

PROJETO E ENSAIOS COM SECAGEM DE PIMENTA-ROSA (AROEIRA)

João Victor Fernandes (joaovictorfangeli1@gmail.com)

Aluno de graduação do curso de engenharia mecânica

Calebe Campos Lima (calebecamposlima@gmail.com)

Aluno de graduação do curso de engenharia mecânica

Diogo Braido Porto (diogobporto10@gmail.com)

Aluno de graduação do curso de engenharia mecânica

Guilherme Souza de Jesus (guilhermesouzadejesus05@gmail.com)

Aluno de graduação do curso de engenharia mecânica

Marcos Roberto Teixeira Halasz (marcoshalasz@yahoo.com.br)

Orientador

RESUMO

Este relatório descreve o projeto, construção e ensaios experimentais de um secador de pimenta-rosa (*Schinus terebinthifolius* — aroeira). O objetivo foi projetar o equipamento e avaliar a eficiência de perda de umidade em diferentes condições de operação. O trabalho incluiu revisão bibliográfica, estudo teórico das equações de perda de umidade, projeto em AutoCAD, construção do protótipo (estrutura em madeira com revestimento interno laminado, porta em isopor) com três lâmpadas halógenas de 75 W como fonte de aquecimento, instrumentação com termopar e anemômetro, e ensaios experimentais com medições de massa da amostra em tempos pré-determinados. Os dados coletados foram processados para obtenção do teor de umidade (base úmida) e discutidos com base na literatura consultada.

PALAVRAS-CHAVE: secagem, pimenta-rosa, convecção forçada, ventilação, umidade, protótipo.

1 – INTRODUÇÃO

A pimenta-rosa (*Schinus terebinthifolius*), conhecida popularmente como aroeira, é um fruto de grande relevância na culinária e na indústria alimentícia, devido ao seu sabor característico e propriedades funcionais. Contudo, seu elevado teor de umidade torna indispensável a aplicação de processos de secagem para garantir a conservação, reduzir perdas pós-colheita e manter a qualidade sensorial e nutricional.

A secagem é um método amplamente utilizado para prolongar a vida útil de produtos agrícolas, sendo essencial compreender os fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo projetar e construir um secador destinado à pimenta-rosa (aroeira) e avaliar a eficiência do processo por meio da perda de umidade sob diferentes condições experimentais (temperaturas e massas), utilizando instrumentação (termopar e anemômetro) para monitoramento. Esses trabalhos sustentaram os conceitos aplicados no projeto, como tipos de secadores, controle de temperatura, cálculo do teor de umidade e interpretação das curvas de secagem.

O estudo inclui revisão teórica, dimensionamento do equipamento, construção do protótipo e realização de ensaios experimentais, comparando os resultados obtidos com referências de secagem em estufa. A proposta busca contribuir para o desenvolvimento de soluções práticas e acessíveis, além de fornecer subsídios para futuras melhorias em processos de secagem de produtos agrícolas.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA OU REFERENCIAL TEÓRICO

Foram utilizados trabalhos e referências que embasam conceitos de aquecimento do ar em secadores, modelos de perda de umidade e estudos experimentais em mini secadores.

2.1 - MATURAÇÃO DOS GRÃOS E A NECESSIDADE DE SECAGEM

Com a globalização, a exportação de semente se tornou corriqueira, predispondo que se faça uma logística bem estruturada por trás, para que os produtos, principalmente grãos cheguem as bilhões de mesas no mundo inteiro. Para isso, é necessária uma tecnologia bem desenvolvida, como o cultivo e colheita no momento ideal, ou seja, mais perto da maturação física do produto desenvolvido, contudo, é de conhecimento que os grãos passam de 30% de teor de água, para se tornarem maduras, ocasionado em uma dificuldade do sistema de colheita mecânica (VILLELA & SILVA, 1992; PESKE & BARROS, 1997; MIRANDA et al., 1999).

O processo de maturação das sementes corresponde a uma etapa caracterizada por modificações de ordem morfológica, fisiológica e funcional, que se iniciam logo após a fecundação do óvulo e se estendem até o ponto em que ocorre o acúmulo máximo de massa seca (POPINIGIS, 1985). Esse estágio é denominado maturidade fisiológica e, de modo geral, é identificado como o momento em que as sementes se desprendem da planta-matriz, apresentando sua melhor qualidade, o que se reflete no maior teor de matéria seca, na capacidade germinativa e no vigor.

