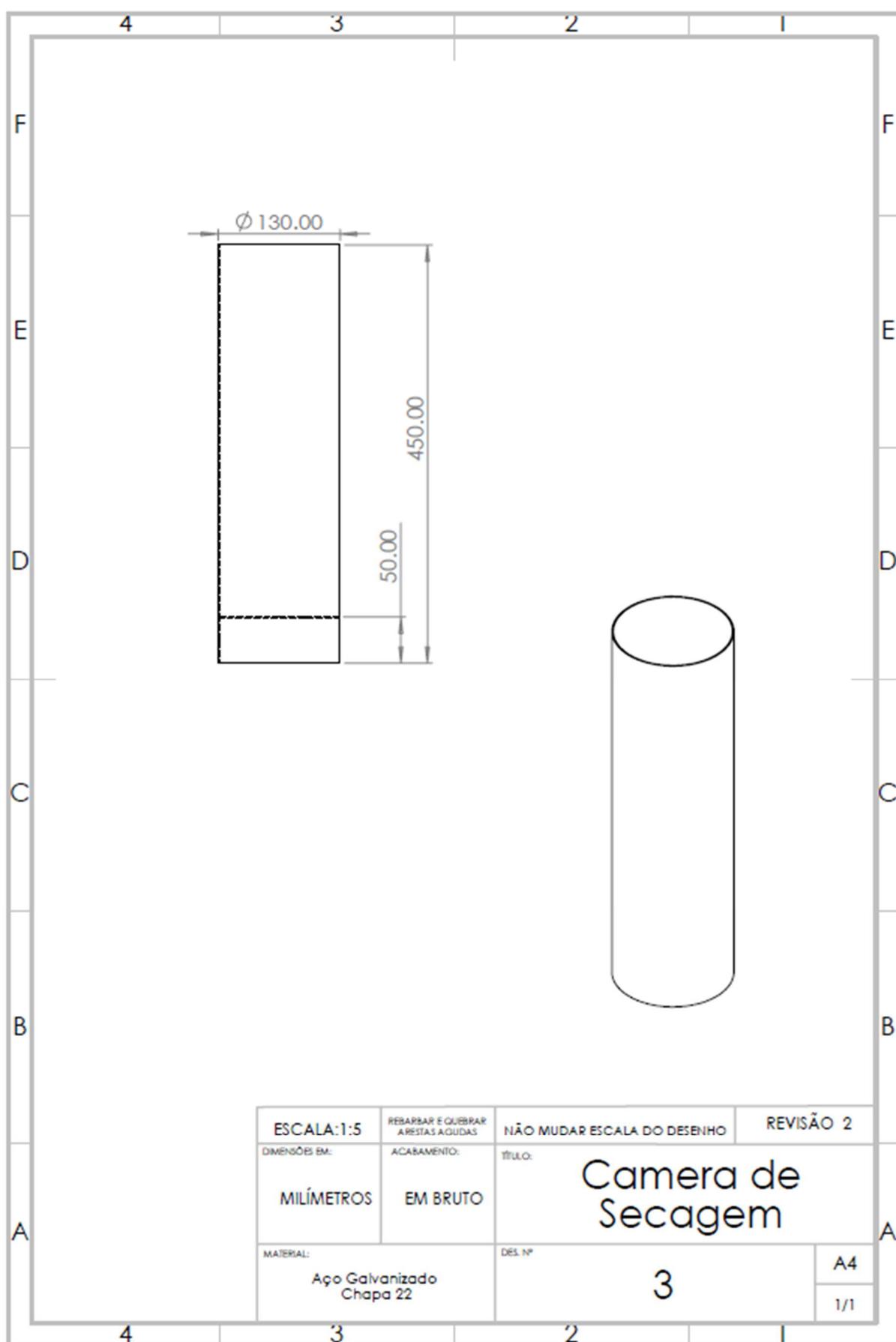
\overline{M}_{0seco} : Umidade média percentual do milho na base seca.

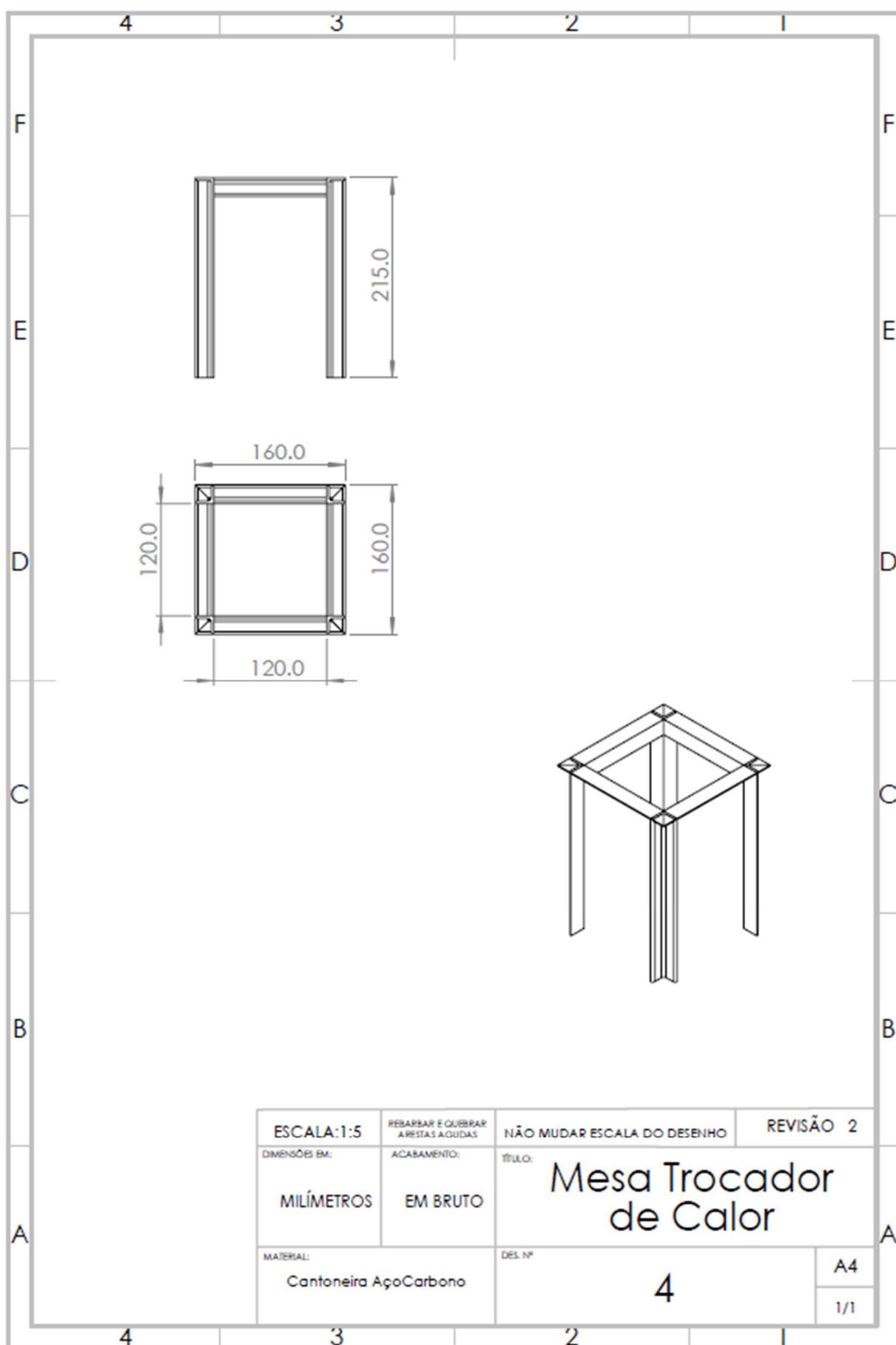
Conclusão: O milho testado obteve um percentual médio de $47,3 \pm 1\%$

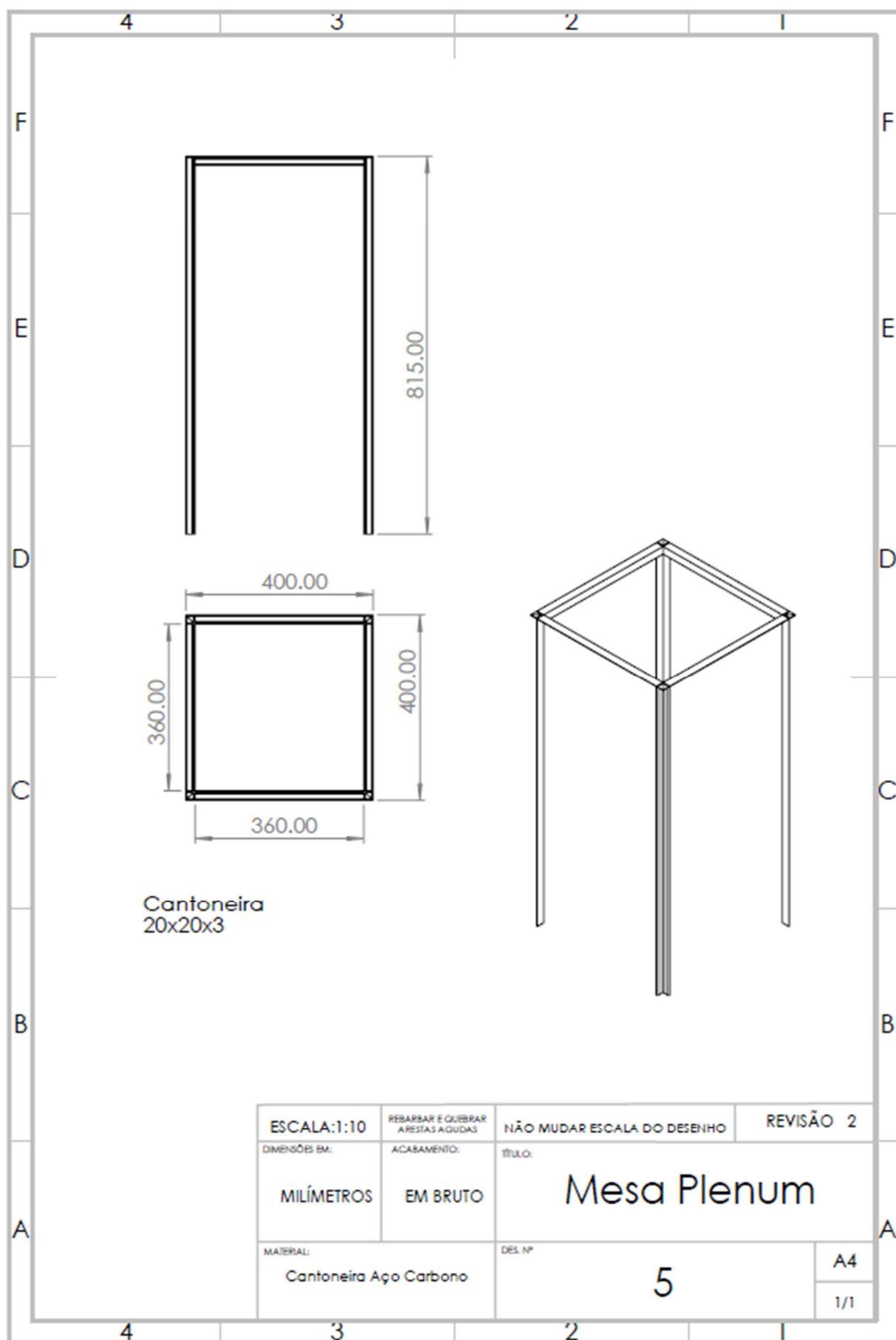
APÊNDICE E – DESENHOS DE FABRICAÇÃO DO SECADOR











APÊNDICE F – TABELA DE CUSTOS DO SECADOR

Componentes	Descrição	Preço (R\$)	Quantidade	Total (R\$)
Ventilador siroco Varivelox	Rotação 3500RPM, Vazão 12l/s,	530,00	1	530,00
Resistência Elétrica Aletada para Estufa	200mm,1000w,220v	49,90	4	199,60
Controlador REX C-100 RKC e SSR	Controlador temperatura com comando PID	158,90	1	158,90
Termopar tipo J	Termopar Tipo J Haste Inox de ponta palito 4,7 e 10cm de comprimento, Cabo 2,00m	16,99	7	118,93
Funilaria	Câmara de secagem, câmara de aquecimento e <i>plenum</i>	450,00	1	450,00
Tubos de PVC	Luva e conexão 90° de 100mm	30,00	1	30,00
Conectores pneumáticos e mangueiras	Conectores de engate rápido	70,00	1	70,00
Fiação e conectores elétricos	Fios	30,00	1	30,00
Fitas de fixação (<i>Silvertape</i>)	<i>Silvertape</i>	15,00	2	30,00
Caixa de madeira	Caixa de mdf	5,00	1	5,00
Fibra Cerâmica	4m x 1m x 10mm	70,00	1	70,00
Total				1692,43

APÊNDICE G – RELATÓRIOS DA DETERMINAÇÃO DA UMIDADE INICIAL DO MILHO PARA CADA EMBALAGEM

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE INICIAL DO MILHO EXPERIMENTO 1

Equipamento: Estufa de secagem com renovação de ar.

