

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL

LUCAS DE ZORZI BENATO

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA A SECAGEM DE NOZ-
PECÃ**

CAXIAS DO SUL

2018

LUCAS DE ZORZI BENATO

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA A SECAGEM DE NOZ-
PECÃ**

Trabalho de conclusão de curso apresentado para
obtenção de grau em Engenharia Mecânica da
Universidade de Caxias Do Sul.

Área de concentração: Engenharia Térmica

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini

CAXIAS DO SUL

2018

LUCAS DE ZORZI BENATO

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA A SECAGEM DE NOZ-
PECÃ**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
para obtenção de grau em Engenharia Mecânica
da Universidade de Caxias Do Sul.

Aprovado em dia/mês/ano

03/12/2018

Banca Examinadora

Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini

Prof. Dr. Marcelo Godinho

Prof. Dr. Marcos Alexandre Luciano

RESUMO

O Brasil é um dos principais exportadores de alimentos do mundo, os estudos e tecnologia na área agrícola têm contribuído para isso. Entre os produtos exportados e de crescente interesse econômico, está a noz-pecã. Sua comercialização depende de cuidados durante sua produção, e a secagem é parte essencial desse processo. O objetivo do estudo foi desenvolver e dimensionar um equipamento capaz de executar a secagem da produção de 25 toneladas de noz-pecã colhidas 30 dias. O equipamento prevê a secagem em lotes de uma tonelada. Ensaio foram realizados no Laboratório de Alimentos da Universidade de Caxias do Sul e dados de estudos obtidos na literatura, auxiliaram no desenvolvimento do sistema de secagem. Estimou-se um tempo de 15 horas, para a noz perder em torno de 20% da umidade, até atingir 6%. Com base nas informações obtidas, projetou-se um secador de camada fixa, em que os gases de combustão trocam calor de forma indireta com o ar insuflado no leito de nozes. Foi estimado um gasto de aproximadamente R\$ 11.600,00 para a montagem do equipamento e R\$ 2.000,00/safra para a aquisição do combustível necessário, no caso a lenha de eucalipto. O estudo também verificou que a combustão da lenha da nogueira proveniente da prática da poda e a utilização da casca da noz-pecã podem ser boas alternativas de combustíveis para substituir a lenha de eucalipto. O secador de noz-pecã mostrou-se uma ferramenta economicamente vantajosa na produção e comercialização desse produto, principalmente para o pequeno produtor rural, com baixo custo e de fácil execução.

Palavras-chave: Noz pecã, secador de grãos, secador de camada fixa, queima de biomassa.

ABSTRACT

Studies and new technologies on the agriculture scenario have been contributing to Brazil to become one of the main food exporters. The pecan nut is one of the many exported products, in which economic interest is growing. With the aim to reach good quality, it needs to be dry. The goal of this research is to develop equipment able to mechanically dry 25 tons of pecans in 30 days. The equipment is designed to dry one ton per batch. Tests performed at the Food Laboratory of University of Caxias do Sul and analysis based on previous studies estimated values of the drying equipment. The time required to drop about 20% of pecan humidity and reach the desirable value of 6% was 15 hours. Based on that information, a fixed layer drier was designed to provide heated air into the stationary layer of nuts. The equipment cost was defined in R\$ 11,600.00 plus the fuel cost of R\$ 2,000.00/crop. Eucalyptus was used as fuel, and the pecan wood from the pruning was evaluated as a cheaper alternative. The drier proved to be a convenient tool for the production and commercialization of nuts, especially for the small rural producer, with low cost and simple execution.

Keywords: Pecan nut, grain drying, fixed layer drier, nut drying.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO.....	7
1.2 LOCAL DO ESTUDO.....	11
1.3 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO.....	11
1.4 OBJETIVO GERAL.....	11
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
2.1 SECAGEM DE ALIMENTOS.....	13
2.2 DEFINIÇÕES PSICROMÉTRICAS.....	14
2.2.1 Temperatura de bulbo seco (T_{bs}) e bulbo úmido (T_{bu}).....	14
2.2.2 Entalpia (h).....	14
2.2.3 Temperatura de ponto de orvalho (T_o).....	15
2.2.4 Umidade relativa (U_r) e umidade absoluta (U_a).....	15
2.2.5 Psicrometria.....	15
2.3 SECAGEM DE GRÃOS.....	16
2.4 FORMAS DA ÁGUA.....	16
2.5 EQUIPAMENTOS DE SECAGEM.....	19
2.5.1 Secador de camada fixa.....	19
2.5.2 Secador de camada fixa com recirculação ou revolvimento.....	21
2.5.3 Secadores contínuos	23
2.5.4 Secador contínuo em cascata.....	24
2.5.5 Secagem combinada.....	25
2.6 EFICIÊNCIA DOS SECADORES.....	25
2.7 ENERGIA E TROCA DE CALOR EM SECADORES.....	26
2.8 PERDAS DE CARGA EM SECADORES.....	27
2.9 TRABALHOS DESENVOLVIDOS NA ÁREA.....	29
3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DO SECADOR.....	32

3.1 SECADOR DE CAMADA FIXA EM UM POMAR DE NOGUEIRA PECÃ EM CACHOEIRA DO SUL.....	32
3.2 NECESSIDADES DO PROJETO.....	32
3.3 FORNALHA, COMBUSTÍVEL E O AQUECIMENTO DO AR.....	33
3.4 VENTILADORES E CONTROLADOR DE TEMPERATURA.....	35
3.5 ENERGIA NECESSÁRIA PARA EVAPORARAÇÃO DE ÁGUA.....	35
3.6 CONSUMO DE ENERGÉTICOS NO PROCESSO DE SECAGEM.....	36
3.7 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA DE SECAGEM.....	37
4 RESULTADO E DISCUSSÕES.....	39
4.1 ENSAIOS PRELIMINARES REALIZADOS.....	39
4.2 EFICIÊNCIA DO LEITO FLUIDIZADO.....	42
4.3 DIMENSIONAMENTO DA ESTUFA DE AQUECIMENTO DO AR.....	42
4.4 BASE DA FORNALHA E COBERTURA DO TROCADOR DE CALOR.....	45
4.5 CONTROLADOR DE TEMPERATURA DO LEITO E GRELHA DO LEITO FIXO.....	46
4.6 SELEÇÃO DO VENTILADOR.....	46
4.6.1 Perda de carga nos tubos do gerador de calor.....	46
4.6.2 Perda de carga no leito fixo.....	47
4.6.3 Perda de carga na placa perfurada.....	49
4.7 VIABILIDADE E CUSTO DE PRODUÇÃO DO SECADOR DE NOZ PECÃ.....	50
5 CONCLUSÕES.....	53
5.1 SUGESTÕES PARA A CONTINUIDADE DO TRABALHO.....	54
REFERÊNCIAS.....	56
APÊNDICES.....	60
APÊNDICE A.....	61
APÊNDICE B.....	62
APÊNDICE C.....	63
APÊNDICE D.....	64
ANEXOS.....	69
ANEXO A.....	70

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO

A agricultura brasileira vem crescendo rapidamente nos últimos anos, devido, principalmente, ao aumento em número e qualidade de tecnologias e estudos na área. Hoje o Brasil está entre os três principais exportadores de alimentos do mundo (DALL'AGNOL, 2017).

O papel do Brasil na exportação de alimentos no mundo se deve em grande parte à produção de soja, o país ocupa a segunda colocação mundial nas exportações desse produto agrícola, ficando atrás apenas dos EUA. Além dessa, outras culturas são responsáveis pela importância da produção agrícola no Brasil (SOPA, 2016).

Uma dessas culturas é a da noz-pecã [*Carya illinoensis* (Wangenh) K. Koch, *Juglandaceae*]. Espécie nativa da América do Norte, originalmente encontrada nas planícies do Rio Mississippi e também próximo a Indiana, Illinois, Iowa. Seu nome é originado da palavra *Pakan*, que significa, na língua indígena norte-americana, *nut requiring stone to crack* (noz que requer pedra para quebrar) (FRONZA; HAMANN, 2016).

A pecanicultura, que consiste em plantio, cultivo e colheita da noz-pecã, foi introduzida na Região Sul na década de 60 com apoio financeiro do governo (FRONZA; HAMANN, 2016). Vinda do sul dos Estados Unidos, a pecanicultura logo perdeu força pela falta de conhecimento técnico na área, assim, muitos produtores desistiram de seus pomares e começaram a investir em outros produtos. Por volta de quatro décadas depois, com o avanço da tecnologia e das trocas de informações, as noqueiras-pecã (árvores produtoras de nozes), começaram a ressurgir no cenário rio-grandense (FRONZA; POLETTTO; HAMANN, 2013).

A noqueira pecã possui alta longevidade, podendo atingir mais de 150 anos. Por volta dos 15 aos 20 anos de idade, cada noqueira, com o preparo adequado, já é capaz de produzir cerca de 20 a 30 kg de noz pecã a cada safra e alcançar altura superior a 20 metros de altura. Em pomares comerciais a produção se inicia de forma lenta por volta do quinto ano. A figura 1 ilustra uma noqueira pecã já adulta.

Figura 1 – Árvore adulta de noqueira pecã



Fonte: Georgia Pecan Nursery (2018)

As nozes amadurecem e ficam prontas para a colheita em meados do mês de maio em pomares do hemisfério sul, sendo que, a partir do momento em que a casca externa se abre, ainda junto à árvore, já pode ser feita a colheita da noz. A figura 2 ilustra a noz pronta para colheita em sua casca, ainda na árvore.