A partir do momento em que a semente atinge a maturidade fisiológica até sua utilização para a semeadura, ocorre um processo gradual de perda de qualidade fisiológica, decorrente de alterações bioquímicas e fisiológicas. A deterioração, muitas vezes imperceptível nos estágios iniciais, torna-se evidente com o passar do tempo, refletindo negativamente no vigor das sementes. Conforme Moraes (2000), a velocidade dessa perda de qualidade após a maturidade fisiológica está diretamente relacionada à espécie e à cultivar, além das condições a que as sementes são submetidas no campo, no período pós-colheita, durante o beneficiamento e no armazenamento.

Com o crescimento da agroindústria e consequentes investimentos em estudos e projetos nesse ramo, foi possível fazer descobertas e melhorar métodos pré-existentes. A secagem constitui uma etapa essencial na tecnologia de produção de sementes de qualidade superior, pois promove a redução do teor de umidade a níveis adequados para o armazenamento. Esse processo contribui para evitar alterações físicas e químicas resultantes do excesso de água, garantindo a conservação das características iniciais das sementes ao longo do armazenamento e permitindo que a colheita seja realizada próxima ao ponto de maturidade fisiológica, de modo que a atividade microbiana e reações químicas de deterioração sejam minimizadas. Baudet et al. (1999).

2.2 – PRINCÍPIOS E MÉTODOS DA SECAGEM

A secagem é considerada um dos métodos mais antigos utilizados para a conservação de alimentos de origem terrestre ou aquática. Após o surgimento da agricultura, seu maior desenvolvimento ocorreu na região conhecida como “Crescente Fértil” — atualmente correspondente ao Oriente Médio, abrangendo desde o Egito até a Mesopotâmia —, motivo pelo qual essa área é reconhecida como o “berço da civilização”. O clima com baixa umidade relativa foi um fator determinante para que os agricultores daquela região dispusessem de sementes com elevada qualidade fisiológica. Nesse contexto, sementes mantidas em condições de baixa umidade preservam de forma mais eficiente sua qualidade fisiológica (CARVALHO, 1994).

Os métodos de secagem podem ser classificados de acordo com diferentes critérios: quanto ao tipo de equipamento empregado (natural ou artificial), à forma de fornecimento de calor (contínua ou intermitente) e à movimentação da massa de sementes durante o processo (em regime estacionário ou contínuo). A secagem caracteriza-se como um processo de transferência simultânea de calor e massa, no qual a umidade presente nos grãos é removida e conduzida pelo fluxo de ar aquecido. Contudo, práticas inadequadas de manejo agrícola, bem como falhas na regulagem ou operação das colhedoras, frequentemente resultam na chegada dos grãos à etapa de secagem com elevados níveis de impurezas. Essa condição gera dificuldades adicionais tanto para a secagem quanto para a posterior aeração (SOGI et al., 2003; MILMAN, 2002).

Na secagem natural, é possível utilizar o vento e o sol para remover a umidade dos grãos, contudo a variável é o clima, devido as condições de temperatura e umidade relativa do ar não são adequadas ou quando se

trabalha com grandes volumes de sementes. Embora apresente baixo custo, caracteriza-se por ser um processo lento, no qual as sementes devem ser dispostas em camadas de no máximo 4 a 6 cm, com revolvimento periódico para evitar danos (MAIA, 1995). Entre suas limitações estão a elevada demanda de mão de obra, o baixo rendimento operacional e a total dependência das condições climáticas disponíveis (CARVALHO, 1994).

Na secagem artificial a fonte de calor utilizada na secagem pode variar, mas o que caracteriza o método artificial é a utilização de recursos mecânicos, elétricos ou eletrônicos para forçar o ar a atravessar a massa de sementes (CAVARIANI, 1996). Esse processo apresenta como principais vantagens a possibilidade de controlar a temperatura, o fluxo de ar e o tempo de exposição das sementes ao ar aquecido, fatores determinantes para a eficiência da secagem.

Segundo Villela (1991), a secagem artificial pode ser classificada em duas modalidades, de acordo com a capacidade do ar em fornecer calor e a necessidade de elevação de sua temperatura: secagem em baixa temperatura, que utiliza ar natural ou levemente aquecido (entre 1 e 8 °C acima da temperatura ambiente), e secagem em alta temperatura, na qual o ar é aquecido a valores iguais ou superiores a 8–10 °C acima da temperatura ambiente.