Início do Ensaio: 11 horas e 50 minutos do dia 16/10/2018

Término do Ensaio: 11 horas e 55 minutos do dia 17/10/2018

Temperatura do Ensaio: 105°C

Tempo mínimo de ensaio: 24 horas

Instrumento de medição: Balança Toledo $\pm 0,001$ kg

ANÁLISE DO ENSAIO

Tabela 1 – Resultado das medições de peso.

ID	m_{vazio} (kg)	m_u (kg)	m_s (kg)	$m_{g,u}$ (kg)	$m_{g,se}$ (kg)	$M_{0,bs}$ (%)	$M_{0,bu}$ (%)
01	0,100	0,33	0,289	0,230	0,189	21,7	17,8
02	0,102	0,314	0,276	0,213	0,175	21,7	17,8
H-01	0,101	0,306	0,277	0,205	0,176	16,5	14,1
H-02	0,102	0,304	0,275	0,202	0,173	16,8	14,4
H-03	0,102	0,307	0,276	0,205	0,174	17,8	15,1

Onde:

ID: Identificação da amostra;

m_{vazio} : massa da bandeja vazia;

m_u : massa da bandeja com milho úmido (massa inicial);

m_s : massa da bandeja com milho seco (massa final);

$m_{g,u}$: massa de milho úmido;

$m_{g,se}$: massa de milho seco;

$M_{0,bs}$: Umidade percentual do milho na base seca;

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE INICIAL DO MILHO EXPERIMENTO 2

Equipamento: Estufa de secagem com renovação de ar.

Início do Ensaio: 17 horas e 34 minutos do dia 17/10/2018

Término do Ensaio: 17 horas e 40 minutos do dia 18/10/2018

Temperatura do Ensaio: 105°C

Tempo mínimo de ensaio: 24 horas

Instrumento de medição: Balança Toledo $\pm 0,001$ kg

ANÁLISE DO ENSAIO

Tabela 1 – Resultado das medições de peso.

ID	m_{vazio} (kg)	m_u (kg)	m_s (kg)	$m_{g,u}$ (kg)	$m_{g,se}$ (kg)	$M_{0,bs}$ (%)	$M_{0,bu}$ (%)
01	0,101	0,322	0,282	0,221	0,181	22,1	18,1
02	0,100	0,318	0,278	0,218	0,178	22,5	18,3
H-01	0,101	0,308	0,281	0,207	0,180	15,0	13,0
H-02	0,102	0,315	0,285	0,213	0,183	16,4	14,1
H-03	0,102	0,328	0,295	0,226	0,193	17,1	14,6

Onde:

ID: Identificação da amostra;

m_{vazio} : massa da bandeja vazia;

m_u : massa da bandeja com milho úmido (massa inicial);

m_s : massa da bandeja com milho seco (massa final);

$m_{g,u}$: massa de milho úmido;

$m_{g,se}$: massa de milho seco;

$M_{0,bs}$: Umidade percentual do milho na base seca;

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE INICIAL DO MILHO EXPERIMENTO 3

Equipamento: Estufa de secagem com renovação de ar.

Início do Ensaio: 12 horas e 51 minutos do dia 23/10/2018

Término do Ensaio: 12 horas e 51 minutos do dia 24/10/2018

Temperatura do Ensaio: 105°C

Tempo mínimo de ensaio: 24 horas

Instrumento de medição: Balança Toledo $\pm 0,001$ kg

ANÁLISE DO ENSAIO

Tabela 1 – Resultado das medições de peso.

ID	m_{vazio} (kg)	m_u (kg)	m_s (kg)	$m_{g,u}$ (kg)	$m_{g,se}$ (kg)	$M_{0,bs}$ (%)	$M_{0,bu}$ (%)
01	0,101	0,318	0,278	0,217	0,177	22,6	18,4
02	0,101	0,307	0,269	0,206	0,168	22,6	18,4
H-01	0,101	0,308	0,284	0,207	0,183	13,1	11,6
H-02	0,102	0,32	0,293	0,218	0,191	14,1	12,4
H-03	0,102	0,296	0,27	0,194	0,168	15,5	13,4

Onde:

ID: Identificação da amostra;

m_{vazio} : massa da bandeja vazia;

m_u : massa da bandeja com milho úmido (massa inicial);

m_s : massa da bandeja com milho seco (massa final);

$m_{g,u}$: massa de milho úmido;

$m_{g,se}$: massa de milho seco;

$M_{0,bs}$: Umidade percentual do milho na base seca;

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE INICIAL DO MILHO EXPERIMENTO 4

Equipamento: Estufa de secagem com renovação de ar.

Início do Ensaio: 13 horas e 10 minutos do dia 24/10/2018

Término do Ensaio: 13 horas e 10 minutos do dia 25/10/2018

Temperatura do Ensaio: 105°C

Tempo mínimo de ensaio: 24 horas

Instrumento de medição: Balança Toledo $\pm 0,001$ kg

ANÁLISE DO ENSAIO

Tabela 1 – Resultado das medições de peso.

ID	m_{vazio} (kg)	m_u (kg)	m_s (kg)	$m_{g,u}$ (kg)	$m_{g,se}$ (kg)	$M_{0,bs}$ (%)	$M_{0,bu}$ (%)
01	0,100	0,309	0,271	0,209	0,171	22,2	18,2
02	0,102	0,297	0,261	0,195	0,159	22,6	18,5
H-01	0,101	0,295	0,267	0,194	0,166	16,9	14,4
H-02	0,102	0,334	0,3	0,232	0,198	17,2	14,7
H-03	0,102	0,301	0,271	0,199	0,169	17,8	15,1

Onde:

ID: Identificação da amostra;

m_{vazio} : massa da bandeja vazia;

m_u : massa da bandeja com milho úmido (massa inicial);

m_s : massa da bandeja com milho seco (massa final);

$m_{g,u}$: massa de milho úmido;

$m_{g,se}$: massa de milho seco;

$M_{0,bs}$: Umidade percentual do milho na base seca;

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE INICIAL DO MILHO EXPERIMENTO 5

Equipamento: Estufa de secagem com renovação de ar.

Início do Ensaio: 11 horas e 53 minutos do dia 30/10/2018

Término do Ensaio: 11 horas e 53 minutos do dia 31/10/2018

Temperatura do Ensaio: 105°C

Tempo mínimo de ensaio: 24 horas

Instrumento de medição: Balança Toledo $\pm 0,001$ kg

ANÁLISE DO ENSAIO

Tabela 1 – Resultado das medições de peso.

ID	m_{vazio} (kg)	m_u (kg)	m_s (kg)	$m_{g,u}$ (kg)	$m_{g,se}$ (kg)	$M_{0,bs}$ (%)	$M_{0,bu}$ (%)
01	0,100	0,3	0,264	0,200	0,164	22,0	18,0
02	0,101	0,3	0,263	0,199	0,162	22,8	18,6
H-01	0,101	0,291	0,266	0,190	0,165	15,2	13,2
H-02	0,102	0,31	0,282	0,208	0,180	15,6	13,5
H-03	0,102	0,299	0,272	0,197	0,170	15,9	13,7

Onde:

ID: Identificação da amostra;

m_{vazio} : massa da bandeja vazia;

m_u : massa da bandeja com milho úmido (massa inicial);

m_s : massa da bandeja com milho seco (massa final);

$m_{g,u}$: massa de milho úmido;

$m_{g,se}$: massa de milho seco;

$M_{0,bs}$: Umidade percentual do milho na base seca;

DETERMINAÇÃO DA UMIDADE INICIAL DO MILHO EXPERIMENTO 6

Equipamento: Estufa de secagem com renovação de ar.

Início do Ensaio: 12 horas e 30 minutos do dia 31/10/2018

Término do Ensaio: 12 horas e 33 minutos do dia 01/11/2018

Temperatura do Ensaio: 105°C

Tempo mínimo de ensaio: 24 horas

Instrumento de medição: Balança Toledo $\pm 0,001$ kg

ANÁLISE DO ENSAIO

Tabela 1 – Resultado das medições de peso.

ID	m_{vazio} (kg)	m_u (kg)	m_s (kg)	$m_{g,u}$ (kg)	$m_{g,se}$ (kg)	$M_{0,bs}$ (%)	$M_{0,bu}$ (%)
01	0,101	0,302	0,266	0,201	0,165	21,8	17,9
02	0,101	0,304	0,268	0,203	0,167	21,6	17,7
H-01	0,101	0,287	0,2645	0,186	0,164	13,8	12,1
H-02	0,102	0,304	0,279	0,202	0,177	14,1	12,4
H-03	0,102	0,293	0,269	0,191	0,167	14,4	12,6

Onde:

ID: Identificação da amostra;

m_{vazio} : massa da bandeja vazia;

m_u : massa da bandeja com milho úmido (massa inicial);

m_s : massa da bandeja com milho seco (massa final);

$m_{g,u}$: massa de milho úmido;

$m_{g,se}$: massa de milho seco;

$M_{0,bs}$: Umidade percentual do milho na base seca;

APÊNDICE H – RELATÓRIOS DOS EXPERIMENTOS DE SECAGEM

EXPERIMENTO DE SECAGEM 1

Equipamento: Secador de grãos de leito fixo unidimensional.

Dia do experimento: 16/10/2018 **Início do experimento:** 9:30

Duração do experimento: 120 minutos

\bar{T}_e : (42,3 ± 0,2) °C \bar{V}_e : (0,8 ± 0,2) m/s \bar{P}_e : (92,325 ± 0,009) kPa

\bar{T}_{amb} : (28,4 ± 0,3) °C \overline{UR}_{amb} : (61 ± 4) % \dot{W}_{VC} : (126 ± 1) W

\bar{T}_{resist} : (230 ± 2) °C

ANÁLISE DE DADOS DO EXPERIMENTO

Tabela 1 – Principais medidas aferidas e calculadas do experimento.

t (min)	$m_{g,i}$ (kg)	UR_{amb} (%)	E_T (kJ)	$M_{i,l,bs}$ (%)	RM (-)	DR (% h ⁻¹)	P_e (kPa)	η_e (%)	η_{ex} (%)
0	2,124 ± 0,001	64 ± 4	-	22,0 ± 0,1	1,00 ± 0,01	-	92,313 ± 0,009	-	-
10	2,112 ± 0,001	63 ± 4	288 ± 18	21,3 ± 0,1	0,93 ± 0,01	4,1 ± 0,8	92,316 ± 0,009	10 ± 1	0,27 ± 0,04
20	2,098 ± 0,001	62 ± 4	252 ± 18	20,5 ± 0,1	0,88 ± 0,01	4,8 ± 0,8	92,328 ± 0,009	14 ± 1	0,59 ± 0,04
30	2,088 ± 0,001	62 ± 4	216 ± 18	19,9 ± 0,1	0,85 ± 0,01	3,4 ± 0,8	92,331 ± 0,009	11 ± 1	0,57 ± 0,04
40	2,080 ± 0,001	61 ± 4	252 ± 18	19,4 ± 0,1	0,83 ± 0,01	2,8 ± 0,8	92,322 ± 0,009	8 ± 1	0,44 ± 0,04
50	2,074 ± 0,001	61 ± 4	216 ± 18	19,1 ± 0,1	0,80 ± 0,01	2,1 ± 0,8	92,333 ± 0,009	7 ± 1	0,38 ± 0,04
60	2,066 ± 0,001	61 ± 4	252 ± 18	18,6 ± 0,1	0,78 ± 0,01	2,8 ± 0,8	92,332 ± 0,009	8 ± 1	0,48 ± 0,04
70	2,062 ± 0,001	61 ± 4	216 ± 18	18,4 ± 0,1	0,75 ± 0,01	1,4 ± 0,8	92,335 ± 0,009	5 ± 1	0,27 ± 0,04
80	2,056 ± 0,001	61 ± 4	252 ± 18	18,0 ± 0,1	0,73 ± 0,01	2,1 ± 0,8	92,327 ± 0,009	6 ± 1	0,36 ± 0,04
90	2,050 ± 0,001	61 ± 4	216 ± 18	17,7 ± 0,1	0,72 ± 0,01	2,1 ± 0,8	92,327 ± 0,009	7 ± 1	0,41 ± 0,04
100	2,046 ± 0,001	60 ± 4	252 ± 18	17,5 ± 0,1	0,70 ± 0,01	1,4 ± 0,8	92,326 ± 0,009	4 ± 1	0,25 ± 0,04
110	2,042 ± 0,001	60 ± 4	216 ± 18	17,2 ± 0,1	0,69 ± 0,01	1,4 ± 0,8	92,322 ± 0,009	5 ± 1	0,27 ± 0,04
120	2,038 ± 0,001	60 ± 4	216 ± 18	17,0 ± 0,1	0,68 ± 0,01	1,4 ± 0,8	92,317 ± 0,009	5 ± 1	0,28 ± 0,04

**Tabela 2 - Principais medidas aferidas e calculadas do experimento
continuação.**

t (min)	$\eta_{e,teórica}$ (%)	$E_{xdestruída}$ (kJ)	$\eta_{térmica}$ (%)
0	-	-	-
10	33	161	31
20	41	146	33
30	32	131	36
40	24	146	33
50	20	132	34
60	27	146	29
70	12	132	38
80	20	146	29
90	19	131	37
100	13	146	30
110	12	132	39
120	12	132	38

Tabela 2 – Temperaturas aferidas no experimento.