Figura 2 – Noz pecã em período de colheita



Fonte: Farmer's Weekly (2018)

Ao se desprender da casca externa (verde), a noz colhida é composta ainda por uma casca marrom mais resistente, que, por sua vez, protege a amêndoa. A imagem 3 ilustra essa casca e a amêndoa.

Figura 3 – Amêndoa da noz pecã e sua casca



Fonte: Georgia Pecans (2018)

Segundo Fronza e Hamann (2016), estimam-se cerca de 10 mil hectares cultivados com noz-pecã no Sul do Brasil. Apenas 25% dessa área apresenta rendimento adequado, o que resulta em produção de 2,5 toneladas de noz-pecã por hectare. O restante dessa área produz abaixo de uma tonelada por hectare. Isso pode ser devido a um conjunto de fatores essenciais na prática da cultura, como preparo inadequado da terra, aplicação de calcário equivocada, desconhecimento dos micro e macronutrientes da terra, utilização inadequada de espécies polinizadoras, entre outros fatores importantes. (FRONZA; HAMANN, 2016).

Ao contrário do que ocorre no Hemisfério Norte, em que a safra de noz-pecã acontece entre os meses de outubro e novembro (WELLS, 2017); no Hemisfério Sul, ocorre entre os meses de abril e maio (FRONZA; HAMANN, 2016).

Após a colheita, a safra da nozeira-pecã precisa passar pelo processo de secagem e, algumas vezes, armazenamento para ser comercializada (TAKATA; PINTOS, 2013). Se por um lado, a colheita em muitos locais já é automatizada, por outro, a secagem da noz-pecã ainda é feita manualmente.

Segundo Herrera (2005), a amêndoa da noz-pecã é composta por 9-10% de proteínas, 10-15% de carboidratos, 3-4% de água, 1,5% de minerais e 73-75% de óleos, sendo que, destes, cerca de 93% são óleos insaturados (sem colesterol). Os óleos insaturados, quando submetidos a altas temperaturas, podem sofrer saturação, o que causa a decomposição de gordura e altera a cor e o sabor da amêndoa, deixando-a rançosa e com aspecto de estragada.

Logo depois de colhida, a noz-pecã apresenta umidade em torno de 25-30% que logo precisa ser reduzida a 5-6% (HERRERA, 2005). A retirada de umidade da noz-pecã é importante para o beneficiamento, que é a remoção da casca da noz, e para o armazenamento correto. Caso a umidade não seja removida, pode haver o aparecimento de fungos e rancificação, o que impede o consumo do produto (FRONZA; HAMANN, 2016). Para evitar o mofo, faz-se necessária umidade do ar abaixo de 60% e, para evitar a rancificação, deve-se evitar ultrapassar a temperatura de 38 °C (WELLS, 2018).

A principal técnica utilizada no Brasil para secagem natural é simples e de baixo custo, em que as nozes são dispostas sobre uma lona e colocadas sob a sombra, em locais arejados e com boa circulação de ar (FRONZA; HAMANN, 2016). Contudo, o aspecto negativo dessa prática é deixar o agricultor e a produção de nozes dependentes das condições climáticas, que podem interferir no processo de secagem e trazer prejuízos que impeçam a comercialização. Por isso, nos EUA, já existe a prática da secagem mecânica, que, além da umidade relativa e temperatura, leva em conta a quantidade de ar movida no processo (WELLS, 2018).

Segundo Fronza e Hamann (2016), uma comparação feita entre as duas práticas, com e sem a movimentação de ar na secagem, mostra diferença considerável, que varia de meio dia até três semanas no tempo de secagem, obtendo os resultados reportados na tabela 1.

Tabela 1 - Tempo de secagem das nozes em função da temperatura, umidade relativa e vazão do ar

Temperatura (°C)	Umidade relativa (%)	Vazão (m ³ /h)	Tempo de secagem
38,8	9	713	9 horas
18	40	1087	15 horas
25,5	39	509	17 horas
18	40	0	2-3 semanas
24	50	0	2-3 semanas
13	60	0	3-4 semanas
3	60	0	4-6 semanas

Fonte: Adaptado de Fronza e Hamann (2016).

Na Região Sul do país, a umidade do ar entre os meses de abril e maio é em torno de 80% e a temperatura média, de 18 °C, sendo assim, o tempo de secagem pode ser ainda maior (ROVANI, 2016). Segundo Wells (2018), quando a umidade relativa do ar é 80% ou mais por alguns dias, a secagem mecânica é preferida.

1.2 LOCAL DO ESTUDO

O desenvolvimento do trabalho ocorrerá em área localizada em Rincão das Flores, que se situa a cerca de 30 km ao leste da cidade de Caxias do Sul e próximo ao distrito de Criúva. Trata-se de propriedade familiar em que, no inverno de 2017, foram plantadas 1.800 nozeiras pecãs, totalizando 12,5 hectares de área de plantio. A expectativa dos proprietários é de expandir a área cultivada para 20 hectares nos próximos dois anos e colher em média 2 toneladas da fruta por hectare.

1.3 JUSTIFICATIVA DO ESTUDO

A secagem da noz-pecã e o armazenamento são etapas fundamentais da pecanicultura, no entanto, a técnica atualmente utilizada no Brasil ainda é rudimentar e dependente das condições climáticas. Com o intuito de otimizar o processo de secagem da noz-pecã e reduzir perdas do produto, o estudo tem como objetivo desenvolver e dimensionar o equipamento capaz de executar a secagem da produção de 25 toneladas de noz-pecã de um pomar de doze hectares e meio, em tempo satisfatório, o que corresponde a uma secagem de em média 15 horas. Mantendo as qualidades da amêndoa para sua comercialização.

1.4 OBJETIVO GERAL

Desenvolver e dimensionar um equipamento capaz de executar a secagem da produção de 25 toneladas de noz-pecã em um período de 30 dias.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os seguintes objetivos específicos são previstos:

- a) investigar o comportamento de secagem da noz-pecã, a partir de um secador que se tenha disponível;
- b) buscar geometrias e dimensões do equipamento de secagem de noz-pecã mais adequados ao aproveitamento calorífico para que ao final do processo a umidade do produto esteja em torno de 6%;

- c) estimar geometrias e dimensões do equipamento de secagem de noz-pecã mais adequados à demanda de 25 toneladas do produto durante o período de colheita de 30 dias;
- d) procurar geometrias e dimensões do equipamento de secagem de noz-pecã que otimizem o tempo de secagem, em torno de 12 horas por ciclo;
- e) discutir formas de fornecimento de calor.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

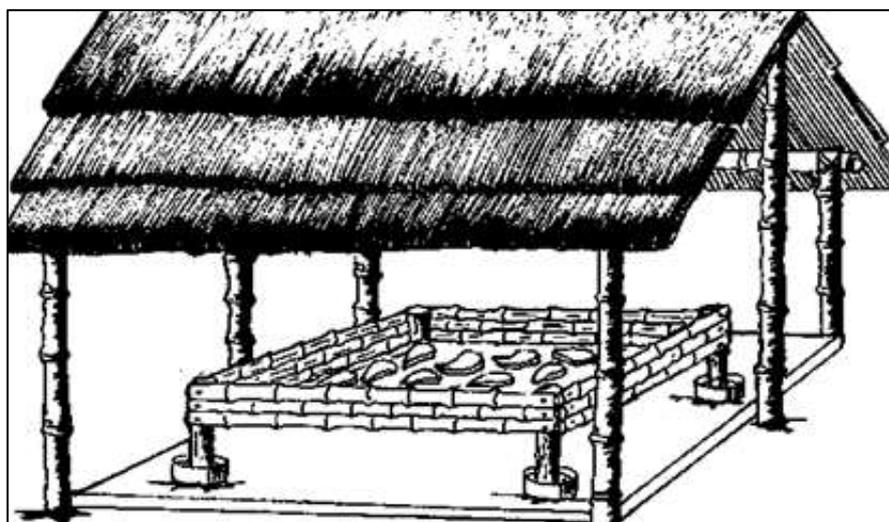
Neste capítulo são abordados conteúdos que relacionam o presente trabalho com estudos e conhecimentos já existentes na literatura brasileira e internacional. Serão apresentados modelos de equipamentos de secagem de alimentos já existentes, bem como o comportamento da água no processo de secagem.

2.1 SECAGEM DE ALIMENTOS

A definição de secagem de alimentos, segundo Celestino (2010), é a remoção de água ou qualquer outro líquido de um alimento sólido, que ocorre com o fornecimento de calor através do ar e consequente vaporização da água contida nele. O ar é constituído por uma mistura de gases (nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono), o vapor de água e uma série de contaminantes. A relação entre vapor de água e a mistura de gases pode aumentar ou diminuir conforme condições de pressão e temperatura (LOPES; SILVA; REZENDE, 2014).

A atividade de remover a umidade dos alimentos começou junto com o início do desenvolvimento da nossa espécie, quando o homem percebeu que, sob o sol, um pedaço de carne desidratava em contato com o sal e que ela poderia durar mais tempo em boas condições para consumo. Com isso, surgiu a possibilidade de armazenamento de produtos para consumo posterior, em tempos em que o alimento era escasso (VASCONCELOS, 2010).

Figura 4 - Local de secagem natural de alimentos



Fonte: MORAES; RODRIGUES (2006).