Portella e Eichelberger (2001), descrevem o processo de secagem envolvendo a retirada parcial de água do grão, com a transferência de calor do ar para o grão e por fluxo de vapor de água do grão para o ar. A necessidade é que a pressão parcial de evaporado de água da superfície do grão seja maior que a pressão parcial de vapor do ar inserido. Os mecanismos que explicam a movimentação da água durante a secagem das sementes podem ser descritos por diferentes teorias:

1. **Difusão líquida (teoria da difusão líquida):** baseia-se no gradiente de concentração de água, no qual a umidade se desloca de regiões mais úmidas (maior concentração) para regiões mais secas (menor concentração).
2. **Difusão de vapor (teoria difusional):** ocorre em função do gradiente de pressão de vapor, gerado pela diferença de temperatura entre distintos pontos do grão.
3. Escoamento de líquido e vapor (teoria do fluxo hidrodinâmico): resulta de variações na pressão interna total, associadas a diferenças de temperatura, concentração, retração e capilaridade.

3 – METODOLOGIA DO TRABALHO OU DESENVOLVIMENTO

3.1 ETAPAS

Revisão teórica sobre perda de umidade e modelos cinéticos.

Estudo comparativo de diferentes tipos de secadores (convectivos, bandejas, solares).

Seleção inicial: secador solar (estudo), posteriormente substituído por versão elétrica para maior controle experimental.

Projeto técnico em AutoCAD do protótipo.

Aquisição de materiais e construção do secador experimental.

Ensaios práticos: pesagens, medições de temperatura e velocidade do ar, coleta de dados em planilha Excel.

Processamento dos dados e análise dos resultados.

3.2 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO CONSTRUÍDO

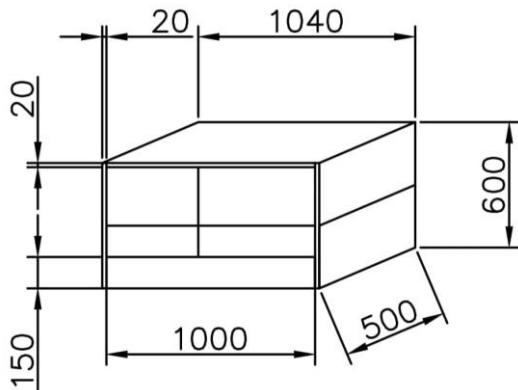


Figura 2 - Projeto do secador (autoCAD)



Figura 1 - Projeto em 3D do secador

O protótipo foi construído com estrutura em madeira e revestimento interno em papel laminado, que aumenta a reflexão térmica. A fonte de aquecimento consistiu em três lâmpadas halógenas de 75 W, e a porta foi confeccionada em isopor, atuando como isolante térmico.



Figura 4 - Secador montado



Figura 3 - Construção do secador



Figura 5 - Anemômetro interno

Para instrumentação, utilizou-se termopar para medição da temperatura e anemômetro (1 m/s) para medição da velocidade do ar. Foi instalado também um soprador na base do secador, responsável por impulsionar o ar frio pela parte inferior. Esse ar subia, atravessava as bandejas contendo as pimentas e saía por um orifício lateral superior, caracterizando o processo de secagem por convecção forçada.

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL EM ESTUFAS

Nas etapas iniciais, realizou-se a secagem em estufa das amostras, utilizada como referência para simular a quantidade de umidade retirada em condições controladas.

Para cada condição de ensaio (temperaturas nominais consideradas 60 °C e 80 °C) foram preparados recipientes com pimenta-rosa, registrados pesos do recipiente + amostra úmida e recipiente + amostra seca (após secagem em estufa de referência) e calculada a massa de água presente.

Os tempos de ensaio registrados (instantes de medição) foram: 5, 10, 15, 30, 60, 120, 180 e 1440 minutos.



Figura 6 - Pesagem de amostras

Dados organizados em planilha Excel fornecida e processados para cálculo de: massa úmida (g), massa seca (g), água presente (g) e teor de umidade na base úmida (%).

Observação importante sobre a natureza dos dados: cada registro de tempo correspondeu a uma amostra distinta (identificações 1 a 8). Ou seja, os pontos de tempo na planilha representam amostras independentes medidas naquele tempo, e não necessariamente a evolução temporal de uma mesma amostra. Isso limita a interpretação estrita como uma curva cinética tradicional de um único experimento repetido ao longo do tempo; a análise foi feita com base nos pontos experimentais disponíveis, com as devidas ressalvas apresentadas na seção de resultados e discussão.