t (min)	T_e (°C)	T_l (°C)	T_{amb} (°C)	T_s (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_5 (°C)
0	40,9 ± 0,2	26,7 ± 0,2	27,8 ± 0,2	27,4 ± 0,2	26,7 ± 0,2	26,6 ± 0,2	26,8 ± 0,2	26,9 ± 0,2
10	42,7 ± 0,2	32,0 ± 0,2	28,0 ± 0,2	25,8 ± 0,2	39,4 ± 0,2	33,5 ± 0,2	28,6 ± 0,2	26,5 ± 0,2
20	42,8 ± 0,2	36,0 ± 0,2	28,0 ± 0,2	29,3 ± 0,2	40,6 ± 0,2	37,7 ± 0,2	34,4 ± 0,2	31,4 ± 0,2
30	42,8 ± 0,2	37,8 ± 0,2	28,2 ± 0,2	32,4 ± 0,2	41,0 ± 0,2	39,1 ± 0,2	36,6 ± 0,2	34,5 ± 0,2
40	42,4 ± 0,2	38,5 ± 0,2	28,3 ± 0,2	34,2 ± 0,2	41,2 ± 0,2	39,4 ± 0,2	37,7 ± 0,2	36,0 ± 0,2
50	42,0 ± 0,2	39,1 ± 0,2	28,3 ± 0,2	36,1 ± 0,2	41,3 ± 0,2	40,2 ± 0,2	38,3 ± 0,2	36,8 ± 0,2
60	41,9 ± 0,2	39,4 ± 0,2	28,3 ± 0,2	36,0 ± 0,2	41,4 ± 0,2	40,1 ± 0,2	38,7 ± 0,2	37,4 ± 0,2
70	42,5 ± 0,2	39,6 ± 0,2	28,4 ± 0,2	36,4 ± 0,2	41,4 ± 0,2	40,2 ± 0,2	38,9 ± 0,2	37,9 ± 0,2
80	42,2 ± 0,2	39,7 ± 0,2	28,5 ± 0,2	36,9 ± 0,2	41,4 ± 0,2	40,2 ± 0,2	39,0 ± 0,2	38,0 ± 0,2
90	42,5 ± 0,2	39,8 ± 0,2	28,5 ± 0,2	36,9 ± 0,2	41,6 ± 0,2	40,2 ± 0,2	39,2 ± 0,2	38,1 ± 0,2
100	42,3 ± 0,2	40,0 ± 0,2	28,7 ± 0,2	37,4 ± 0,2	41,5 ± 0,2	40,4 ± 0,2	39,4 ± 0,2	38,6 ± 0,2
110	42,2 ± 0,2	40,0 ± 0,2	28,7 ± 0,2	37,7 ± 0,2	41,6 ± 0,2	40,4 ± 0,2	39,5 ± 0,2	38,6 ± 0,2
120	42,2 ± 0,2	40,2 ± 0,2	28,7 ± 0,2	37,9 ± 0,2	41,7 ± 0,2	40,6 ± 0,2	39,6 ± 0,2	38,7 ± 0,2

Onde:

\bar{T}_e : temperatura média de entrada do ar de secagem;

\bar{V}_e : velocidade média de entrada do ar de secagem;

\bar{P}_e : pressão média absoluta na entrada do secador;

\bar{T}_{amb} : temperatura média ambiente durante o experimento;

\overline{UR}_{amb} : umidade relativa média do ar ambiente durante o experimento;

\dot{W}_{VC} : trabalho realizado pelo ventilador;

T_{resist} : temperatura média da resistência;

t : tempo em minutos;

$m_{g,i}$: massa de milho instantânea em quilogramas;

UR_{amb} : umidade relativa do ambiente em porcentagem;

E_T : energia consumida pelo secador;

$M_{i,l,bs}$: umidade percentual instantânea do leito na base seca;

RM : razão de umidade;

DR : taxa de secagem;

P_e : pressão absoluta na entrada do secador;

η_e : eficiência de secagem instantânea;

η_{ex} : eficiência exergética de secagem instantânea;

$\eta_{e,teórica}$: eficiência de secagem instantânea teórica;

$\eta_{ex,teórica}$: eficiência exergética de secagem instantânea teórica;

$E_{x_destruída}$: Exergia destruída instantânea;

$\eta_{térmica}$: eficiência de térmica instantânea do secador;

$\eta_{ex,térmica}$: eficiência exergética térmica instantânea do secador;

T_e : temperatura na entrada do secador;

T_l : temperatura média do leito de grãos;

T_{amb} : temperatura ambiente instantânea;

T_s : temperatura na saída do secador;

T_2 : temperatura na posição 2 do secador;

T_3 : temperatura na posição 3 do secador;

T_4 : temperatura na posição 4 do secador;

T_5 : temperatura na posição 5 do secador;

CONCLUSÕES

- A variação de massa total durante o experimento foi de 86 gramas, que representam a massa de água que foi retirada do milho úmido. Sendo que metade dessa umidade, foi removida nos primeiros 40 minutos de experimento.
- O secador consumiu um total de 2844kJ de energia durante o experimento. Das quais 68% da energia foi utilizada para o aquecimento do ar e 32% para o ventilador e os demais componentes do sistema do secador.
- Os grãos de milho iniciaram o experimento com 22% de umidade na base seca, finalizando o mesmo com uma umidade média do leito de 17%. Assim, duas horas de secagem foram suficientes para uma variação de 5% de umidade.
- A taxa de secagem média foi de 2,5% h⁻¹, sendo que a taxa máxima observada foi de 4,8% h⁻¹ e ocorreu no tempo de 20 minutos, enquanto a taxa mínima foi de 1,4% h⁻¹ ocorrendo inicialmente nos 70 minutos de experimento e só retornando nos últimos 30 minutos do experimento.
- A eficiência de secagem média foi de 7%, com uma eficiência instantânea máxima de 14% aos 20 minutos e uma mínima de 4% aos 100 minutos.
- A eficiência exergética de secagem média foi de 0,38%, com uma eficiência exergética instantânea máxima de 0,59% aos 20 minutos e uma mínima de 0,25% aos 100 minutos de experimento.

EXPERIMENTO DE SECAGEM 2

Equipamento: Secador de grãos de leito fixo unidimensional.

Dia do experimento: 24/10/2018 **Início do experimento:** 10:30

Duração do experimento: 120 minutos

\bar{T}_e : (39,8 ± 0,3) °C \bar{V}_e : (1,3 ± 0,2) m/s \bar{P}_e : (92,58 ± 0,01) kPa

\bar{T}_{amb} : (25,3 ± 0,3) °C \overline{UR}_{amb} : (45 ± 4) % \dot{W}_{VC} : (243 ± 1) W

\bar{T}_{resist} : (218 ± 2) °C

ANÁLISE DE DADOS DO EXPERIMENTO

Tabela 1 – Principais medidas aferidas e calculadas do experimento.

t (min)	$m_{g,i}$ (kg)	UR_{amb} (%)	E_T (kJ)	$M_{i,l,bs}$ (%)	RM (-)	DR (% h ⁻¹)	P_e (kPa)	η_e (%)	η_{ex} (%)
0	2,134 ± 0,001	45 ± 4	-	22,5 ± 0,1	1,00 ± 0,01	-	92,58 ± 0,01	-	-
10	2,112 ± 0,001	45 ± 4	324 ± 18	21,3 ± 0,1	0,93 ± 0,01	7,6 ± 0,8	92,59 ± 0,01	16,6 ± 0,5	0,68 ± 0,03
20	2,10 ± 0,001	45 ± 4	330 ± 18	20,6 ± 0,1	0,88 ± 0,01	4,1 ± 0,8	92,58 ± 0,01	8,9 ± 0,5	0,49 ± 0,03
30	2,092 ± 0,001	45 ± 4	360 ± 18	20,1 ± 0,1	0,85 ± 0,01	2,8 ± 0,8	92,58 ± 0,01	5,4 ± 0,5	0,32 ± 0,03
40	2,084 ± 0,001	45 ± 4	360 ± 18	19,7 ± 0,1	0,83 ± 0,01	2,8 ± 0,8	92,58 ± 0,01	5,4 ± 0,5	0,33 ± 0,03
50	2,076 ± 0,001	45 ± 4	360 ± 18	19,2 ± 0,1	0,80 ± 0,01	2,8 ± 0,8	92,58 ± 0,01	5,5 ± 0,5	0,34 ± 0,03
60	2,070 ± 0,001	45 ± 4	360 ± 18	18,9 ± 0,1	0,78 ± 0,01	2,1 ± 0,8	92,58 ± 0,01	4,1 ± 0,5	0,26 ± 0,03
70	2,064 ± 0,001	45 ± 4	360 ± 18	18,5 ± 0,1	0,75 ± 0,01	2,1 ± 0,8	92,58 ± 0,01	4,1 ± 0,5	0,26 ± 0,03
80	2,058 ± 0,001	45 ± 4	360 ± 18	18,2 ± 0,1	0,73 ± 0,01	2,1 ± 0,8	92,58 ± 0,01	4,1 ± 0,5	0,26 ± 0,03
90	2,054 ± 0,001	45 ± 4	324 ± 18	18,0 ± 0,1	0,72 ± 0,01	1,4 ± 0,8	92,58 ± 0,01	3,1 ± 0,5	0,18 ± 0,03
100	2,048 ± 0,001	45 ± 4	360 ± 18	17,6 ± 0,1	0,70 ± 0,01	2,1 ± 0,8	92,58 ± 0,01	4,1 ± 0,5	0,26 ± 0,03
110	2,044 ± 0,001	45 ± 4	324 ± 18	17,4 ± 0,1	0,69 ± 0,01	1,4 ± 0,8	92,58 ± 0,01	3,1 ± 0,5	0,19 ± 0,03
120	2,042 ± 0,001	45 ± 4	360 ± 18	17,3 ± 0,1	0,68 ± 0,01	0,7 ± 0,8	92,58 ± 0,01	1,4 ± 0,5	0,09 ± 0,03

**Tabela 2 - Principais medidas aferidas e calculadas do experimento
continuação.**

t (min)	$\eta_{e,teórica}$ (%)	$E_{xdestruída}$ (kJ)	$\eta_{térmica}$ (%)
0	-	-	-
10	36	214	46
20	19	217	46
30	13	229	42
40	13	229	42
50	13	229	41
60	11	229	39
70	10	229	41
80	10	229	41
90	7	215	44
100	10	229	42
110	7	215	43
120	4	229	39

Tabela 2 – Temperaturas aferidas no experimento.

t (min)	T_e (°C)	T_l (°C)	T_{amb} (°C)	T_s (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_5 (°C)
0	39,6 ± 0,3	23,9 ± 0,2	26,2 ± 0,2	25,4 ± 0,2	24,3 ± 0,2	23,8 ± 0,2	23,8 ± 0,2	24,0 ± 0,2
10	39,9 ± 0,3	34,3 ± 0,2	25,9 ± 0,2	26,3 ± 0,2	38,6 ± 0,2	36,0 ± 0,2	32,8 ± 0,2	29,6 ± 0,2
20	39,5 ± 0,3	37,0 ± 0,2	25,8 ± 0,2	32,5 ± 0,2	39,3 ± 0,2	38,0 ± 0,2	36,2 ± 0,2	34,5 ± 0,2
30	40,0 ± 0,3	37,7 ± 0,2	26,1 ± 0,2	34,2 ± 0,2	39,5 ± 0,2	38,4 ± 0,2	36,9 ± 0,2	35,9 ± 0,2
40	40,4 ± 0,3	38,1 ± 0,2	26,0 ± 0,2	35,1 ± 0,2	39,7 ± 0,2	38,5 ± 0,2	37,5 ± 0,2	36,6 ± 0,2
50	39,7 ± 0,3	38,3 ± 0,2	25,9 ± 0,2	35,6 ± 0,2	39,7 ± 0,2	38,8 ± 0,2	37,9 ± 0,2	36,8 ± 0,2
60	39,5 ± 0,3	38,4 ± 0,2	26,0 ± 0,2	36,2 ± 0,2	39,7 ± 0,2	38,8 ± 0,2	37,9 ± 0,2	37,1 ± 0,2
70	39,5 ± 0,3	38,6 ± 0,2	25,8 ± 0,2	36,4 ± 0,2	39,7 ± 0,2	39,0 ± 0,2	38,2 ± 0,2	37,5 ± 0,2
80	39,4 ± 0,3	38,7 ± 0,2	26,0 ± 0,2	36,5 ± 0,2	39,7 ± 0,2	39,1 ± 0,2	38,4 ± 0,2	37,6 ± 0,2
90	39,6 ± 0,3	38,8 ± 0,2	26,5 ± 0,2	36,8 ± 0,2	39,9 ± 0,2	39,2 ± 0,2	38,4 ± 0,2	37,7 ± 0,2
100	39,9 ± 0,3	38,9 ± 0,2	26,3 ± 0,2	36,8 ± 0,2	39,8 ± 0,2	39,3 ± 0,2	38,6 ± 0,2	38,0 ± 0,2
110	39,8 ± 0,3	39,1 ± 0,2	26,5 ± 0,2	37,2 ± 0,2	40,0 ± 0,2	39,4 ± 0,2	38,8 ± 0,2	38,2 ± 0,2
120	40,1 ± 0,3	39,0 ± 0,2	26,7 ± 0,2	37,2 ± 0,2	39,9 ± 0,2	39,2 ± 0,2	38,7 ± 0,2	38,1 ± 0,2

CONCLUSÕES

- A variação de massa total durante o experimento foi de 92 gramas, que representam a massa de água que foi retirada do milho úmido. Sendo que praticamente metade dessa umidade, foi removida nos primeiros 30 minutos de experimento.
- O secador consumiu um total de 4140kJ de energia durante o experimento. Das quais 58% da energia foi utilizada para o aquecimento do ar e 42% para o ventilador e os demais componentes do sistema do secador.
- Os grãos de milho iniciaram o experimento com 22,5% de umidade na base seca, finalizando o mesmo com uma umidade média do leito de 17,3%. Assim, duas horas de secagem foram suficientes para uma variação de 5,2% de umidade.
- A taxa de secagem média foi de $2,6\% \text{ h}^{-1}$, sendo que a taxa máxima observada foi de $7,5\% \text{ h}^{-1}$ e ocorreu no tempo de 10 minutos, enquanto a taxa mínima foi de $0,7\% \text{ h}^{-1}$ ocorrendo ao final da secagem.
- A eficiência de secagem média foi de 5,6%, com uma eficiência instantânea máxima de 16,6% aos 10 minutos e uma mínima de 1,4% aos 120 minutos.
- A eficiência exergética de secagem média foi de 0,31%, com uma eficiência exergética instantânea máxima de 0,68% aos 10 minutos e uma mínima de 0,09% aos 120 minutos de experimento.