Com o tempo, o aperfeiçoamento das técnicas e a criação de equipamentos tornaram a secagem de alimentos mais rápida e eficaz, contribuindo para as atividades agrícolas de pequenos produtores até de grandes multinacionais da área. Ainda segundo Celestino (2010), a secagem reduz perdas após colheita e aumenta a vida útil dos produtos, além disso, é essencial para a logística de comercialização dos produtos, visto que, sem o peso da água, o transporte é facilitado. E ainda, a relação peso e nutrientes aumenta com a perda de água, o que eleva o valor nutritivo do alimento.

2.2 DEFINIÇÕES PSICROMÉTRICAS

As principais propriedades termodinâmicas do ar úmido podem ser vistas e compreendidas nessa seção.

2.2.1 Temperatura de bulbo seco (T_{bs}) e bulbo úmido (T_{bu})

A temperatura em um secador é medida de duas maneiras: temperatura de bulbo seco (T_{bs}) e temperatura de bulbo úmido (T_{bu}).

A temperatura de bulbo seco é medida com um termômetro comum inserido dentro do equipamento de secagem. Já a temperatura de bulbo úmido, é feita com um termômetro, semelhante ao T_{bs} que deve ser coberto com algodão embebido em água. Além disso, o bulbo úmido deve ser ventilado pelo ar cuja temperatura se busca, a uma velocidade mínima de 5,0 m/s. A temperatura de bulbo úmido também pode ser chamada de resfriamento evaporativo, que acontece quando a temperatura do líquido diminui pelo fato de as moléculas de água consumirem o calor do sistema para evaporarem, ocasionando resfriamento. Quando as temperaturas são identificadas, pode-se chegar ao valor da umidade relativa do ar, através das cartas psicrométricas. (LOPES; SILVA; REZENDE, 2014).

2.2.2 Entalpia (h)

Para o estudo de secagem de alimentos, define-se entalpia a energia contida no vapor de água quando se observa a mistura de vapor de água e ar seco. Apenas a diferença de entalpia representa interesse prático em processamento de produtos agrícolas, assim, o valor

escolhido para a temperatura de referência torna-se irrelevante. No Sistema Internacional de Unidades a entalpia é expressa em kJ por kg de ar seco e é determinante para o dimensionamento de aquecedores e sistemas de secagem, além da composição de custo operacional dos diferentes sistemas (LOPES; SILVA; REZENDE, 2014).

2.2.2 Temperatura de ponto de orvalho (T_o)

A temperatura de ponto de orvalho é a temperatura até a qual o ar úmido precisa ser arrefecido, sob pressão e razão de mistura constantes, para que a saturação em relação à água líquida seja atingida (TALAIA; VIGÁRIO, 2018).

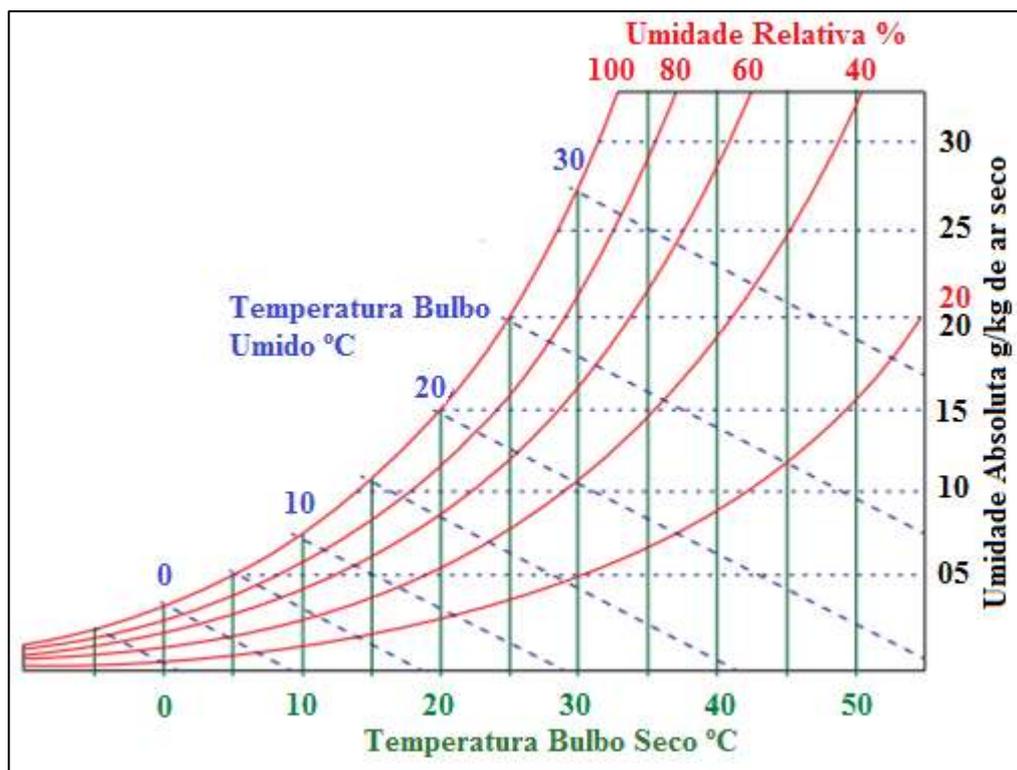
2.2.3 Umidade relativa (U_r) e umidade absoluta (U_a)

A umidade absoluta do ar representa a quantidade de massa de vapor de água presente em um quilograma de ar seco. A umidade relativa (UR) do ar é a quantidade de água contida no ar em relação a que ele poderia conter se estivesse saturado. O que define o percentual de UR é a relação entre as pressões parciais de vapor (P_v) e a de vapor saturado (P_s). Este valor pode ser conhecido com a comparação entre as pressões exercidas pelo ar insaturado (P_v) e pelo ar saturado (P_s), quando mantidas temperatura e pressão. Normalmente, a condição de saturação é alcançada mecanicamente (CELESTINO, 2010).

2.2.4 Psicrometria

A psicrometria estuda a relação termodinâmica entre as misturas de água e de ar. A partir dos estudos psicrométricos é possível identificar qual a capacidade do ar de reter água até que ele atinja seu ponto de saturação, ou seja, até que sua umidade relativa se torne igual a 100%. Essa capacidade está relacionada com a pressão atmosférica, a temperatura e a quantidade de água já existente por quilograma de ar (STOEKER; JABARDO; 2002). A figura 5 ilustra uma carta psicrométrica simplificada do ar úmido para a pressão de 101,325 kPa.

Figura 5 - Carta Psicrométrica simplificada do ar úmido para a pressão de 101,325 kPa



Fonte: Adaptado de Celestino (2010)

2.3 SECAGEM DE GRÃOS

Segundo Silva (2013), os grãos são higroscópicos, ou seja, têm a capacidade de receber ou ceder água na forma de vapor para seu redor. Esse processo só ocorre quando há uma diferença de umidade relativa na camada superficial do grão, chamada de microclima. O fluxo de vapor de água será estabelecido do ambiente com maior umidade relativa para o com menor, até que ambos entrem em equilíbrio higroscópico. Para que o microclima atinja uma umidade relativa maior do que a do ar que passa por seu redor, é necessário que o calor seja transferido para o grão, assim, a água contida no seu interior migra para a sua periferia. Com a utilização de ar quente, o calor faz com que o processo de secagem se inicie.

2.4 FORMAS DA ÁGUA

Segundo Celestino (2010), a água é o principal causador da deterioração por microrganismos e alterações por reações químicas e enzimáticas. Contudo, o conteúdo de água em um alimento não é suficiente para prever a sua estabilidade, por isso, alguns alimentos são instáveis apesar de seu baixo conteúdo de água.

Para medir o percentual de água P_a presente nos alimentos, utiliza-se a equação (1) na base seca (bs):

$$P_{a,bs} = \left(\frac{m_a}{m_s} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

onde m_a é a massa de água no produto e m_s é a massa sólida.

Nos alimentos, a água pode ser encontrada em três diferentes maneiras: água livre, água absorvida e água de hidratação ou ligada. A água livre é a que está presente nos poros dos alimentos e nas regiões intra-granulares. A água absorvida é a encontrada na superfície das macromoléculas de pectina, celulose, amido. Já a água de hidratação está ligada quimicamente com outras substâncias do alimento e geralmente não é eliminada nos processos de secagem tradicionais (CECCHI, 2003).

A água livre é responsável pela proliferação de microrganismos e atua como solvente para compostos cristalinos, pois mantém sua estrutura física. Segundo Celestino (2010), esta água é conhecida como água ativa (A_a) e corresponde à relação entre as pressões parciais de vapor de água (P_v) e pressão de vapor saturado (P_s). Na operação de secagem, a água é retirada do alimento por meio de uma fase gasosa insaturada, conforme a equação (2).

$$A_a = \frac{P_v}{P_s} \quad (2)$$

Como a água livre é a responsável pela quantidade de microrganismos que se proliferam, a indústria a considera como um dos fatores mais importantes para a conservação da qualidade dos alimentos. Esse índice de atividade da água assume valores numéricos de 0 a 1. Ainda segundo Celestino (2010) quando o índice A_a se encontra entre 0,0 e 0,3, as moléculas estão fortemente ligadas ao alimento e é praticamente zero o crescimento de microrganismos. Quando esse índice estiver próximo a 0,6, há pequeno crescimento dos mesmos. Acima de 0,6, são conhecidos os índices A_a ideais para o desenvolvimento de bactérias ($A_a = 0,91$), leveduras ($A_a = 0,88$) e fungos ($A_a = 0,8$).