3.4 RESULTADOS DO EXPERIMENTO EM ESTUFA

A partir da planilha foram calculadas as grandezas:

$$\text{massa_umida (g)} = (\text{Rec} + \text{pim. Umida}) - (\text{Recipiente})$$

$$\text{massa_seca (g)} = (\text{Rec} + \text{pim. Seca}) - (\text{Recipiente})$$

água (g) = massa de água presente na amostra (coluna fornecida)

$$\text{teor de umidade (\% base úmida)} = (\text{água} / \text{massa_umida}) \times 100$$

Abaixo estão as tabelas resumidas (valores arredondados) para as duas temperaturas testadas e seus respectivos gráficos.

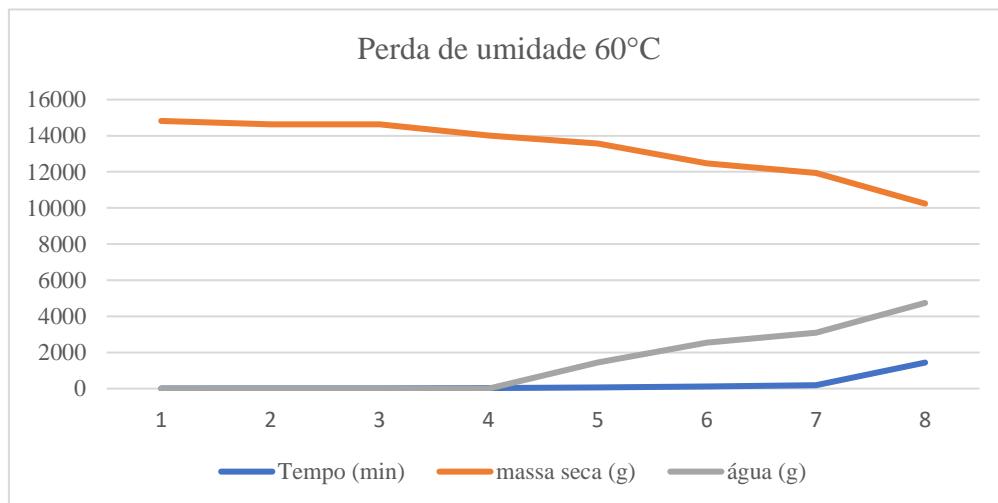
Dados processados — 60 °C:

Tabela 1: dados de massa de água contida na pimenta pós secagem em estufa a 60°C (continua)

Tempo (min)	massa úmida (g)	massa seca (g)	água (g)	teor umidade (%)
-------------	-----------------	----------------	----------	------------------

Tabela 1: dados de massa de água contida na pimenta pós secagem em estufa a 60°C (continuação)

5	15.061	14.818	0.243	1.613
10	14.988	14.627	0.361	2.409
15	15.056	14.626	0.430	2.856
30	14.936	14.003	0.933	6.247
60	15.019	13.566	1.453	9.674
120	15.019	12.469	2.550	16.978
180	15.028	11.931	3.097	20.608
1440	14.980	10.237	4.743	31.662

**Figura 7** - Resultado gráfico secagem em estufa a 60°C

Resumo estatístico (60 °C)