EXPERIMENTO DE SECAGEM 3

Equipamento: Secador de grãos de leito fixo unidimensional.

Dia do experimento: 17/10/2018 **Início do experimento:** 15:20

Duração do experimento: 120 minutos

\bar{T}_e : (50,3 ± 0,2) °C \bar{V}_e : (0,9 ± 0,2) m/s \bar{P}_e : (92,31 ± 0,01) kPa

\bar{T}_{amb} : (29,5 ± 0,2) °C \overline{UR}_{amb} : (56 ± 4) % \dot{W}_{VC} : (126 ± 1) W

\bar{T}_{resist} : (370 ± 2) °C

ANÁLISE DE DADOS DO EXPERIMENTO

Tabela 1 – Principais medidas aferidas e calculadas do experimento.

t (min)	$m_{g,i}$ (kg)	UR_{amb} (%)	E_T (kJ)	$M_{i,l,bs}$ (%)	RM (-)	DR (% h ⁻¹)	P_e (kPa)	η_e (%)	η_{ex} (%)
0	2,042 ± 0,001	57 ± 4	-	22,0 ± 0,1	1,000 ± 0,009	-	92,30 ± 0,01	-	-
10	2,026 ± 0,001	56 ± 4	324 ± 18	21,0 ± 0,1	0,940 ± 0,009	5,7 ± 0,8	92,30 ± 0,01	12 ± 1	0,41 ± 0,05
20	2,008 ± 0,001	56 ± 4	288 ± 18	19,9 ± 0,1	0,874 ± 0,009	6,4 ± 0,8	92,30 ± 0,01	15 ± 1	0,87 ± 0,05
30	1,998 ± 0,001	56 ± 4	288 ± 18	19,3 ± 0,1	0,838 ± 0,009	3,6 ± 0,8	92,30 ± 0,01	8 ± 1	0,57 ± 0,05
40	1,986 ± 0,001	56 ± 4	252 ± 18	18,6 ± 0,1	0,796 ± 0,009	4,3 ± 0,8	92,32 ± 0,01	12 ± 1	0,83 ± 0,05
50	1,978 ± 0,001	55 ± 4	288 ± 18	18,1 ± 0,1	0,765 ± 0,009	2,9 ± 0,8	92,31 ± 0,01	7 ± 1	0,51 ± 0,05
60	1,970 ± 0,001	55 ± 4	288 ± 18	17,7 ± 0,1	0,741 ± 0,009	2,9 ± 0,8	92,32 ± 0,01	7 ± 1	0,53 ± 0,05
70	1,964 ± 0,001	54 ± 4	288 ± 18	17,3 ± 0,1	0,717 ± 0,009	2,1 ± 0,8	92,31 ± 0,01	5 ± 1	0,40 ± 0,05
80	1,958 ± 0,001	55 ± 4	288 ± 18	16,9 ± 0,1	0,692 ± 0,009	2,1 ± 0,8	92,31 ± 0,01	5 ± 1	0,41 ± 0,05
90	1,952 ± 0,001	56 ± 4	324 ± 18	16,6 ± 0,1	0,673 ± 0,009	2,1 ± 0,8	92,32 ± 0,01	5 ± 1	0,38 ± 0,05
100	1,948 ± 0,001	57 ± 4	252 ± 18	16,3 ± 0,1	0,654 ± 0,009	1,4 ± 0,8	92,32 ± 0,01	4 ± 1	0,32 ± 0,05
110	1,942 ± 0,001	56 ± 4	288 ± 18	16,0 ± 0,1	0,638 ± 0,009	2,1 ± 0,8	92,32 ± 0,01	5 ± 1	0,43 ± 0,05
120	1,936 ± 0,001	55 ± 4	288 ± 18	15,6 ± 0,1	0,612 ± 0,009	2,1 ± 0,8	92,32 ± 0,01	5 ± 1	0,43 ± 0,05

**Tabela 2 - Principais medidas aferidas e calculadas do experimento
continuação.**

t (min)	$\eta_{e,teórica}$ (%)	$E_{xdestruída}$ (kJ)	$\eta_{térmica}$ (%)
0	-	-	-
10	33	206	37
20	36	186	43
30	19	187	45
40	24	168	49
50	16	187	42
60	16	187	44
70	12	187	43
80	13	187	41
90	12	206	37
100	8	168	47
110	13	187	40
120	12	187	45

Tabela 2 – Temperaturas aferidas no experimento.

t (min)	T_e (°C)	T_l (°C)	T_{amb} (°C)	T_s (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_5 (°C)
0	51.3 ± 0.2	27.0 ± 0.2	31.2 ± 0.2	28.6 ± 0.2	26.8 ± 0.2	26.8 ± 0.2	27.0 ± 0.2	27.3 ± 0.2
10	50.5 ± 0.2	36.0 ± 0.2	29.7 ± 0.2	26.8 ± 0.2	46.6 ± 0.2	38.5 ± 0.2	31.0 ± 0.2	27.8 ± 0.2
20	50.0 ± 0.2	42.0 ± 0.2	29.8 ± 0.2	32.4 ± 0.2	47.9 ± 0.2	44.4 ± 0.2	40.2 ± 0.2	35.7 ± 0.2
30	50.6 ± 0.2	44.0 ± 0.2	29.9 ± 0.2	37.3 ± 0.2	48.3 ± 0.2	45.7 ± 0.2	42.5 ± 0.2	39.5 ± 0.2
40	50.4 ± 0.2	45.4 ± 0.2	30.1 ± 0.2	40.0 ± 0.2	48.8 ± 0.2	46.6 ± 0.2	44.2 ± 0.2	41.8 ± 0.2
50	50.4 ± 0.2	46.0 ± 0.2	30.3 ± 0.2	41.2 ± 0.2	49.1 ± 0.2	47.1 ± 0.2	45.0 ± 0.2	42.8 ± 0.2
60	50.4 ± 0.2	46.6 ± 0.2	30.2 ± 0.2	42.6 ± 0.2	49.2 ± 0.2	47.5 ± 0.2	45.7 ± 0.2	43.8 ± 0.2
70	50.2 ± 0.2	46.7 ± 0.2	30.3 ± 0.2	42.6 ± 0.2	49.3 ± 0.2	47.5 ± 0.2	45.9 ± 0.2	44.2 ± 0.2
80	50.1 ± 0.2	46.9 ± 0.2	30.3 ± 0.2	43.1 ± 0.2	49.1 ± 0.2	47.4 ± 0.2	46.2 ± 0.2	44.8 ± 0.2
90	49.9 ± 0.2	47.7 ± 0.2	30.4 ± 0.2	42.8 ± 0.2	49.6 ± 0.2	48.6 ± 0.2	47.3 ± 0.2	45.4 ± 0.2
100	49.9 ± 0.2	47.7 ± 0.2	30.3 ± 0.2	44.0 ± 0.2	49.7 ± 0.2	48.2 ± 0.2	46.9 ± 0.2	45.9 ± 0.2
110	50.3 ± 0.2	47.7 ± 0.2	30.4 ± 0.2	44.4 ± 0.2	49.6 ± 0.2	48.3 ± 0.2	47.1 ± 0.2	45.8 ± 0.2
120	49.9 ± 0.2	47.7 ± 0.2	30.3 ± 0.2	44.0 ± 0.2	49.5 ± 0.2	48.3 ± 0.2	47.3 ± 0.2	45.7 ± 0.2

CONCLUSÕES

- A variação de massa total durante o experimento foi de 106 gramas, que representam a massa de água que foi retirada do milho úmido. Sendo que metade dessa umidade, foi removida nos primeiros 40 minutos de experimento.
- O secador consumiu um total de 3456kJ de energia durante o experimento. Das quais 74% da energia foi utilizada para o aquecimento do ar e 26% para o ventilador e os demais componentes do sistema do secador.
- Os grãos de milho iniciaram o experimento com 22% de umidade na base seca, finalizando o mesmo com uma umidade média do leito de 15,6%. Assim, duas horas de secagem foram suficientes para uma variação de 6,4% de umidade.
- A taxa de secagem média foi de 3,2% h⁻¹, sendo que a taxa máxima observada foi de 6,4% h⁻¹ e ocorreu no tempo de 30 minutos, enquanto a taxa mínima foi de 1,4% h⁻¹ ocorrendo nos 100 minutos de experimento.
- A eficiência de secagem média foi de 8%, com uma eficiência instantânea máxima de 15% aos 20 minutos e uma mínima de 4% aos 100 minutos.
- A eficiência exergética de secagem média foi de 0,51%, com uma eficiência exergética instantânea máxima de 0,87% aos 20 minutos e uma mínima de 0,32% aos 100 minutos de experimento.

EXPERIMENTO DE SECAGEM 4

Equipamento: Secador de grãos de leito fixo unidimensional.

Dia do experimento: 30/10/2018 **Início do experimento:** 09:43

Duração do experimento: 120 minutos

\bar{T}_e : (50,5 ± 0,3) °C \bar{V}_e : (1,3 ± 0,2) m/s \bar{P}_e : (92,58 ± 0,02) kPa

\bar{T}_{amb} : (26,7 ± 0,2) °C \overline{UR}_{amb} : (57 ± 4) % \dot{W}_{VC} : (243 ± 1) W

\bar{T}_{resist} : (390 ± 2) °C

ANÁLISE DE DADOS DO EXPERIMENTO

Tabela 1 – Principais medidas aferidas e calculadas do experimento.

t (min)	$m_{g,i}$ (kg)	UR_{amb} (%)	E_T (kJ)	$M_{i,l,bs}$ (%)	RM (-)	DR (% h ⁻¹)	P_e (kPa)	η_e (%)	η_{ex} (%)
0	2,180 ± 0,001	58 ± 4	-	22,1 ± 0,2	1,000 ± 0,008	-	92,57 ± 0,02	-	-
10	2,158 ± 0,001	58 ± 4	432 ± 18	20,9 ± 0,2	0,929 ± 0,008	7,4 ± 0,8	92,58 ± 0,02	12,4 ± 0,4	0,80 ± 0,03
20	2,144 ± 0,001	58 ± 4	468 ± 18	20,1 ± 0,2	0,882 ± 0,008	4,7 ± 0,8	92,58 ± 0,02	7,3 ± 0,4	0,62 ± 0,03
30	2,130 ± 0,001	56 ± 4	468 ± 18	19,3 ± 0,2	0,836 ± 0,008	4,7 ± 0,8	92,57 ± 0,02	7,3 ± 0,4	0,65 ± 0,03
40	2,122 ± 0,001	56 ± 4	504 ± 18	18,9 ± 0,2	0,814 ± 0,008	2,7 ± 0,8	92,58 ± 0,02	3,9 ± 0,4	0,36 ± 0,03
50	2,112 ± 0,001	58 ± 4	504 ± 18	18,3 ± 0,2	0,776 ± 0,008	3,4 ± 0,8	92,57 ± 0,02	4,9 ± 0,4	0,46 ± 0,03
60	2,104 ± 0,001	56 ± 4	468 ± 18	17,8 ± 0,2	0,750 ± 0,008	2,7 ± 0,8	92,58 ± 0,02	4,2 ± 0,4	0,39 ± 0,03
70	2,098 ± 0,001	58 ± 4	468 ± 18	17,5 ± 0,2	0,731 ± 0,008	2,0 ± 0,8	92,58 ± 0,02	3,2 ± 0,4	0,29 ± 0,03
80	2,092 ± 0,001	58 ± 4	504 ± 18	17,2 ± 0,2	0,710 ± 0,008	2,0 ± 0,8	92,57 ± 0,02	2,9 ± 0,4	0,28 ± 0,03
90	2,086 ± 0,001	58 ± 4	468 ± 18	16,8 ± 0,2	0,689 ± 0,008	2,0 ± 0,8	92,57 ± 0,02	3,2 ± 0,4	0,30 ± 0,03
100	2,080 ± 0,001	58 ± 4	468 ± 18	16,5 ± 0,2	0,670 ± 0,008	2,0 ± 0,8	92,57 ± 0,02	3,2 ± 0,4	0,31 ± 0,03
110	2,076 ± 0,001	56 ± 4	504 ± 18	16,3 ± 0,2	0,662 ± 0,008	1,3 ± 0,8	92,58 ± 0,02	2,0 ± 0,4	0,20 ± 0,03
120	2,070 ± 0,001	54 ± 4	468 ± 18	15,9 ± 0,2	0,643 ± 0,008	2,0 ± 0,8	92,58 ± 0,02	3,2 ± 0,4	0,32 ± 0,03