A soma dessas duas formas de água resulta na água total de um alimento. Na tabela 2 pode-se observar que nem sempre o valor de conteúdo de água é o principal fator na questão de armazenamento, e sim o índice de atividade da água. Quando se comparam a marmelada

e o pão, por exemplo, nota-se um maior índice de água na marmelada, porém a água ativa no pão é maior, por isso, seu tempo de validade em relação à marmelada em condições iguais é menor.

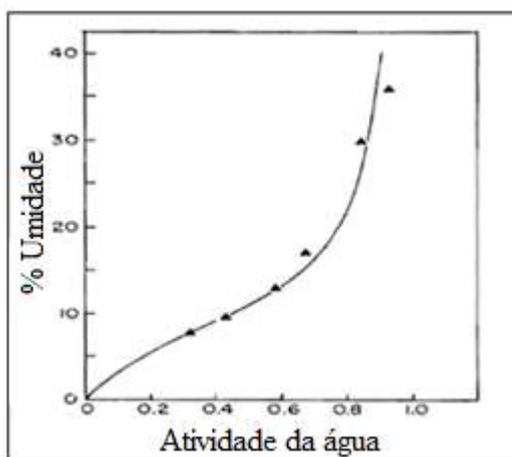
Tabela 2 - Valores do conteúdo de água e atividade da água de alguns alimentos.

Alimento	Conteúdo de água (% <i>bu</i>)	Água ativa (A_a)
Chips de batata	1,5	0,08
Leite desidratado	3,5	0,11
Biscoito	5,0	0,20
Farinha de trigo	14,5	0,72
Marmelada	85	0,86
Pão	40	0,96
Carne fresca	70	0,99

Fonte: Adaptado de Celestino (2010).

Uma maneira importante que se pode encontrar para relacionar a atividade da água de um alimento com seu conteúdo de umidade são as isotermas de sorção (vide figura 6). As isotermas podem sofrer alterações na sua configuração devido à mudança de temperatura. Contudo, elas são muito comparadas umas às outras quando se adicionam algumas substâncias, por exemplo, o sal de cozinha, que reduz significativamente a atividade da água, interferindo pouco na quantidade de água existente no alimento (ERICKSON, 1981).

Figura 6 - Exemplo de uma isoterma de sorção



Fonte: Adaptado de Erickson (1981).

2.5 EQUIPAMENTOS DE SECAGEM

A secagem de alimentos pode ser executada de maneira natural, quando o produto é deixado ao ar livre para perder umidade; ou de maneira artificial, quando há interferência humana no processo, manualmente, ou através de equipamentos próprios para processo (SILVA; AFONSO; DONZELLES, 2000).

A secagem artificial é dividida em secagem de alta temperatura, baixa temperatura e combinada. Esses três tipos de secagem se diferem apenas pela temperatura usada durante o processo. A secagem de alta temperatura se dá quando o alimento é seco a uma temperatura 10 °C acima da temperatura ambiente. A secagem de baixa temperatura ocorre quando a diferença é menor do que 10 °C. Já a secagem combinada é feita em duas etapas: primeiro, quando o alimento tem um elevado teor de umidade, a secagem de alta temperatura é usada, em seguida, após a umidade baixar para um valor estabelecido previamente, é usada a secagem de baixa temperatura (SILVA; AFONSO; DONZELLES, 2000).

2.5.1 Secador de camada fixa

O secador de camada fixa é composto por uma estrutura metálica contendo um fundo falso (plenum) perfurado, onde fica disposto o produto e por onde é insuflado ar quente através de um ventilador, que usualmente é gerado por uma fornalha localizada na lateral (GRECO; CAMPOS; KLOSOWSKI, 2010). A base do equipamento pode ser construída de alvenaria para reduzir custos de implantação e diminuir a troca de calor com o ambiente externo. A fonte de energia pode ser substituída por um sistema de aquecimento solar, como pode ser observada na figura 7 (GRECO; CAMPOS; KLOSOWSKI, 2010).

Figura 7 – Secador de grãos com aquecimento solar



Fonte: Ohio State University (2018).

A figura 8 ilustra um secador de grãos de camada fixa com sua fonte de calor localizada na lateral, sendo ela uma fornalha. A partir dela, o ar é soprado para arte inferior da câmara de secagem.

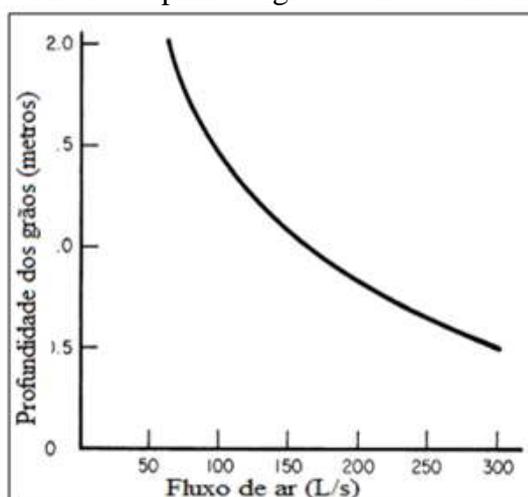
Figura 8 - Secador de camada fixa com sistema automático de descarga



Fonte: Brazafic Enterprises LTD (2018).

É importante observar que, nesse tipo de equipamento, não há uniformidade da secagem, visto que o material localizado junto à parte inferior seca primeiro, necessitando, conforme tamanho de grão, o revolvimento de material. Segundo Friesen (1980), a altura máxima de cada carga deve ser bem analisada para que haja um melhor aproveitamento da taxa de ar quente circulante. Muitas vezes, coloca-se uma grande quantidade de grãos para reduzir o número de cargas e descargas, mas isso pode levar a tempo maior de secagem total e secagem desuniforme. O gráfico da figura 9 mostra a relação entre a altura de grãos armazenados e a taxa de circulação de ar em um silo de secagem, pode-se observar redução drástica na taxa de circulação de ar quando a altura da pilha de grãos aumenta.

Figura 9 – Altura da pilha de grãos/taxa de circulação de ar



Fonte: adaptado de Friesen (1980).

Secadores de camada fixa, muitas vezes, possuem controladores de temperatura no interior do plenum, para que se possa obter a temperatura desejada do ar que entra em contato com o produto. Nos secadores mais sofisticados, esse processo é feito de forma automatizada por CLP (Controle Lógico Programável), em outros, pode ser realizado por controle da intensidade da chama na câmara de combustão, ou até mesmo pela mistura de ar externo ao ar insuflado.

2.5.2 Secador de camada fixa com recirculação ou revolvimento

Existem variações no sistema de secadores de camada fixa a fim de melhorar as condições de secagem. Segundo Greco, Campos e Klosowski (2010), na secagem de grãos de café, há redução de 30% no tempo de secagem quando feito o revolvimento dos grãos a cada três horas. O processo pode ser feito manualmente, com a movimentação homogênea dos grãos, ou mecanicamente, como mostrado na figura 10.

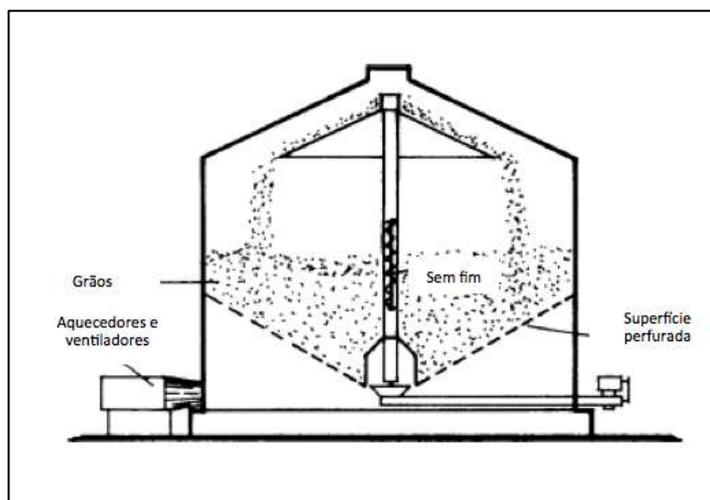
Figura 10 – Secador de camada fixa cilíndrico com sistema de revolvimento



Fonte: MF Rural (2018).

Além do revolvimento, existem secadores com a capacidade de movimentar ciclicamente os grãos, como é o caso dos secadores circulantes contínuos. A base desses tipos de secadores, como os anteriores, é perfurada por onde o ar quente é insuflado. A grande diferença está na estrutura helicoidal localizada no seu interior que, ao ser rotacionada, leva o material para a superfície do secador, onde ele é despejado novamente ao montante de ar seco, gerando um fluxo contínuo de movimentação (FRIESEN, 1980). A figura 11 ilustra um secador de camada fixa.