Teor de umidade médio (média aritmética dos pontos): ≈ 11.51 %

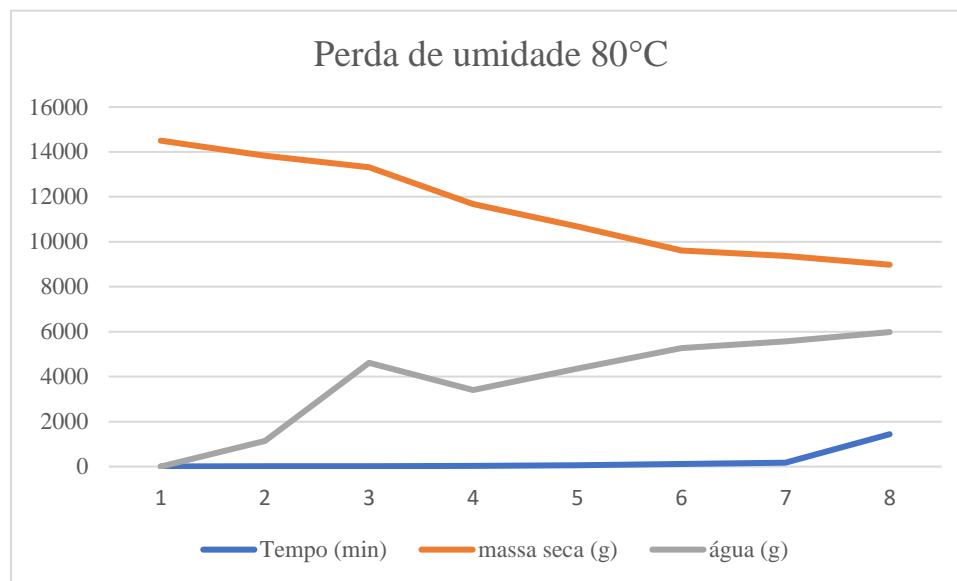
Mediana do teor de umidade: ≈ 7.96 %

Tempo máximo registrado: 1440 min (24 h)

Dados processados — 80 °C:

Tabela 2: dados de massa de água contida na pimenta pós secagem em estufa a 80°C

Tempo (min)	massa úmida (g)	massa seca (g)	água (g)	teor umidade (%)
5	14.991	14.501	0.490	3.269
10	14.970	13.831	1.139	7.609
15	17.935	13.315	4.620	25.760
30	15.071	11.672	3.399	22.553
60	15.048	10.681	4.367	29.020
120	14.873	9.608	5.265	35.400
180	14.934	9.366	5.568	37.284
1440	14.964	8.981	5.983	39.983

*Figura 8 -Resultado gráfico secagem em estufa a 80°C*

Resumo estatístico (80 °C)

Teor de umidade médio: $\approx 25.11\%$

Mediana do teor de umidade: $\approx 27.39\%$

Tempo máximo registrado: 1440 min (24 h)

3.5 OBSERVAÇÕES SOBRE OS DADOS

Os valores de teor de umidade não apresentam o comportamento estritamente monótono decrescente esperado para uma mesma amostra sendo submetida ao processo de secagem (ou seja, não vemos o mesmo ponto inicial e uma queda contínua até um ponto final). Isso ocorre porque cada tempo da planilha corresponde

3.6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL COM O SECADOR

Após a secagem em estufa, realizou-se a secagem experimental no protótipo desenvolvido. As amostras foram distribuídas em três bandejas independentes, cada uma com aproximadamente 500 g de pimenta-rosa. O processo ocorreu por um período total de três horas, sendo realizadas pesagens em tempos distintos:

Bandeja 1: 499,277 g (inicial) \rightarrow 475,877 g (após 1 hora).

Bandeja 2: 500,493 g (inicial) \rightarrow 455,540 g (após 2 horas).

Bandeja 3: 499,487 g (inicial) \rightarrow 455,540 g (após 3 horas).

*Figura 9 – Demonstração do secador ligado**Figura 10 - Secagem dos grãos de pimenta com uso de um soprador*

As pesagens foram realizadas em balança de precisão, permitindo acompanhar a perda de massa das amostras ao longo do processo. Os dados coletados foram organizados para análise posterior e comparação com os valores de referência obtidos em estufa.

4 – RESUTADOS E DISCUSSÕES OU ANÁLISE DOS DADOS

4.1 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Além das análises feitas para as temperaturas de 60 °C e 80 °C, foram registradas as massas iniciais e finais das três bandejas de pimenta-rosa submetidas à secagem no protótipo. A tabela a seguir apresenta os valores:

Tabela 3: dados de massa de água contida na pimenta pós secagem em protótipo a 60°C

Tempo (min)	massa úmida (g)	massa seca (g)	água (g)	teor umidade (%)
60	499,277	473,877	25,400	5,09%
120	500,493	455,54	44,953	8,98%
180	499,487	438,173	61,314	12,27%

Observa-se que, ao longo do processo de secagem, houve redução significativa de massa, relacionada diretamente à perda de umidade das amostras. O comportamento progressivo mostra que, quanto maior o tempo de exposição ao processo convectivo no secador, maior a redução de massa obtida.

4.2 OBSERVAÇÕES ADICIONAIS

Os valores experimentais reforçam a eficiência do protótipo desenvolvido. A utilização do soprador contribuiu para a uniformidade da secagem, garantindo fluxo de ar constante e velocidade controlada (1 m/s). O termopar permitiu monitoramento contínuo da temperatura interna, enquanto o anemômetro assegurou a estabilidade da velocidade do ar. Essas medições foram fundamentais para validar a metodologia proposta.