**Tabela 2 - Principais medidas aferidas e calculadas do experimento
continuação.**

t (min)	$\eta_{e,teórica}$ (%)	$E_{xdestruída}$ (kJ)	$\eta_{térmica}$ (%)
0	-	-	-
10	23	300	53
20	15	320	49
30	15	320	48
40	9	341	44
50	10	340	48
60	9	321	48
70	6	321	50
80	7	341	44
90	6	321	49
100	6	321	51
110	4	341	47
120	6	321	51

Tabela 2 – Temperaturas aferidas no experimento.

t (min)	T_e (°C)	T_l (°C)	T_{amb} (°C)	T_s (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_5 (°C)
0	50,9 ± 0,3	24,0 ± 0,2	26,5 ± 0,2	25,2 ± 0,2	24,2 ± 0,2	23,9 ± 0,2	23,9 ± 0,2	23,9 ± 0,2
10	49,9 ± 0,3	41,2 ± 0,2	26,9 ± 0,2	28,8 ± 0,2	48,3 ± 0,2	44,2 ± 0,2	38,8 ± 0,2	33,4 ± 0,2
20	49,5 ± 0,3	45,5 ± 0,2	26,9 ± 0,2	38,5 ± 0,2	49,0 ± 0,2	46,8 ± 0,2	44,4 ± 0,2	41,7 ± 0,2
30	50,1 ± 0,3	46,6 ± 0,2	27,0 ± 0,2	41,5 ± 0,2	49,2 ± 0,2	47,7 ± 0,2	45,6 ± 0,2	43,9 ± 0,2
40	50,6 ± 0,3	47,1 ± 0,2	26,7 ± 0,2	43,5 ± 0,2	49,2 ± 0,2	47,9 ± 0,2	46,4 ± 0,2	44,9 ± 0,2
50	50,0 ± 0,3	47,5 ± 0,2	27,0 ± 0,2	43,5 ± 0,2	49,3 ± 0,2	48,2 ± 0,2	46,9 ± 0,2	45,5 ± 0,2
60	51,2 ± 0,3	47,9 ± 0,2	27,2 ± 0,2	44,5 ± 0,2	49,9 ± 0,2	48,4 ± 0,2	47,3 ± 0,2	46,0 ± 0,2
70	51,0 ± 0,3	47,7 ± 0,2	27,2 ± 0,2	46,5 ± 0,2	49,9 ± 0,2	48,5 ± 0,2	47,5 ± 0,2	44,9 ± 0,2
80	50,1 ± 0,3	48,3 ± 0,2	27,3 ± 0,2	45,1 ± 0,2	49,8 ± 0,2	48,8 ± 0,2	47,7 ± 0,2	46,8 ± 0,2
90	50,9 ± 0,3	48,5 ± 0,2	27,3 ± 0,2	45,6 ± 0,2	49,7 ± 0,2	48,9 ± 0,2	48,1 ± 0,2	47,1 ± 0,2
100	50,4 ± 0,3	48,6 ± 0,2	27,3 ± 0,2	45,9 ± 0,2	49,9 ± 0,2	49,1 ± 0,2	48,2 ± 0,2	47,3 ± 0,2
110	50,8 ± 0,3	48,8 ± 0,2	27,2 ± 0,2	46,1 ± 0,2	50,0 ± 0,2	49,2 ± 0,2	48,3 ± 0,2	47,5 ± 0,2
120	51,3 ± 0,3	49,1 ± 0,2	27,2 ± 0,2	46,4 ± 0,2	50,5 ± 0,2	49,4 ± 0,2	48,5 ± 0,2	47,9 ± 0,2

CONCLUSÕES

- A variação de massa total durante o experimento foi de 110 gramas, que representam a massa de água que foi retirada do milho úmido. Sendo que metade dessa umidade, foi removida nos primeiros 40 minutos de experimento.
- O secador consumiu um total de 5724kJ de energia durante o experimento. Das quais 69% da energia foi utilizada para o aquecimento do ar e 31% para o ventilador e os demais componentes do sistema do secador.
- Os grãos de milho iniciaram o experimento com 22,1% de umidade na base seca, finalizando o mesmo com uma umidade média do leito de 15,9%. Assim, duas horas de secagem foram suficientes para uma variação de 6,2% de umidade.
- A taxa de secagem média foi de 3,1% h⁻¹, sendo que a taxa máxima observada foi de 7,4% h⁻¹ e ocorreu no tempo de 10 minutos, enquanto a taxa mínima foi de 1,3% h⁻¹ ocorrendo nos 110 minutos de experimento.
- A eficiência de secagem média foi de 4,8%, com uma eficiência instantânea máxima de 12,4% aos 10 minutos e uma mínima de 2% aos 110 minutos.
- A eficiência exergética de secagem média foi de 0,41%, com uma eficiência exergética instantânea máxima de 0,80% aos 10 minutos e uma mínima de 0,20% aos 110 minutos de experimento.

EXPERIMENTO DE SECAGEM 5

Equipamento: Secador de grãos de leito fixo unidimensional.

Dia do experimento: 23/10/2018 **Início do experimento:** 10:35

Duração do experimento: 120 minutos

\bar{T}_e : (60,6 ± 0,2) °C \bar{V}_e : (0,8 ± 0,2) m/s \bar{P}_e : (92,31 ± 0,01) kPa

\bar{T}_{amb} : (27,0 ± 0,4) °C \overline{UR}_{amb} : (48 ± 4) % \dot{W}_{VC} : (126 ± 1) W

\bar{T}_{resist} : (450 ± 2) °C

ANÁLISE DE DADOS DO EXPERIMENTO

Tabela 1 – Principais medidas aferidas e calculadas do experimento.

t (min)	$m_{g,i}$ (kg)	UR_{amb} (%)	E_T (kJ)	$M_{i,l,bs}$ (%)	RM (-)	DR (% h ⁻¹)	P_e (kPa)	η_e (%)	η_{ex} (%)
0	2,134 ± 0,001	52 ± 4	-	22,5 ± 0,2	1,000 ± 0,007	-	92,32 ± 0,01	-	-
10	2,110 ± 0,001	51 ± 4	576 ± 18	21,2 ± 0,2	0,932 ± 0,007	8,3 ± 0,8	92,32 ± 0,01	10,1 ± 0,4	0,72 ± 0,05
20	2,090 ± 0,001	50 ± 4	468 ± 18	20,0 ± 0,2	0,870 ± 0,007	6,9 ± 0,8	92,33 ± 0,01	10,3 ± 0,4	1,20 ± 0,05
30	2,074 ± 0,001	50 ± 4	468 ± 18	19,1 ± 0,2	0,821 ± 0,007	5,5 ± 0,8	92,32 ± 0,01	8,3 ± 0,4	1,03 ± 0,05
40	2,060 ± 0,001	48 ± 4	504 ± 18	18,3 ± 0,2	0,781 ± 0,007	4,8 ± 0,8	92,32 ± 0,01	6,7 ± 0,4	0,88 ± 0,05
50	2,050 ± 0,001	48 ± 4	468 ± 18	17,7 ± 0,2	0,748 ± 0,007	3,4 ± 0,8	92,32 ± 0,01	5,2 ± 0,4	0,70 ± 0,05
60	2,040 ± 0,001	48 ± 4	504 ± 18	17,2 ± 0,2	0,723 ± 0,007	3,4 ± 0,8	92,31 ± 0,01	4,9 ± 0,4	0,67 ± 0,05
70	2,030 ± 0,001	48 ± 4	504 ± 18	16,6 ± 0,2	0,690 ± 0,007	3,4 ± 0,8	92,31 ± 0,01	4,9 ± 0,4	0,67 ± 0,05
80	2,022 ± 0,001	48 ± 4	468 ± 18	16,1 ± 0,2	0,665 ± 0,007	2,8 ± 0,8	92,31 ± 0,01	4,2 ± 0,4	0,58 ± 0,05
90	2,016 ± 0,001	48 ± 4	504 ± 18	15,8 ± 0,2	0,648 ± 0,007	2,1 ± 0,8	92,31 ± 0,01	3,0 ± 0,4	0,41 ± 0,05
100	2,008 ± 0,001	47 ± 4	468 ± 18	15,3 ± 0,2	0,624 ± 0,007	2,8 ± 0,8	92,31 ± 0,01	4,3 ± 0,4	0,60 ± 0,05
110	2,002 ± 0,001	47 ± 4	468 ± 18	15,0 ± 0,2	0,607 ± 0,007	2,1 ± 0,8	92,30 ± 0,01	3,2 ± 0,4	0,45 ± 0,05
120	1,996 ± 0,001	46 ± 4	504 ± 18	14,6 ± 0,2	0,588 ± 0,007	2,1 ± 0,8	92,30 ± 0,01	3,0 ± 0,4	0,43 ± 0,05

**Tabela 2 - Principais medidas aferidas e calculadas do experimento
continuação.**

t (min)	$\eta_{e,teórica}$ (%)	$E_{xdestruída}$ (kJ)	$\eta_{térmica}$ (%)
0	-	-	-
10	27	365	37
20	24	301	43
30	20	302	41
40	16	323	42
50	12	303	42
60	12	324	41
70	13	324	39
80	10	303	44
90	8	324	38
100	10	303	44
110	8	303	42
120	7	324	41

Tabela 2 – Temperaturas aferidas no experimento.

t (min)	T_e (°C)	T_l (°C)	T_{amb} (°C)	T_s (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_5 (°C)
0	60,7 ± 0,2	23,6 ± 0,2	27,5 ± 0,2	24,8 ± 0,2	23,6 ± 0,2	23,5 ± 0,2	23,6 ± 0,2	23,8 ± 0,2
10	61,3 ± 0,2	41,8 ± 0,2	27,5 ± 0,2	24,7 ± 0,2	58,3 ± 0,2	46,8 ± 0,2	34,5 ± 0,2	27,7 ± 0,2
20	62,0 ± 0,2	52,3 ± 0,2	27,7 ± 0,2	35,6 ± 0,2	61,1 ± 0,2	55,9 ± 0,2	49,3 ± 0,2	43,0 ± 0,2
30	59,9 ± 0,2	54,5 ± 0,2	27,9 ± 0,2	43,8 ± 0,2	60,0 ± 0,2	56,4 ± 0,2	52,8 ± 0,2	48,8 ± 0,2
40	60,9 ± 0,2	55,8 ± 0,2	27,9 ± 0,2	46,4 ± 0,2	60,9 ± 0,2	57,2 ± 0,2	53,9 ± 0,2	51,1 ± 0,2
50	60,1 ± 0,2	56,8 ± 0,2	27,9 ± 0,2	48,4 ± 0,2	61,4 ± 0,2	58,0 ± 0,2	55,1 ± 0,2	52,5 ± 0,2
60	60,5 ± 0,2	57,0 ± 0,2	27,7 ± 0,2	50,5 ± 0,2	61,1 ± 0,2	58,0 ± 0,2	55,4 ± 0,2	53,4 ± 0,2
70	60,1 ± 0,2	57,4 ± 0,2	28,0 ± 0,2	50,7 ± 0,2	61,3 ± 0,2	58,7 ± 0,2	56,0 ± 0,2	53,8 ± 0,2
80	60,6 ± 0,2	57,6 ± 0,2	28,1 ± 0,2	51,3 ± 0,2	61,0 ± 0,2	58,5 ± 0,2	56,3 ± 0,2	54,5 ± 0,2
90	60,0 ± 0,2	58,1 ± 0,2	28,1 ± 0,2	52,3 ± 0,2	59,4 ± 0,2	61,1 ± 0,2	56,8 ± 0,2	55,1 ± 0,2
100	60,6 ± 0,2	58,2 ± 0,2	28,1 ± 0,2	52,6 ± 0,2	61,5 ± 0,2	58,9 ± 0,2	57,0 ± 0,2	55,3 ± 0,2
110	60,0 ± 0,2	58,3 ± 0,2	28,1 ± 0,2	52,5 ± 0,2	61,5 ± 0,2	59,1 ± 0,2	57,1 ± 0,2	55,6 ± 0,2
120	60,4 ± 0,2	58,7 ± 0,2	28,2 ± 0,2	52,9 ± 0,2	61,8 ± 0,2	59,4 ± 0,2	57,4 ± 0,2	56,1 ± 0,2

CONCLUSÕES

- A variação de massa total durante o experimento foi de 138 gramas, que representam a massa de água que foi retirada do milho úmido. Sendo que praticamente metade dessa umidade, foi removida nos primeiros 30 minutos de experimento.
- O secador consumiu um total de 5904kJ de energia durante o experimento. Das quais 85% da energia foi utilizada para o aquecimento do ar e 15% para o ventilador e os demais componentes do sistema do secador.
- Os grãos de milho iniciaram o experimento com 22,5% de umidade na base seca, finalizando o mesmo com uma umidade média do leito de 14,6%. Assim, duas horas de secagem foram suficientes para uma variação de 7,9% de umidade.
- A taxa de secagem média foi de $4,0\% \text{ h}^{-1}$, sendo que a taxa máxima observada foi de $8,3\% \text{ h}^{-1}$ e ocorreu no tempo de 10 minutos, enquanto a taxa mínima foi de $2,1\% \text{ h}^{-1}$ ocorrendo inicialmente nos 90 minutos de experimento e só retornando nos últimos 20 minutos do experimento.
- A eficiência de secagem média foi de 5,7%, com uma eficiência instantânea máxima de 10,3% aos 20 minutos e uma mínima de 3,0% aos 90 e aos 120 minutos.
- A eficiência exergética de secagem média foi de 0,69%, com uma eficiência exergética instantânea máxima de 1,20% aos 20 minutos e uma mínima de 0,41% aos 90 minutos do experimento.