Figura 11 – Secador de camada fixa com sistema de recirculação

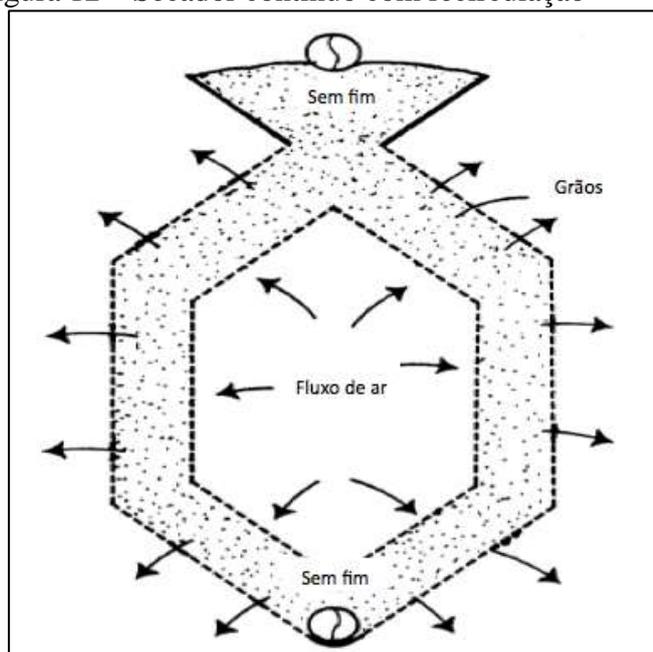


Fonte: Adaptado de Friesen (1980).

2.5.3 Secadores contínuos

Os secadores contínuos costumam operar na vertical, assim o produto fica localizado em colunas com superfícies laterais perfuradas, para que o fluxo de ar quente passe perpendicularmente por ele (SILVA; AFONSO; DONZELLES, 2000). Esses secadores podem ser recirculantes ou não, dependendo do dispositivo acoplado no interior do equipamento, como pode ser observado nas figuras 9 e 10. Secadores contínuos possuem alta capacidade de secagem se comparados aos de camada fixa, no entanto, seu custo de instalação e manutenção é mais elevado, assim como o consumo de combustível, devido à alta taxa de circulação de ar (Friesen, 1980). As figuras 12 e 13 mostram dois tipos de secadores contínuos com a capacidade de recircular e descarregar o produto.

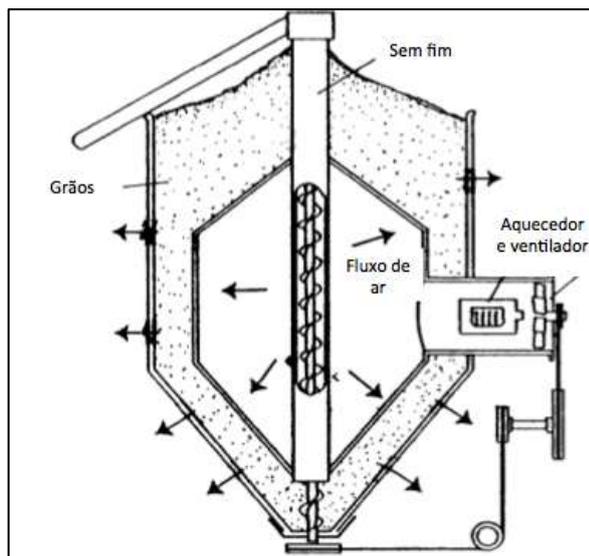
Figura 12 – Secador contínuo com recirculação



Fonte: Adaptado de Friesen (1980).

Ainda sobre os secadores contínuos, esse tipo de equipamento possui alta taxa de secagem devido ao movimento ininterrupto do processo. Possui ainda, conforme a Figura 13, a opção de descarga pela parte superior, levando assim à boa versatilidade de descarga. Os secadores contínuos possuem uma desvantagem importante quanto à robustez dos grãos a serem secos, pois devido à grande movimentação dentro do silo, o produto acaba por sofrer alguns danos físicos prejudiciais, o que em alguns casos não é aceitável para sua posterior comercialização (SILVA; AFONSO; DONZELLES, 2000).

Figura 13 – Secador contínuo de grãos com recirculação



Fonte: Adaptado de Friesen (1980).

2.5.4 Secador contínuo em cascata

Os secadores em cascata (figura 14) operam pela ação da gravidade, assim como os de fluxo contínuo. A parte interna do secador é composta por calhas invertidas em forma de “V” ou em formato circular, que fazem com que os grãos se movimentem durante o processo de descida. Isso requer fluxo menor de ar quando comparado ao secador de fluxo contínuo (SILVA; AFONSO; DONZELLES, 2000).

Figura 14 – Secador de cascata



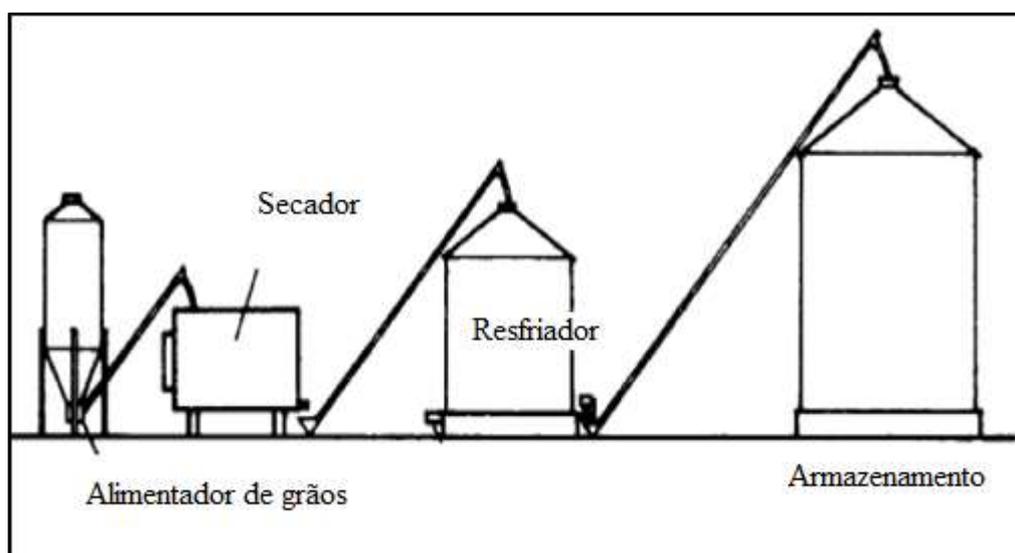
Fonte: Dryeration (2018).

2.5.5 Secagem combinada

A secagem combinada é muito utilizada para produtos com alto teor de umidade e consiste em duas etapas de secagem, conforme mostrado na Figura 15. Na primeira etapa, o material passa por secagem com ar quente e, depois, passa para outro equipamento onde ar frio é introduzido. Nesse processo, a maior quantidade de água é removida no primeiro estágio (SILVA; AFONSO; DONZELLES, 2000).

A transferência do silo de alta temperatura para o silo de baixa temperatura, segundo Friesen (1980), pode levar algumas horas e é chamado de aeração seca (*dry aeration*). Nessa passagem, o grão perde temperatura lentamente, resultando em vantagens para o sistema. Parte da secagem do grão acontece de forma natural, devido à sua temperatura inicial, o que reduz em até 20% o consumo de combustível e, como não existe o choque térmico entre ar quente e frio, o número de trincas e quebras é reduzido quando comparado aos outros sistemas, diminuindo eventuais perdas. Ainda segundo Friesen (1980), essa secagem é muito utilizada em locais onde existem grandes volumes de grãos. Para pequenos volumes, esse método não é indicado (FRIESEN,1980).

Figura 15 – Modelo de secagem combinada



Fonte: Adaptado de Friesen (1980).

2.6 EFICIÊNCIA DOS SECADORES

A eficiência de um secador é a razão entre a energia requerida para evaporar certa quantidade de água e a energia disponibilizada para o sistema, o que pode ser medido através da relação do combustível utilizado *versus* tempo e quantidade de material seco (SILVA; AFONSO; DONZELLES, 2000).

O *design* e modo de operação dos secadores são modificados constantemente por empresas e produtores agrícolas com objetivo de minimizar custos e aumentar produtividade. É necessário encontrar um modo operacional que represente adequadamente o custo benefício para o usuário e sua produção, considerando algumas variáveis como (FRIESEN, 1980):

- a) o aumento da velocidade do ar irá propiciar a secagem mais rápida, porém aumenta o consumo de combustível;
- b) o aumento na altura ou na largura do depósito de material, em secadores de camada fixa ou nas colunas verticais, melhora o aproveitamento da energia gerada pelo combustível, mas os tempos de secagem são maiores;
- c) a diminuição no tamanho do grão reduz a taxa de circulação de ar e a taxa de saída de ar dos ventiladores, fazendo com que se possa trabalhar com rotação de motor menor com mesma eficiência de evaporação de água dos grãos, porém tempos maiores de secagem são esperados;
- d) quanto menor for a diferença entre temperatura de secagem e temperatura ambiente, maior será a variação de consumo energético caso a temperatura externa se modifique. Por exemplo, se a variação de temperatura entre grão e ambiente for de 25 °C e a temperatura ambiente variar 1 °C, o consumo de combustível varia em torno de 4%. Caso esta diferença aumente para 50 °C e a temperatura externa variar 1 °C, o consumo de combustível varia apenas 2%;
- e) a presença de elementos indesejados também afeta a eficiência de secagem, pois também demandam energia para serem secos. Por esse motivo, deve-se executar a limpeza de pré-secagem a fim de remover restos de folhas, galhos e quaisquer outras impurezas.

2.7 ENERGIA E TROCA DE CALOR EM SECADORES

O dimensionamento de um trocador de calor se dá a partir do tipo e da temperatura dos fluidos que escoam pelas suas superfícies. Segundo Incropera et al. (2018), existem dois métodos para se analisarem os trocadores de calor: método da Média Logarítmica das Diferenças de Temperatura (MLDT ou ΔT_{ml}); e o método da efetividade – Número de Unidades de Transferência (ε -NUT). No presente estudo foi utilizado o método ΔT_{ml} .