Além disso, a ventilação desempenha papel essencial no processo de secagem, pois promove a renovação contínua do ar em contato com as amostras. Isso evita a saturação local de vapor de água e mantém o

gradiente de pressão de vapor necessário para a transferência de massa. Em outras palavras, quanto mais eficiente a circulação do ar, maior a capacidade de remover a umidade superficial e interna da pimenta-rosa. A sopragem forçada de baixo para cima garante que o ar frio entre na base, aqueça ao atravessar as lâmpadas e bandejas, e finalmente saia pela lateral superior, levando consigo a umidade extraída. Esse mecanismo favorece uma secagem mais rápida e homogênea, reduzindo zonas de acúmulo de umidade e melhorando a eficiência global do processo. Os valores experimentais reforçam a eficiência do protótipo desenvolvido. A utilização do soprador contribuiu para a uniformidade da secagem, garantindo fluxo de ar constante e velocidade controlada (1 m/s). O termopar permitiu monitoramento contínuo da temperatura interna, enquanto o anemômetro assegurou a estabilidade da velocidade do ar. Essas medições foram fundamentais para validar a metodologia proposta.

4.3 DISCUSSÃO

Os ensaios realizados demonstraram que o protótipo de secador desenvolvido foi capaz de promover a redução de umidade da pimenta-rosa de forma controlada e relativamente uniforme. O uso de lâmpadas halógenas forneceu a energia térmica necessária, enquanto o soprador garantiu a circulação de ar por convecção forçada, favorecendo a remoção da umidade. A medição da velocidade do ar com anemômetro (1 m/s) e da temperatura interna com termopar assegurou maior confiabilidade aos dados.

A ventilação teve papel determinante, pois a renovação contínua do ar evitou a saturação local de vapor e manteve o gradiente de pressão de vapor responsável pela transferência de massa. Esse efeito se refletiu em secagem mais rápida e homogênea, diminuindo zonas de acúmulo de umidade nas bandejas.

Os resultados mostraram reduções de massa coerentes com os tempos de secagem aplicados, confirmando que o aumento da duração do processo leva a uma perda maior de umidade. Contudo, algumas limitações observadas incluem: variações nas massas iniciais das bandejas, ausência de controle fino da temperatura (não foi utilizado termostato) e heterogeneidade no aquecimento das amostras.

De modo geral, o protótipo se mostrou eficaz para os objetivos da iniciação científica, permitindo compreender de forma prática os fenômenos de transferência de calor e massa envolvidos na secagem.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O protótipo construído demonstrou eficiência na redução da umidade da pimenta-rosa, validando a metodologia aplicada e confirmando a importância da ventilação e sopragem no processo de secagem. Recomenda-se, para trabalhos futuros, a implementação de controle automático de temperatura, uso de resistências elétricas com regulagem de potência e melhorias na distribuição interna do fluxo de ar. Tais aperfeiçoamentos podem contribuir para maior reproduzibilidade dos experimentos e melhor adequação dos resultados aos modelos cinéticos de secagem. Uma análise cinética robusta — pois cada ponto de tempo representa uma amostra independente.

Recomenda-se padronizar a massa de amostra por ensaio e realizar medidas repetidas da mesma amostra ao longo do tempo (mesmas condições experimentais) para obter curvas de secagem confiáveis e permitir o ajuste de modelos cinéticos e a determinação de parâmetros (constants de velocidade, difusão efetiva, etc.).

Outras melhorias sugeridas: controle de potência/temperatura (termostato), melhor uniformidade do fluxo de ar (ventilador e difusor), substituição de lâmpadas por fonte com controle mais preciso (resistência elétrica ou painel com controle PWM), e isolamento térmico aprimorado.

6 – REFERÊNCIAS

TABORDA, D. M. Uso de energia solar para o aquecimento do ar em secadores de grãos.

SILVA, L. C. Dedução da equação de quebra de umidade em grãos.

GARCIA, R. L.; OLIVEIRA, M. A. M.; CORDEIRO, M. N. Estudo experimental da secagem de alimentos: balanço térmico em um mini-secador de baixo custo.

GARCIA, D. C.; BARROS, A. C. S. A.; PESKE, S. T.; MENEZES, N. L. A secagem de sementes (Drying of seeds).

DALPASQUALE, V. A. Secagem de Grãos — Eficiência Energética.

SERPA, D. Determinação do teor de umidade da semente de abóbora de leite submetida a secagem em estufa.

EIRAS, D. L. Perda de matéria seca em grãos de milho submetidos a sistemas de secagem natural e artificial.