EXPERIMENTO DE SECAGEM 6

Equipamento: Secador de grãos de leito fixo unidimensional.

Dia do experimento: 31/10/2018 **Início do experimento:** 10:13

Duração do experimento: 120 minutos

\bar{T}_e : (60,2 ± 0,7) °C \bar{V}_e : (1,3 ± 0,2) m/s \bar{P}_e : (92,58 ± 0,02) kPa

\bar{T}_{amb} : (26,8 ± 0,2) °C \overline{UR}_{amb} : (44 ± 4) % \dot{W}_{VC} : (243 ± 1) W

\bar{T}_{resist} : (445 ± 2) °C

ANÁLISE DE DADOS DO EXPERIMENTO

Tabela 1 – Principais medidas aferidas e calculadas do experimento.

t (min)	$m_{g,i}$ (kg)	UR_{amb} (%)	E_T (kJ)	$M_{i,l,bs}$ (%)	RM (-)	DR (% h ⁻¹)	P_e (kPa)	η_e (%)	η_{ex} (%)
0	2,144 ± 0,001	45 ± 4	-	22,1 ± 0,1	1,000 ± 0,007	-	92,59 ± 0,02	-	-
10	2,116 ± 0,001	45 ± 4	684 ± 18	20,5 ± 0,1	0,917 ± 0,007	9,6 ± 0,8	92,58 ± 0,02	9,9 ± 0,3	1,15 ± 0,04
20	2,096 ± 0,001	45 ± 4	684 ± 18	19,4 ± 0,1	0,859 ± 0,007	6,8 ± 0,8	92,58 ± 0,02	7,1 ± 0,3	0,98 ± 0,04
30	2,082 ± 0,001	44 ± 4	576 ± 18	18,6 ± 0,1	0,817 ± 0,007	4,8 ± 0,8	92,58 ± 0,02	5,9 ± 0,3	0,81 ± 0,04
40	2,070 ± 0,001	44 ± 4	648 ± 18	17,9 ± 0,1	0,780 ± 0,007	4,1 ± 0,8	92,58 ± 0,02	4,5 ± 0,3	0,64 ± 0,04
50	2,058 ± 0,001	44 ± 4	612 ± 18	17,2 ± 0,1	0,743 ± 0,007	4,1 ± 0,8	92,58 ± 0,02	4,8 ± 0,3	0,69 ± 0,04
60	2,050 ± 0,001	44 ± 4	576 ± 18	16,7 ± 0,1	0,717 ± 0,007	2,7 ± 0,8	92,58 ± 0,02	3,4 ± 0,3	0,49 ± 0,04
70	2,042 ± 0,001	44 ± 4	648 ± 18	16,3 ± 0,1	0,697 ± 0,007	2,7 ± 0,8	92,58 ± 0,02	3,0 ± 0,3	0,45 ± 0,04
80	2,034 ± 0,001	44 ± 4	576 ± 18	15,8 ± 0,1	0,669 ± 0,007	2,7 ± 0,8	92,58 ± 0,02	3,4 ± 0,3	0,50 ± 0,04
90	2,026 ± 0,001	44 ± 4	648 ± 18	15,4 ± 0,1	0,650 ± 0,007	2,7 ± 0,8	92,57 ± 0,02	3,1 ± 0,3	0,47 ± 0,04
100	2,020 ± 0,001	44 ± 4	612 ± 18	15,0 ± 0,1	0,629 ± 0,007	2,1 ± 0,8	92,58 ± 0,02	2,5 ± 0,3	0,37 ± 0,04
110	2,014 ± 0,001	44 ± 4	648 ± 18	14,7 ± 0,1	0,611 ± 0,007	2,1 ± 0,8	92,58 ± 0,02	2,3 ± 0,3	0,35 ± 0,04
120	2,008 ± 0,001	44 ± 4	648 ± 18	14,4 ± 0,1	0,599 ± 0,007	2,1 ± 0,8	92,58 ± 0,02	2,3 ± 0,3	0,35 ± 0,04

**Tabela 2 - Principais medidas aferidas e calculadas do experimento
continuação.**

t (min)	$\eta_{e,teórica}$ (%)	$E_{xdestruída}$ (kJ)	$\eta_{térmica}$ (%)
0	-	-	-
10	18	455	55
20	13	456	53
30	10	394	60
40	9	437	53
50	8	416	56
60	6	396	61
70	6	438	54
80	6	396	58
90	6	438	55
100	4	417	59
110	5	438	52
120	4	438	57

Tabela 2 – Temperaturas aferidas no experimento.

t (min)	T_e (°C)	T_l (°C)	T_{amb} (°C)	T_s (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_5 (°C)
0	61,8 ± 0,7	24,8 ± 0,2	24,9 ± 0,2	24,8 ± 0,2	24,9 ± 0,2	24,9 ± 0,2	24,8 ± 0,2	24,7 ± 0,2
10	61,3 ± 0,7	50,2 ± 0,2	24,9 ± 0,2	34,4 ± 0,2	60,0 ± 0,2	53,9 ± 0,2	47,1 ± 0,2	39,8 ± 0,2
20	60,5 ± 0,7	55,5 ± 0,2	24,8 ± 0,2	46,8 ± 0,2	59,7 ± 0,2	56,9 ± 0,2	54,1 ± 0,2	51,3 ± 0,2
30	59,8 ± 0,7	56,3 ± 0,2	25,1 ± 0,2	49,7 ± 0,2	59,7 ± 0,2	57,4 ± 0,2	55,0 ± 0,2	53,0 ± 0,2
40	59,2 ± 0,7	56,7 ± 0,2	24,7 ± 0,2	51,5 ± 0,2	59,8 ± 0,2	57,7 ± 0,2	55,5 ± 0,2	53,8 ± 0,2
50	59,4 ± 0,7	57,2 ± 0,2	24,7 ± 0,2	51,9 ± 0,2	60,1 ± 0,2	58,1 ± 0,2	56,0 ± 0,2	54,6 ± 0,2
60	59,4 ± 0,7	57,7 ± 0,2	24,6 ± 0,2	52,5 ± 0,2	60,6 ± 0,2	58,6 ± 0,2	56,3 ± 0,2	55,1 ± 0,2
70	59,5 ± 0,7	57,8 ± 0,2	24,7 ± 0,2	52,5 ± 0,2	60,2 ± 0,2	58,5 ± 0,2	56,8 ± 0,2	55,7 ± 0,2
80	59,3 ± 0,7	58,0 ± 0,2	25,0 ± 0,2	53,4 ± 0,2	60,4 ± 0,2	58,7 ± 0,2	57,1 ± 0,2	55,8 ± 0,2
90	60,0 ± 0,7	59,1 ± 0,2	25,0 ± 0,2	54,4 ± 0,2	61,4 ± 0,2	60,0 ± 0,2	58,4 ± 0,2	56,7 ± 0,2
100	60,8 ± 0,7	59,4 ± 0,2	25,5 ± 0,2	54,4 ± 0,2	61,7 ± 0,2	60,1 ± 0,2	58,5 ± 0,2	57,4 ± 0,2
110	59,9 ± 0,7	59,5 ± 0,2	25,7 ± 0,2	55,6 ± 0,2	61,5 ± 0,2	60,2 ± 0,2	58,7 ± 0,2	57,5 ± 0,2
120	61,5 ± 0,7	59,7 ± 0,2	25,6 ± 0,2	54,5 ± 0,2	61,7 ± 0,2	60,3 ± 0,2	59,0 ± 0,2	57,7 ± 0,2

CONCLUSÕES

- A variação de massa total durante o experimento foi de 136 gramas, que representam a massa de água que foi retirada do milho úmido. Sendo que metade dessa umidade, foi removida nos primeiros 30 minutos de experimento.
- O secador consumiu um total de 7560kJ de energia durante o experimento. Das quais 77% da energia foi utilizada para o aquecimento do ar e 23% para o ventilador e os demais componentes do sistema do secador.
- Os grãos de milho iniciaram o experimento com 22,1% de umidade na base seca, finalizando o mesmo com uma umidade média do leito de 14,4%. Assim, duas horas de secagem foram suficientes para uma variação de 7,7% de umidade.
- A taxa de secagem média foi de 3,8% h⁻¹, sendo que a taxa máxima observada foi de 9,6% h⁻¹ e ocorreu no tempo de 10 minutos, enquanto a taxa mínima foi de 2,1% h⁻¹ ocorrendo nos últimos 30 minutos de experimento.
- A eficiência de secagem média foi de 4,4%, com uma eficiência instantânea máxima de 9,9% aos 10 minutos e uma mínima de 2,3% nos últimos 20 minutos de experimento.
- A eficiência exergética de secagem média foi de 0,6%, com uma eficiência exergética instantânea máxima de 1,15% aos 10 minutos e uma mínima de 0,35% nos dois últimos tempos do experimento.

APÊNDICE I – PROGRAMAS DE CÁLCULO DE VARIÁVEIS E ERRO DE MEDIÇÕES DESENVOLVIDOS NO EES

PROGRAMA 1 - EFICIÊNCIAS ENERGÉTICAS E EXERGÉTICAS

"Calculo das eficiencias energeticas e exergeticas do secador"

"Constantes"

"Constantes de Euler"

euler = 2.71828

"Constantes dos gases"

R_a = 0.2870 [kJ/(kg*K)]

"Pressão Atmosférica em Belo Horizonte"

P_atm = 92 [kPa]

"Estado morto"

"Pressão, temperatura e umidade absoluta considerada no estado morto"

P_00 = 92 [kPa]

T_00 = T_ambK

omega_00=humrat(AirH2O,T=T_ambK,R=rh_amb,P=P_00)

"Entalpia do ambiente"

h_amb=enthalpy(AirH2O,T=T_ambK,R=rh_amb,P=P_atm)

"Conversão de temperaturas"

T_eK=converttemp(C,K,T_e)

T_sK=converttemp(C,K,T_s)

T_kK=converttemp(C,K,T_k)

T_ambK = converttemp(C,K,T_amb)

"Temperatura da superfície da resistência aletada para cada experimento"

T_Kr = T_Kr6

T_Kr1 = converttemp(C,K,230)

T_Kr2 = converttemp(C,K,218)

T_Kr3 = converttemp(C,K,370)

T_Kr4 = converttemp(C,K,390)

T_Kr5 = converttemp(C,K,450)

T_Kr6 = converttemp(C,K,445)

"Trabalho do ventilador - alterar de acordo com a velocidade"

W_dot_VC = 0.24322 [kW]

"W_dot_VC = 0.12626 [kW] - velocidade de entrada de 0.8 [m/s]"

"W_dot_VC = 0.24322[kW] - velocidade de entrada de 1.2 [m/s]"

"Condições de entrada"

h_e=enthalpy(AirH2O,T=T_eK,w=omega_e,P=P_e)

C_p_e=cp(AirH2O,T=T_eK,w=omega_e,P=P_e)

C_p_ve=cp(Water,T=T_eK,x=1)

omega_e=humrat(AirH2O,T=T_eK,R=rh_e,P=P_atm)

"Condições de saída"

$P_s = P_{atm}$
 $h_s = \text{enthalpy}(\text{AirH}_2\text{O}, T=T_{sK}, w=\omega_s, P=P_s)$
 $C_{p_s} = \text{cp}(\text{AirH}_2\text{O}, T=T_{sK}, w=\omega_s, P=P_s)$
 $C_{p_{vs}} = \text{cp}(\text{Water}, T=T_{sK}, x=1)$
 $\omega_s = m_{dot_v} / m_{dot_a} + \omega_e$

"Vazão de entrada"

$m_{dot_a} = V_{vol} / v_{esp}$
 $V_{vol} = V_{velo} * d^2 * \pi / 4$
 $v_{esp} = \text{volume}(\text{AirH}_2\text{O}, T=T_{eK}, w=\omega_e, P=P_e)$
 $m_{dot_v} = m_v / (10 * 60)$
 $d = 0.130 \text{ [m]}$

"% de consumo do secador térmico e mecânico"

$C_{ventilador} = 100 * W_{dot_{VC}} / E_{dot_t}$
 $C_{térmico} = 100 - C_{ventilador}$

"Eficiência Energética Térmica"

$E_{dot_e} = m_{dot_a} * (h_e - h_{amb})$
 $\eta_t = 100 * E_{dot_e} / (E_{dot_t})$

"Eficiência Exergética Térmica"

$\eta_{ex_t} = 100 * ((1 - (T_{00} / T_{Kr})) * (E_{dot_e}) + W_{dot_{VC}}) / ((1 - (T_{00} / T_{Kr})) * (E_{dot_t} - W_{dot_{VC}}) + W_{dot_{VC}})$