Ainda segundo Incropera et al. (2018), para se projetar um trocador de calor pelo método ΔT_{ml} , além das temperaturas de entrada e de saída, são necessários também o coeficiente global de transferência de calor e a área superficial disponível para troca de calor. Com esses valores pode-se escrever a equação (3):

$$\dot{Q} = F \cdot U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad (3)$$

Onde \dot{Q} é a quantidade de calor trocada [kW]; U é o coeficiente global de transferência de calor [$W/m^2 \cdot K$]; F é o fator de correção utilizado no método ΔT_{ml} para trocadores de calor diferentes daqueles de duplo-tubo correntes opostas ou paralelas; A é a área superficial em contato com o fluido [m^2]; e ΔT_{ml} é a média logarítmica da diferença das temperaturas.. O ΔT_{ml} é dado pela equação (4) a seguir.

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (4)$$

Onde ΔT_1 e ΔT_2 são as diferenças de temperatura de entrada e saída dos gases de combustão e do ar aquecido que entrara em contato com o produto a ser seco.

2.8 PERDAS DE CARGA EM SECADORES

Ao se deslocar no interior dos tubos ou dutos de troca de calor a parcela de ar que está em contato com as paredes adquire a velocidade das mesmas, cujo valor é nulo. Isso influencia as partículas vizinhas, o que leva à dissipação de energia do fluido e à perda de carga ao longo do trajeto, as chamadas perdas de carga distribuídas. Perdas também ocorrem quando existem mudanças na direção da tubulação, gerando turbulências, e quando

acessórios são necessários para que o sistema funcione, como válvulas e reduções, as chamadas perdas de carga localizadas.

Para fins de determinar a perda de carga na tubulação de um trocador de calor é utilizada equação (5) adaptada de Darcy-Weissbach (FOX, et al. 2006) em função de diferença de pressão.

$$\Delta P = f \cdot \rho_{ar} \cdot \frac{L \cdot V^2}{2 \cdot D} \quad (5)$$

Onde ΔP é a perda de carga total [Pa]; f é o coeficiente de atrito, determinado pela relação entre rugosidade e diâmetro da tubulação e regime de escoamento (n° de Reynolds); ρ_{ar} é massa específica do ar [kg/m^3]; L é o comprimento da tubulação [m]; V é a velocidade do fluido na tubulação [m/s]; e D é o diâmetro da tubulação [m].

Para o cálculo do coeficiente e atrito se faz necessário o conhecimento do regime de escoamento a partir da numero de Reynolds dado pela equação (6), para regimes laminares $Re < 2100$, para regimes de transição $2100 < Re < 4000$, e para turbulentos $Re > 4000$ (FOX, et al. 2006).

$$Re = \frac{\rho \cdot D \cdot V}{\mu} \quad (6)$$

Onde ρ é a massa específica do fluido [kg/m^3]; D é o diâmetro da tubulação [m]; V é a velocidade do escoamento [m/s]; μ é a viscosidade dinâmica do fluido [$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$].

Ainda para o cálculo de perda de carga em secadores, é necessário o conhecimento da perda através da passagem de fluido no leito em que partículas sólidas estão dispostas, que é uma prática comum e eficiente de secagem, devido ao contato íntimo que o gás ou líquido exerce ao se deslocar pela superfície das partículas sólidas.

Segundo Gomide (1983) essa prática é muito utilizada na indústria para o aquecimento, resfriamento e secagem de sólidos granulados. Esse tipo de operação pode ser executado com a movimentação do fluido do topo do leito para a base, no caso dos líquidos; ou da base para o topo, no caso dos gases. O primeiro trabalho experimental realizado sobre escoamento em meios porosos foi desenvolvido por volta de 1830 e constatou que a taxa de

fluxo é proporcional à queda de pressão existente e inversamente proporcional ao percurso que o fluido percorre e sua viscosidade.

Ainda segundo Gomide (1983), uma das formas para se calcular a perda de carga em um leito fixo é utilizando a equação de Ergun, que é válida tanto para o regime de escoamento laminar, como para o turbulento. A equação (7) representa a equação de Ergun para partículas não esféricas.

$$\Delta P = 150 \cdot \frac{\mu \cdot v \cdot H_{leito}}{\Phi^2 \cdot D_p^2} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} + 1,75 \cdot \frac{v^2 \cdot \rho_{ar} \cdot H_{leito}}{\Phi \cdot D_p} \cdot \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \quad (7)$$

Onde: ΔP é a diferença de pressão ao longo do leito fixo [Pa]; H_{leito} é a altura da camada de grãos [m]; D_p é o diâmetro equivalente da partícula [m]; Φ é a esfericidade da partícula; μ é a viscosidade absoluta do fluido [Pa·s]; v é a velocidade do fluido no leito [m/s]; ρ_{ar} é a massa específica do ar [kg/m³]; e ε é a porosidade ou porção de vazios presente no leito.

2.9 TRABALHOS DESENVOLVIDOS NA ÁREA

Trabalhos sobre a secagem de grãos são de fundamental importância para garantir a qualidade adequada para a comercialização e o consumo.

Tecnologias de fontes de energia renováveis são testadas e aplicadas na área. O trabalho desenvolvido por Braga et. al. (2005) comparou a utilização de um secador de camada fixa com fonte de energia solar e o método de secagem convencional de grãos de feijão, que consiste em espalhar o feijão em um terreiro. Foi observado pelos autores que, com uma área de secagem dez vezes menor, o secador pode realizar a secagem da mesma quantidade de feijão em um período de tempo semelhante, devido ao maior empilhamento de grãos. Contudo, a área utilizada pelas placas solares ocupa espaço de 24 m², o que pode tornar o projeto inviável se houver necessidade de área de tamanho restrito.

Outro exemplo é o estudo de Krzyzanowski (2006), que, ao visar à não utilização de fornalhas de combustão no processo de secagem do amendoim, utilizou apenas o desumidificador de ar elétrico, visto que a umidade relativa é o principal fator na remoção da umidade. A umidade relativa do ar foi reduzida de 70% para 19% e o ar foi insuflado para dentro da câmara de secagem, o que aumentou a sua temperatura de 30 °C para 35,8 °C. Isso

levou à taxa de perda de umidade de 0,71% por hora. Tal resultado mostra-se superior em relação ao obtido por Butts e Omary (1999), que alcançaram taxa de 0,47% de perda de umidade por hora na secagem de amendoim, utilizando a secagem combinada (com aquecedor de ar) em apenas um silo, temperatura de 34,1 °C e umidade relativa de início do ciclo 40%.

Silva e Marsaioli (2003), com o mesmo intuito de não utilizar a combustão no processo de secagem, optaram pelo uso do aparelho de micro-ondas para a secagem de amêndoas de castanha do Brasil, além disso, observaram o impacto econômico e na redução do tempo de secagem dessa alternativa. Primeiramente, com a adaptação de um equipamento de uso doméstico para fins de testes e parâmetros iniciais, e após, com forno de emissão de micro-ondas intermitente/contínuo, junto a um ventilador. Os autores chegaram à conclusão de que a utilização desse método reduz substancialmente os tempos de secagem e é viável para a secagem de castanha do Brasil. A qualidade do produto seco não foi avaliada, caso fosse e dependendo dos resultados, poderia alterar a interpretação do estudo.

A qualidade da noz é essencial para sua comercialização e, para isso, é necessário que atenda a alguns aspectos, como: cor dourada, sabor adequado proveniente dos óleos, textura e aromas consistentes, ausência de pragas e doenças, além da umidade necessária em torno de 6%.

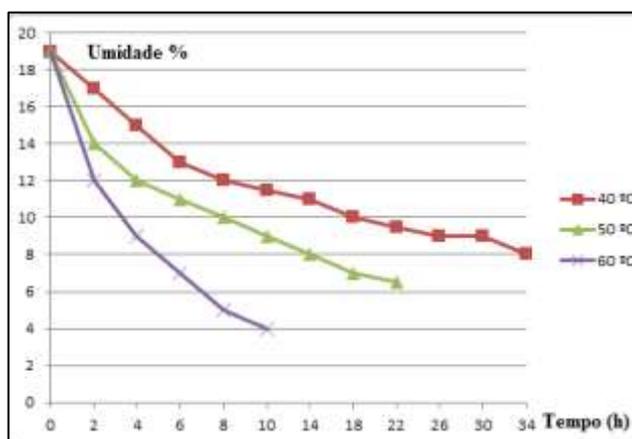
Segundo Herrera (1994), essas qualidades são atingidas quando a fruta é colhida no momento correto. Se colhida antes do tempo ideal, maior a sua umidade, o que influencia a qualidade da amêndoa diretamente. Isso pode ser evitado por meio da secagem artificial, possibilitando aos produtores a venda antecipada da noz e preços mais elevados. Em um de seus estudos, em Las Cruces - Estados Unidos, Herrera (1994) avaliou a qualidade de sabor das amêndoas da noz pecã da variedade "*Western Schley*", quando colhidas em diferentes períodos de pré-colheita e secadas em diferentes tempos e temperaturas. Foi observado que as amostras submetidas à secagem por 24 horas, a 29 °C e 35 °C obtiveram sabor similar àquelas secas com 30 horas, aos mesmos 29 °C e 35 °C; assim como àquelas secas durante 72 horas, à temperatura ambiente de 21 °C. O autor constatou ainda que frutas não submetidas à secagem tiveram pior qualidade, sugerindo que o sabor depende diretamente do teor de umidade (HERRERA, 1994).