"Eficiência Energética de secagem teórica"

$\eta_{e_{teo}} = Q_{dot_{VC}} * 100 / E_{dot_e}$

"Eficiência Energética de secagem"

$E_v = h_{lv} * m_v$
 $h_{lv} = (3153518.6 - 2386.05 * T_{kK}) * (1 + 4.35 * \text{euler}^{-(28.25 * M_l)}) / 1000$
 $\eta_e = E_v * 100 / E_t$

"Eficiência Exergética"

$E_{dot_t} = E_t / (10 * 60)$
 $Q_{dot_{VC}} = E_v / (10 * 60)$
 $E_{dot_{xQ}} = (1 - T_{00} / T_{kK}) * Q_{dot_{VC}}$
 $E_{xQ} = (1 - T_{00} / T_{kK}) * E_v$
 $\eta_{ex} = 100 * E_{dot_{xQ}} / ((1 - (T_{00} / T_{Kr})) * (E_{dot_t} - W_{dot_{VC}}) + W_{dot_{VC}})$

"Exergia Destruída"

$E_{x_{destruída}} = 10 * 60 * (1 - \eta_{ex} / 100) * ((1 - (T_{00} / T_{Kr})) * (E_{dot_t} - W_{dot_{VC}}) + W_{dot_{VC}})$

	E_t [kJ]	m_v [kg]	P_e [kPa]	T_e [C]	T_s [C]	T_k [C]	T_{amb} [C]	rh_{amb} [%]	rh_e [%]	V_{velo} [m/s]	M_I [%]	η_e [%]
Run 1	684	0.028	92.58	61.34	34.38	50.2	24.9	0.47	0.07	1.33	0.205	9.88
Run 2	684	0.02	92.58	60.52	46.81	55.5	24.85	0.47	0.07	1.33	0.194	7.053
Run 3	576	0.014	92.58	59.83	49.7	56.3	25.09	0.46	0.07	1.33	0.186	5.885
Run 4	648	0.012	92.58	59.21	51.53	56.7	24.73	0.46	0.07	1.33	0.179	4.504
Run 5	612	0.012	92.58	59.41	51.93	57.2	24.72	0.46	0.07	1.33	0.172	4.794
Run 6	576	0.008	92.58	59.35	52.52	57.7	24.63	0.45	0.07	1.33	0.167	3.411
Run 7	648	0.008	92.58	59.5	52.49	57.8	24.68	0.46	0.07	1.33	0.163	3.045
Run 8	576	0.008	92.58	59.29	53.42	58	25.01	0.46	0.07	1.33	0.158	3.447
Run 9	648	0.008	92.57	60.03	54.43	59.1	24.96	0.45	0.07	1.33	0.154	3.078
Run 10	612	0.006	92.58	60.78	54.44	59.4	25.51	0.45	0.07	1.33	0.15	2.459
Run 11	648	0.006	92.58	59.9	55.56	59.5	25.72	0.45	0.07	1.33	0.147	2.334
Run 12	648	0.006	92.58	61.47	54.55	59.7	25.6	0.45	0.07	1.33	0.144	2.347

Parametric Table: Table 1

	$\eta_{e,teo}$ [%]	η_{ex} [%]	$E_{x,destruida}$ [kJ]	η_t [%]	$\eta_{ex,t}$ [%]	$C_{t\acute{e}rmico}$ [%]	$C_{ventilador}$ [%]
Run 1	16.08	1.148	455.4	61.43	85.03	78.66	21.34
Run 2	11.73	0.9766	456.2	60.14	83.91	78.66	21.34
Run 3	8.468	0.8081	394.2	69.5	95.62	74.66	25.34
Run 4	7.336	0.6432	436.9	61.39	86.12	77.48	22.52
Run 5	7.331	0.689	415.8	65.39	90.79	76.15	23.85
Run 6	4.904	0.4938	395.7	69.56	95.68	74.66	25.34
Run 7	4.912	0.4491	437.8	62	86.65	77.48	22.52
Run 8	5.025	0.4977	395.5	68.59	94.86	74.66	25.34
Run 9	4.934	0.4662	437.5	62.39	86.99	77.48	22.52
Run 10	3.708	0.3668	416.6	66.32	91.59	76.15	23.85
Run 11	3.849	0.3499	437.5	60.65	85.5	77.48	22.52
Run 12	3.686	0.3548	437.6	63.68	88.11	77.48	22.52

PROGRAMA 2 – UMIDADE DURANTE A SECAGEM

"Dados Fixos"

"Massa inicial total"

$m_{m0} = 2.124$

"Umidade Inicial dos grãos"

$M_{0_u} = 18$

"Umidade media instantanea do leito de grãos"

$M_{i_u} = 100 * (m_{m0} * (M_{0_u} / 100 - 1) + m_m) / m_m$

$M_{i_s} = 100 * (M_{i_u} / 100) / (1 - M_{i_u} / 100)$

Parametric Table: Table 1

	m_m	$M_{i,u}$	$M_{i,s}$
Run 1	2.124±0.001	18±0.1139	21.95±0.1694
Run 2	2.112±0.001	17.53±0.1147	21.26±0.1686
Run 3	2.098±0.001	16.98±0.1155	20.46±0.1676
Run 4	2.088±0.001	16.59±0.1161	19.88±0.1669
Run 5	2.08±0.001	16.27±0.1166	19.42±0.1663
Run 6	2.074±0.001	16.02±0.117	19.08±0.1659
Run 7	2.066±0.001	15.7±0.1175	18.62±0.1654
Run 8	2.062±0.001	15.53±0.1178	18.39±0.1651
Run 9	2.056±0.001	15.29±0.1182	18.05±0.1647
Run 10	2.05±0.001	15.04±0.1185	17.7±0.1642
Run 11	2.046±0.001	14.87±0.1188	17.47±0.1639
Run 12	2.042±0.001	14.71±0.1191	17.24±0.1637
Run 13	2.038±0.001	14.54±0.1193	17.01±0.1634

PROGRAMA 3 – UMIDADE DE EQUILÍBRIO E RAZÃO DE UMIDADE

"Dados fixos"

P_amb=92 [kPa]
 A = 8.654*10⁻⁵
 B = 49.81
 n = 1.8634

"Umidade Inicial do experimento"

M_0 = 0.221
 "Exp 1 e 3 M_0 = 0.22"
 "Exp 2 e 5 M_0 = 0.225"
 "Exp 4 e 6 M_0 = 0.221"

"Achando umidade relativa na entrada"

omega_amb=humrat(AirH2O,T=T_amb,R=rh_amb,P=P_amb)
 rh_e=relhum(AirH2O,T=T_e,w=omega_amb,P=P_amb)

"Umidade de equilibrio"

M_e = (-ln(1-rh_e)/(A*(T_e+B)))^(1/n)/100

"Razão de umidade"

MR = (M - M_e) / (M_0 - M_e)

Parametric Table: Table 1

	T _e	T _{amb}	M	rh _{amb}	MR	M _e
Run 1	61.78±0.7	24.88±0.2	0.221±0.001	0.45±0.04	1±0.007344	0.02843±0.001538
Run 2	61.34±0.7	24.9±0.2	0.205±0.001	0.45±0.04	0.9167±0.007092	0.02883±0.001562
Run 3	60.52±0.7	24.85±0.2	0.194±0.001	0.45±0.04	0.859±0.006985	0.02951±0.001602
Run 4	59.83±0.7	25.09±0.2	0.186±0.001	0.44±0.04	0.8168±0.006945	0.03±0.001662
Run 5	59.21±0.7	24.73±0.2	0.179±0.001	0.44±0.04	0.7799±0.006922	0.03021±0.001676
Run 6	59.41±0.7	24.72±0.2	0.172±0.001	0.44±0.04	0.7434±0.006897	0.03002±0.001664
Run 7	59.35±0.7	24.63±0.2	0.167±0.001	0.44±0.04	0.7173±0.006896	0.02998±0.001662
Run 8	59.5±0.7	24.68±0.2	0.163±0.001	0.44±0.04	0.6965±0.006898	0.02989±0.001656
Run 9	59.29±0.7	25.01±0.2	0.158±0.001	0.44±0.04	0.6694±0.00696	0.03042±0.001688
Run 10	60.03±0.7	24.96±0.2	0.154±0.001	0.44±0.04	0.6498±0.006922	0.02969±0.001643
Run 11	60.78±0.7	25.51±0.2	0.15±0.001	0.44±0.04	0.6292±0.006935	0.02955±0.001634
Run 12	59.9±0.7	25.72±0.2	0.147±0.001	0.44±0.04	0.6114±0.00706	0.03056±0.001695
Run 13	61.47±0.7	25.6±0.2	0.144±0.001	0.44±0.04	0.5989±0.006933	0.02902±0.001602

Parametric Table: Table 1

	rh _e
Run 1	0.06542±0.006229
Run 2	0.06683±0.006366
Run 3	0.06919±0.006595
Run 4	0.07085±0.006891
Run 5	0.07137±0.006945
Run 6	0.07067±0.006875
Run 7	0.07049±0.006858
Run 8	0.07021±0.00683
Run 9	0.0723±0.007035
Run 10	0.06966±0.006774
Run 11	0.06952±0.006756
Run 12	0.07332±0.00713
Run 13	0.06772±0.006577

PROGRAMA 4 – UMIDADE TESTE EM ESTUFA

"Base umida"

$$M_{0u}=100*(m_{gu}-m_{gs})/m_{gu}$$

"Base seca"

$$M_{0s}=100*(M_{0u}/100)/(1-M_{0u}/100)$$

Parametric Table: Table 1

	M_{0s}	M_{0u}	m_{gs} [kg]	m_{gu} [kg]
Run 1	17.24±0.5314	14.71±0.3866	0.174±0.0006	0.204±0.0006
Run 2	16.22±0.4972	13.95±0.3682	0.185±0.0006	0.215±0.0006
Run 3	11.96±0.4895	10.68±0.3905	0.184±0.0006	0.206±0.0006
Run 4	15.12±0.5319	13.13±0.4014	0.172±0.0006	0.198±0.0006
Run 5	15.79±0.5368	13.64±0.4004	0.171±0.0006	0.198±0.0006
Run 6	14.2±0.5389	12.44±0.4132	0.169±0.0006	0.193±0.0006

ANEXO A – CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS

We measure it. **testo**

Página Page 1/2

Certificado de calibração Calibration certificate

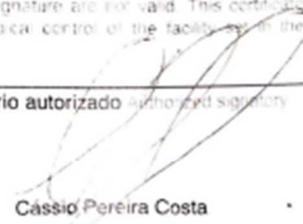
54314/1

Objeto Object	Testo 405i	---
Descrição Description	Termoanemômetro Digital	
Fabricante Manufacturer	Testo	---
Número da peça Part number	0500 1405	---
Número de série Serial number	48903134	---
Faixa de medição Measuring range	0 ... 30m/s	---
Resolução Resolution	0,01m/s	---
Tipo de sensor Type sensor	Térmica	---
Geometria do sensor Geometry sensor	Telescópio fio quente	---
Identificação Identification	Telescópio wire hot	---
Contratante Contractor	CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS	
Endereço Address	AVENIDA AMAZONAS, 5253 - NOVA SUIÇA - BELO HORIZONTE - MG	
Cliente Customer	INOVAÇÃO TESTE E MEDIÇÃO LTDA - ME	
Ordem de serviço Order number	54314	SO26312

Por meio deste confirmamos que o laboratório de calibração trabalha com um sistema de gestão de acordo com a NBR ISO/IEC 17025:2005. Os equipamentos de medição utilizados para a calibração são regularmente calibrados e os padrões são rastreáveis a rede brasileira de calibração (RBC) ou a redes internacionais equivalentes. O procedimento de medição corresponde com as regulamentações técnicas e normas válidas no momento da medição. Os documentos já estabelecidos para este procedimento estão disponíveis para visualização. Todos os dados medidos necessários podem ser encontrados neste certificado de calibração.

Hereby we confirm that the performing calibration laboratory is working with a management system according to NBR ISO/IEC 17025:2005. The measuring installations used for calibration are regularly calibrated and traceable to the Brazilian calibration standard (RBC) or equivalent international standards. The measuring procedure corresponds with technical regulations and norms valid at the time of the measurement. The documents established for this procedure are available for viewing. All the necessary measured data can be found on this calibration certificate.

Este certificado de calibração não pode ser reproduzido exceto na íntegra e com a permissão do laboratório de emissão. Certificados de calibração sem assinatura não são válidos. Este certificado refere-se exclusivamente ao instrumento mencionado acima. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. This calibration certificate may not be reproduced other than in full except with the permission of the issuing laboratory. Calibration certificates without signature are not valid. This certificate refers exclusively to the instrument mentioned above. This calibration does not exempt the metrological control of the facility set in the metrological regulations.

Data da calibração Calibration date	Local da calibração Calibration location	Signatário autorizado Authorized signatory
26/04/2017	Laboratório da Testo do Brasil	
Data da emissão Emission date	Técnico Technician	
26/04/2017	Luiz Eduardo de Souza Lopes	
Documento original Original document		Cássio Pereira Costa

Testo do Brasil Instrumentos de Medição Ltda

Av Eng Artur Segurado, 615 - Jd Leonor - CEP: 13.041-070 - Campinas - SP - Brasil
 Fone: 19 3731-5816 - Fax: 19 3731-5819 - E-mail: calibracao@testo.com.br - www.testo.com.br

Certificado de calibração Calibration certificate

54314/1

Equipamentos de medição Measuring equipment

Índice Index	Referência Reference	Rastreabilidade Traceability	Prox. Calibração Next cal.	Nº certificado Certificate n°
a	Padrão 06 S2	RBC	mai-17	SKV16050150
b	---	---	---	---

Condições ambientais Ambient conditions

Temperatura Temperature	18 ... 28°C	Pressão Pressure	930 ... 950 hPa
Umidade Humidity	45 ... 70%ur rF	Densidade do ar Air density	--- kg/m³

Procedimento de medição Measuring procedure

A calibração foi executada comparando a exibição do objeto a ser calibrado com os valores apresentados no instrumento de referência, PO 5.4-012 Rev 00. The calibration was executed by comparing the display of the object which was calibrated with the displayed values of the reference instrument, according PO 5.4-012 Ver 00

Resultados das medições Measuring results

Valores sem aplicação dos fatores de correção. Values without application of correction factors

Valor de referência Reference value	Valor medido Measured value	Erro de medição Measurement error	Incerteza de medição Measurement uncertainty		
			Valor Value	Fator de abrangência k Coverage factor k	V _{eff}
m/s (a)	m/s	m/s	m/s		
2,93	2,79	-0,14	0,18	2,00	-
4,94	4,85	-0,09	0,21	2,00	-
10,08	9,46	-0,62	0,35	2,00	-

Valores com aplicação dos fatores de correção. Values with application of correction factors

Valor de referência Reference value	Valor medido Measured value	Erro de medição Measurement error	Incerteza de medição Measurement uncertainty		
			Valor Value	Fator de abrangência k Coverage factor k	V _{eff}
m/s (a)	m/s	m/s	m/s		
---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	---

Observações especiais Special remarks

- 1 - Erro de medição = Valor medido - valor de referência.
- 2 - A incerteza de medição foi calculada de acordo com as recomendações do EA-4/02 com o fator de abrangência k (como descrito acima) e contém a incerteza do procedimento de medição e a incerteza do sistema de medição.
- 3 - Fatores de correção = Correção realizada no valor medido para compensar a pressão barométrica.

Testo do Brasil Instrumentos de Medição Ltda

Av Eng Artur Segurado, 615 - Jd Leonor - CEP: 13 041-070 - Campinas - SP - Brasil
 Fone: 19 3731-5816 - Fax: 19 3731-5819 - E-mail: calibracao@testo.com.br - www.testo.com.br

5013/2018-1

**CALIBRATEC****CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 34290/2018**

Contratante: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Avenida Amazonas, 5253 - Nova Suíssa - Belo Horizonte - MG

Solicitante: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Avenida Amazonas, 5253 - Nova Suíssa - Belo Horizonte - MG

2. Descrição

Instrumento: Termohigrômetro Digital

Marca: S/M

Modelo: S/M

Identificação: 17-1718

Série: S/N*

3. Método utilizado:**3.1 Procedimentos**

Conforme solicitação, nosso Laboratório realizou calibração no instrumento acima, com base em nosso procedimento de confirmação metrológica PGQ-005 e instrução de processo IPR-117 conforme última revisão.

4. Padrão(s) utilizado(s)

Descrição Padrão	Identificação	Certificado	Validade	Calibrado por
Calibrador Portátil Micro Processado	CAP.002	3631/17	05/2019	Ecll
Termohigrômetro Digital	THR.002	440/2018 - RBC	01/2021	Calibratec-MG
Termoresistência Tipo Pt-100 a 4 Fios	TPP.004	5018/18	05/2019	Ecll

5. Incerteza das medições:

U = incerteza das medições

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com ν_{eff} graus de liberdade efetivos correspondente a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA 4/02.

6. Condições ambientais:

Temperatura: 23 ± 5 °C

Umidade relativa: 52 ± 23 % u.r

7. Resultados

TEMPERATURA "IN"					
Indicação Padrão	Indicação Instrumento	Tendência	K	U (±)	Erro Total
(°C)	(°C)	(°C)		(°C)	(°C)
15,0	14,6	-0,4	2,00	0,1	0,5
25,0	24,9	-0,1	2,00	0,1	0,2
30,2	30,4	0,2	2,00	0,1	0,3
38,4	38,9	0,5	2,00	0,1	0,6
45,5	46,3	0,8	2,00	0,1	0,9

UMIDADE					
Indicação Padrão	Indicação Instrumento	Tendência	K	U (±)	Erro Total
(%UR)	(%UR)	(%UR)		(%UR)	(%UR)
30,8	32	1,2	2,00	3,5	4,7
45,5	47	1,5	2,00	3,5	5,0
60,0	63	3,0	2,00	3,5	6,5

TEMPERATURA "OUT"					
Indicação Padrão	Indicação Instrumento	Tendência	K	U (±)	Erro Total
(°C)	(°C)	(°C)		(°C)	(°C)
15,0	14,6	0,4	2,00	0,1	0,5
25,0	25,3	0,3	2,00	0,1	0,4
30,2	30,7	0,5	2,00	0,1	0,6
38,4	39,3	0,9	2,00	0,1	1,0
45,5	46,7	1,2	2,00	0,1	1,3

8. Notas

CALIBRATEC Comércio e Calibrações de Instrumentos de Medição Ltda

Av.: Severino Ballesteros Rodrigues, 2999 - B. Ressaca - Contagem-MG - CEP 32110-005

Telefone: (31) 3398-0022 - calibr@ac.mg@calibratec.com.br - www.calibratec.com.br



São não medimos - estamos calibrando!



CALIBRATEC®

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 34290/2018

Os valores obtidos foram considerados após média de três medições

Nota: Instrumento calibrado com ajuste.

Erro Total = (|Tendência| + |U|)

U = Incerteza expandida de medição.

K = Fator de abrangência

Os resultados deste certificado são válidos exclusivamente para o instrumento calibrado descrito, nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer outros, mesmo que similares.

Não é permitida a reprodução parcial deste certificado.

Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na Regulamentação Metrológica, no caso do instrumento regulamentado.

Este certificado está em conformidade com a norma ABNT NBR - ISO/ IEC-17025/2017.

A validade de calibração do instrumento deve ser estabelecida pelo usuário em plano de calibração descrito no seu sistema de qualidade.

Certificado digital, dispensa cópia física.

9. Observações

10. Considerações finais:

Data de Calibração: 27/09/2018

Data de emissão: 27/09/2018

Data de recebimento: 14/09/2018

Lucas Viana de Oliveira

Lucas Viana de Oliveira
Técnico Executante

FREDERICO CAMPOS
Coord. Qualidade

Oo nao medumas esforços



5013/2018-2


CALIBRATEC[®]
 CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 32938/2018

Contratante: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
 Avenida Amazonas, 5253 - Nova Suíssa - Belo Horizonte - MG

Solicitante: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
 Avenida Amazonas, 5253 - Nova Suíssa - Belo Horizonte - MG

2. Descrição

Instrumento: Transdutor de Pressão
 Marca: HUBA CONTROL
 Modelo: 694
 Capacidade: 0 a 5 mbar

Identificação: N188252
 Série: 0351434
 Valor de uma divisão: 0,01 mbar

3. Método utilizado:**3.1 Procedimentos**

Conforme solicitação, nosso Laboratório realizou calibração no instrumento acima, com base em nosso procedimento de confirmação metrológica PGQ-005 e instrução de processo IPR-090 conforme última revisão.

4. Padrão(ões) utilizado(s)

Descrição Padrão	Identificação	Certificado	Validade	Calibrado por
Manômetro Digital	MO.009	LP - 164 840	12/2018	Escala
Multímetro 4 1/2 Dígitos	MUL.004	E0019/2018	01/2019	Labelo

5. Incerteza das medições:

U = Incerteza das medição

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com Veff graus de liberdade efetivos correspondente a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA 4/02.

6. Condições ambientais:

Temperatura: 20 ± 2 °C Umidade relativa: 50 ± 15 % u.r

7. Resultados

SENTIDO CRESCENTE					
Indicação Instrumento	Indicação Padrão	Tendência	K	U (±)	Erro Total
(mbar)	(mbar)	(mbar)		(mbar)	(mbar)
1,00	0,98	0,02	2,00	0,07	0,09
2,00	1,99	0,01	2,00	0,07	0,08
3,00	3,03	-0,03	2,00	0,07	0,10
4,00	4,00	0,00	2,00	0,07	0,07
5,00	5,02	-0,02	2,00	0,07	0,09

SENTIDO DECRESCENTE					
Indicação Instrumento	Indicação Padrão	Tendência	K	U (±)	Erro Total
(mbar)	(mbar)	(mbar)		(mbar)	(mbar)
1,00	0,99	0,01	2,00	0,07	0,08
2,00	2,01	-0,01	2,00	0,07	0,08
3,00	3,03	-0,03	2,00	0,07	0,10
4,00	4,00	0,00	2,00	0,07	0,07
5,00	5,02	-0,02	2,00	0,07	0,09

8. Notas

Os valores obtidos foram considerados após média de três medições.

Nota: Instrumento calibrado com ajuste.

Erro Total = (|Tendência| + |U|)

U = Incerteza expandida de medição.

K = Fator de abrangência

CALIBRATEC Comércio e Calibrações de Instrumentos de Medição Ltda.
 Av.: Severino Ballesteros Rodrigues, 2999 - B. Ressaça - Contagem-MG - CEP 32110-005
 Telefax: (31) 3398-9022 - calibratec.mg@calibratec.com.br - www.calibratec.com.br



Só não medimos esforços!

2018-2

**CALIBRATEC[®]****CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 32938/2018**

Os resultados deste certificado são válidos exclusivamente para o instrumento calibrado descrito, nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer outros, mesmo que similares.

Não é permitida a reprodução parcial deste certificado.

Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na Regulamentação Metroológica, no caso do instrumento regulamentado.

Este certificado está em conformidade com a norma ABNT NBR - ISO/ IEC-17025/2017.

A validade de calibração do instrumento deve ser estabelecida pelo usuário em plano de calibração descrito no seu sistema de qualidade.

Certificado digital, dispensa cópia física.

9. Observações**10. Considerações finais:**

Data de Calibração: 19/09/2018

Data de emissão: 19/09/2018

Data de recebimento: 14/09/2018

Luis Fernando de Almeida e Silva
Técnico Executante

FREDERICO CAMPOS
Coord. Qualidade

Dá não medimos esforços!



1133/2017-1

**CALIBRATEC**[®]

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 8322/2017

Contratante: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Avenida Amazonas, 5253 - Nova Suíssa - Belo Horizonte - MG

Solicitante: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Avenida Amazonas, 5253 - Nova Suíssa - Belo Horizonte - MG

2. Descrição

Instrumento: Termômetro de Líquido Em Vidro

Marca: Incoterm

Modelo: S/M

Capacidade: -10 a 52 °C

Identificação: [®] 120534/07

Série: 120534/07

Valor de uma divisão: 0,1 °C

3. Método utilizado:**3.1 Procedimentos**

Conforme solicitação, nosso Laboratório realizou calibração no instrumento acima, com base em nosso procedimento de confirmação metrológica PGQ-005 e instrução de processo IPR-036 conforme última revisão.

4. Padrão(ões) utilizado(s)

Descrição Padrão	Identificação	Certificado	Validade	Calibrado por
Calibrador Portátil Microprocessado	CAP.004	7051/14	09/2017	Ecil
Termoresistência	TPP.005	3065/15	08/2018	Ecil

5. Incerteza das medições:

U = Incerteza das medições

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com Veff graus de liberdade efetivos correspondente a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA 4/02.

6. Condições ambientais:

Temperatura: 23 ± 5 °C

Umidade relativa: 50 ± 20 % u.r

7. Resultados

RESULTADOS					
Indicação Padrão	Indicação Instrumento	Tendência	K	U (±)	Erro Total ([®])
(°C)	(°C)	(°C)		(°C)	(°C)
5,3	5,4	0,1	2,00	0,1	0,2
15,2	15,5	0,3	2,00	0,1	0,4
25,1	25,4	0,3	2,00	0,1	0,4
35,2	35,6	0,4	2,00	0,1	0,5
45,1	45,4	0,3	2,00	0,1	0,4

8. Notas

Os valores obtidos foram considerados após média de três medições

Nota: Instrumento calibrado sem ajuste.

Erro Total = (|Tendência| + |U|)

U = Incerteza expandida de medição.

K = Fator de abrangência

Este certificado é válido exclusivamente para o instrumento calibrado descrito, nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer outros, mesmo que similares.

Não é permitida a reprodução parcial deste certificado.

A validade de calibração do instrumento deve ser estabelecida pelo usuário em plano de calibração descrito no sistema qualidade de acordo com a Norma 17025:2005 - Item 5.10.4.4.

Este certificado está em conformidade com a norma NBR - ISO - IEC-17025/2005.

Certificado digital, dispensa cópia física.

9. Observações

Só não medimos esforços!

CALIBRATEC Comércio e Calibrações de Instrumentos de Medição Ltda.
Av.: Severino Ballesteros Rodrigues, 2999 - B. Ressaca - Contagem-MG - CEP 32110-005
Telefax: (31) 3398-9022 - calibratec.mg@calibratec.com.br - www.calibratec.com.br



1/2