Tarigan et al. (2007) relacionaram a qualidade das nozes de Iguapé - mais conhecida por "*candle nut*" - em pós-colheita e seus tempos de secagem. Suas características de forma e tamanho se assemelham aos frutos da noqueira pecã, porém, são mais conhecidas e

comercializadas no mercado asiático. A comparação foi entre nozes recém-colhidas e nozes que já haviam sofrido pré-secagem ao tempo de 4-5 dias e depois acondicionadas em ambiente fechado. As temperaturas e velocidade do ar durante os testes foram estabelecidas em: 40 °C, 50 °C, 60 °C e 1,0 m/s e 0,67 m/s, respectivamente.

Ao fim do estudo, observou-se a diminuição do tempo de secagem com o aumento da temperatura, sendo a temperatura máxima recomendada de 60 °C, a fim de manter suas propriedades e sua qualidade. A variação na velocidade do ar não gerou diferenças significativas no tempo total de secagem. A diferença de umidade entre as frutas recém-colhidas e frutas pré-secas foi importante para comparar o tempo do processo e corroborou que a pré-secagem pode ser uma boa alternativa para redução de tempo de uso do secador e custos. Isso acontece porque a água inicial é removida mais facilmente, devido a maior umidade contida na noz. Foi sugerido pelo autor, após a pré-secagem, a secagem artificial para atingir a percentagem de 6% de umidade, valor adequado para a retirada da casca e consumo (TARIGAN et al., 2007). Na figura 16, observa-se o tempo de secagem para cada temperatura utilizada no experimento.

Figura 16 – Diferentes temperaturas na avaliação de tempo e umidade



Fonte: Adaptado de Tarigan et al. (2007)

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO DO SECADOR

Neste capítulo, a proposta de desenvolvimento do trabalho será apresentada, juntamente com as necessidades do projeto, análises experimentais e meios para os resultados esperados serem alcançados ao término da pesquisa.

3.1 SECADOR DE CAMADA FIXA EM UM POMAR DE NOGUEIRA PECÃ EM CACHOEIRA DO SUL

A propriedade da empresa Paralelo 30, localizada em Cachoeira do Sul - RS, conta com mais de 180 hectares de noqueira pecã. Parte dessa área já se encontra em plena produção, parte ainda em fase de desenvolvimento. Durante o período de execução do trabalho, foi realizada visita ao local e dúvidas foram esclarecidas em relação ao secador mecânico que é utilizado pela empresa.

A empresa Paralelo 30 tem disponível um secador de camada fixa com capacidade para três toneladas de noz-pecã, o qual foi adquirido da empresa Rovler (RS) no valor de R\$ 16.000,00. O leito de nozes conta com uma camada de 70 centímetros de altura de nozes acima do plenum, (fundo falso). A fornalha utiliza como combustível a lenha gerada pela poda do pomar e quando necessário é complementado com lenha de eucalipto. Ainda segundo os produtores, atualmente, leva-se em torno de doze horas e queima-se aproximadamente 700 kg de lenha para cada ciclo de secagem de três toneladas.

Para complementar as informações de equipamentos existentes, foi também consultado um pequeno produtor rural, que utilizava um aquecedor de ar para aquecer aves em seu aviário. Um equipamento semelhante ao observado em Cachoeira do Sul, com um trocador de calor de tubos, utilizando como combustível lenha de eucalipto, porém nesse caso o ar aquecido era direcionado para os dutos distribuidores. Ainda segundo o proprietário o equipamento teve um custo de R\$ 20.000,00.

3.2 NECESSIDADES DO PROJETO

O presente trabalho visa à secagem de uma safra de noz-pecã estimada em 25 toneladas do produto. Para isso, será utilizado um secador de camada fixa, em que a fruta fica alojada em um leito por onde o ar aquecido escoar através do plenum. Esse tipo de secador foi selecionado entre as demais variedades, porque apresenta uma estrutura simples,

com menor quantidade de peças, portanto, de mais fácil manutenção em relação aos secadores contínuos, de cascata, de secagem combinada. Além disso, apresenta melhor custo-benefício, visto que sua utilização ocorre uma vez ao ano. Essa escolha torna o projeto de pesquisa factível em uma propriedade rural, com recursos limitados.

Não serão utilizadas pás automáticas para movimentar o produto durante o processo, pois considera-se que o ar percole adequadamente o leito de nozes.

O equipamento será dimensionado para realizar a secagem da produção em um período preconizado de 30 dias, tempo final em que a colheita deve ser realizada. Para atingir esse tempo, é prevista a secagem média de cerca de uma tonelada de nozes por dia.

A tabela 3 mostra de forma objetiva as necessidades do projeto.

Tabela 3 – Demonstração das necessidades do projeto

Necessidades do Projeto	Especificações
Quantidade total de nozes-pecã a ser seca	25 toneladas
Tempo hábil para secagem	30 dias
Tempo para cada ciclo de secagem	15 horas
Quantidade por ciclo	1 tonelada
Umidade final	< 6%
Material de combustão	Eucalipto e Pecã (lenha)
Qualidade do produto	Umidade homogênea

Fonte: O Autor (2018)

3.3 FORNALHA, COMBUSTÍVEL E O AQUECIMENTO DO AR

A principal etapa para o processo de secagem será o aquecimento do ar e, conseqüentemente, a perda de umidade. Essa etapa é mais eficaz conforme a capacidade de remoção de água do produto.

A fornalha será responsável por esse processo e lenha será utilizada como combustível para gerar o calor necessário para o aquecimento do ar. O combustível poderá ser proveniente da própria poda da nogueira pecã ou de eucalipto. A fornalha será projetada de modo que grande parte de sua superfície de aquecimento entre em contato com o ar, que, ao ser deslocado por um ventilador, receberá o calor necessário para o seu aquecimento.

Para a escolha do combustível, foi avaliada a relação custo-benefício de cada tipo de material disponível no mercado, por meio de investigação diretamente com produtores em

serrarias, consulta de sites de fornecedores e empresas que trabalham com secadores semelhantes. Foram avaliados três tipos de madeira: eucalipto, pinus e pecã, bem como os gases GLP e natural, além do óleo diesel e energia solar. A Tabela 4 apresenta dados de poder calorífico inferior e os custos para cada tipo de combustível.

Tabela 4 – Poder calorífico e custo de diferentes tipos de combustíveis

Tipo de combustível	Poder calorífico inferior (kJ)	Custo (R\$)
Pinus (lenha)	10500 - 16700/kg	1,6/kg
Pinus (serragem seca)	10500 - 14000/kg	0,18/kg
Pinus (serragem úmida)	8400 - 10500/kg	0,1/kg
Eucalipto (lenha)	8400 - 12500/kg	0,2/kg
Pecã (poda)	8400 - 12500/kg	0,1/kg
Gás natural	36000/m ³	8,0/m ³
GLP 50%	45000/m ³	11,0/m ³
Óleo diesel	36000/litro	3,1/litro

Fonte: Adaptado de TEC (2018).

Os valores para madeiras na Tabela 4 possuem uma variação devido à quantidade de umidade presente no seu interior. Segundo Lima et al. (2011) o eucalipto pode perder 52% de sua eficiência energética se sua umidade ultrapassar os 50%, e acima dos 60% de umidade, sua queima não se torna possível. Por esse motivo, para gerar calor, preferem-se madeiras mais secas, com teor de umidade em torno de 20%. Ainda para fins de cálculos do trabalho, utilizou-se o menor valor de poder calorífico da lenha de eucalipto (8400 kJ/kg), devido a diferentes umidades encontradas no mercado.

Pesquisaram-se ainda duas outras fontes de calor. Através de ensaio de poder calorífico da casca da noz-pecã, realizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, obteve-se um valor médio para o poder calorífico superior de aproximadamente 19140 kJ/kg (vide Apêndice A), porém sua utilização é limitada devido ao alto custo para a remoção da casca. Também se constatou através de orçamento que para o uso de energia solar como fonte de calor, o investimento seria elevado (vide Apêndice B), já que o uso da energia é sazonal, sendo utilizada apenas na época de colheita.

3.4 VENTILADORES E CONTROLADOR DE TEMPERATURA

O equipamento contará com um ventilador principal responsável por insuflar o ar aquecido para dentro da câmara de secagem (plenum + leito de nozes). O ar entrará no sistema pela parte frontal da fornalha, passará pela sua superfície de aquecimento e, por fim, entrará em contato com as nozes. Esse equipamento funcionará durante todo o período de secagem.

Para que a temperatura do ar insuflado para dentro do plenum não exceda a temperatura desejada, um sistema abre-e-fecha será fixado no conduto de ar que liga a fornalha ao ventilador, permitindo que o ar a temperatura ambiente se misture ao ar quente caso o mesmo ultrapasse os 40 °C, garantindo assim a qualidade de secagem.

3.5 ENERGIA NECESSÁRIA PARA EVAPORARAÇÃO DE ÁGUA

Em ensaio realizado pelo autor no Laboratório de Alimentos da UCS, cujos resultados são mostrados no início do capítulo 4, constatou-se a evaporação de em média 0,2 kg de água/kg de noz. Com essa informação, pode-se estimar a quantidade de calor necessária para aquecer a noz até a temperatura desejável de secagem (40 °C) e evaporar a água. A Equação (8) apresenta os valores obtidos.

$$Q_{tot} = Q_s + Q_l \quad (8)$$

Onde: Q_s é a parcela sensível do calor e o Q_l é a parcela latente. Essas parcelas são calculadas pelas equações a seguir.

$$Q_s = m_{noz} \cdot C_{p,noz} \cdot \Delta T \quad (9)$$

Onde: m_{noz} é a massa de noz pecã (no caso igual a 1 kg); $C_{p,noz}$ é o calor específico da noz pecã ($\approx 1,68 \frac{kJ}{kg} \cdot ^\circ C$), valor esse semelhante ao do café, segundo Borém et al. (2001); e o ΔT refere-se a variação da temperatura da noz ao ser aquecida de 20 °C para 38 °C. A parcela latente é calculada por

$$Q_l = m_{\acute{a}gua} \cdot (h_v - h_l)_{40^\circ C} \quad (10)$$

Onde: $m_{\text{água}}$ é a massa de água removida de 1 kg de noz pecã; h_v é a entalpia do vapor d'água a 40 °C (2574,3 kJ/kg) e o h_l é entalpia da água líquida saturada a 40 °C (167,6 kJ/kg). Logo, a partir das equações (8), (9) e (10), se obtém o seguinte valor para o Q_{tot} .

$$Q_{tot} = 1 \cdot 1,68 \cdot 18 + 0,2 \cdot (2574,3 - 167,6) \cong 512 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Para a retirada de 0,2 kg de água/kg de noz pecã a uma temperatura de 40 °C são necessários 512 kJ. Portanto, para a retirada da água de uma tonelada de noz (em torno de 200 L de água) são necessários em torno de 512000 kJ (ou 512 MJ).

3.6 CONSUMO DE ENERGÉTICOS NO PROCESSO DE SECAGEM

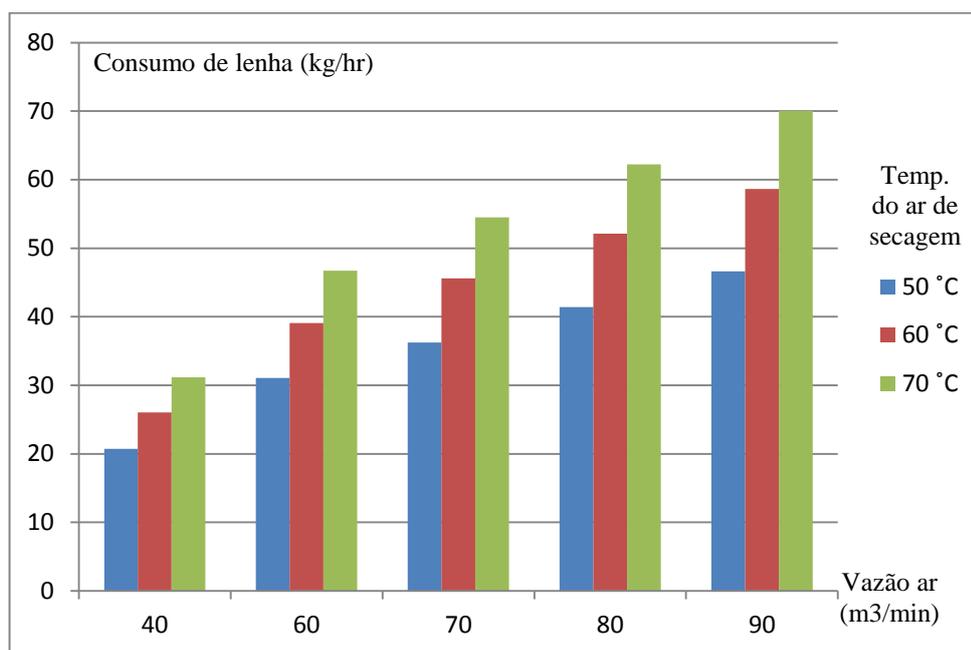
Segundo estudo técnico da Embrapa desenvolvido por Silva et al. (2018), sobre a secagem de grãos de café, observaram-se os diferentes gastos energéticos dos combustíveis para variações de temperatura do ar na câmara de secagem e de quantidade de ar insuflada (Apêndice A). Os valores demonstrados nos apêndices são obtidos através da equação (11) e mostram a taxa de combustível consumido por hora (\dot{m}_c).

$$\dot{m}_c = 60 \cdot \frac{\rho \cdot Q \cdot C_p \cdot (T_s - T_a)}{PCI \cdot \eta} \quad (11)$$

Onde: ρ é a massa específica de secagem [[kg.m³]; Q é a vazão de ar [m³/min]; C_p é o calor específico do ar [kJ/kg.min]; T_s e T_a são as temperaturas de entrada e saída do ar; PCI é o poder calorífico do combustível [kJ/kg] e η é o rendimento do equipamento, que varia de acordo com seu método de aquecimento.

Os dados de tal estudo foram extrapolados para uma vazão de 40 m³/min, em vista da altura da camada projetada de nozes e do tamanho das mesmas, para as quais essa vazão seria suficiente e possibilitaria menor gasto de combustível. A figura 17 demonstra parte dos dados obtidos, além da extrapolação. Conforme estudos de Fronza e Hamann (2016) realizados na secagem de noz-pecã com resultados mostrados na Tabela 1, a vazão de ar utilizada por esses autores é pelo menos a metade da empregada aqui.

Figura 17 - Consumo de lenha para diferentes temperaturas e vazão de saída do ar.



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2018)

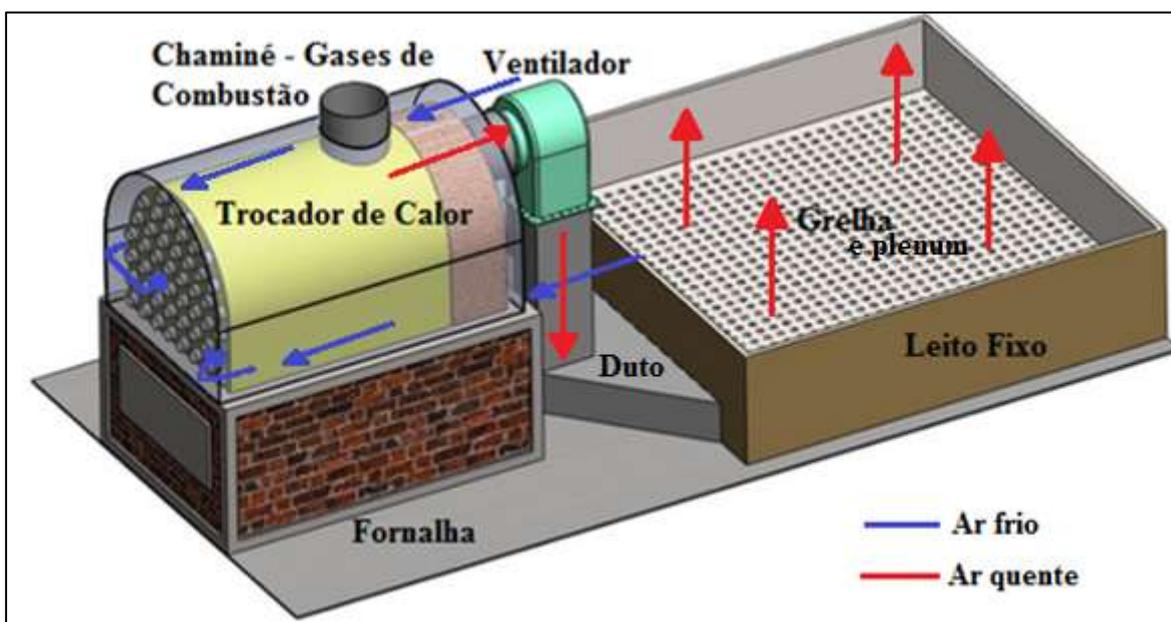
Conforme discutido anteriormente, a temperatura do ar insuflado não deverá exceder os 40 °C, por isso, outra extrapolação foi realizada utilizando os valores mostrados no Anexo A. Dessa maneira, foi determinado o consumo de lenha médio de 15,82 kg por hora para uma vazão de 40 m^3/min e 40 °C.

3.7 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO SISTEMA DE SECAGEM

Deve-se manter o fluxo de secagem constante durante todo o período de colheita (20 a 30 dias), visto que a secagem da produção deverá ocorrer ao mesmo tempo em que a colheita, para que as nozes não percam qualidade. As nozes deverão ser secas com teores de umidade parecidos. Caso isso não seja possível, elas deverão ser estratificadas de acordo com o teor de umidade e secas separadamente. Uma vez que a densidade da noz úmida é em média 400 kg/m^3 , o leito fixo terá dimensões de 3 metros de largura, 1,8 metros de comprimento e 0,7 metros de altura, além de 0,3 metros de fundo falso (plenum), totalizando uma área de base de 5,4 m^2 e aproximadamente 3,8 m^3 de volume. Com a previsão de uma safra de 25 toneladas, a câmara de secagem terá capacidade para pouco mais de uma tonelada de noz pecã.

Com embasamento no estudo técnico da Embrapa desenvolvido por Silva et al. (2018), há dois tipos de sistemas de aquecimento: direto e indireto. O presente estudo utilizará a forma indireta, com o intuito de não contaminar com resíduos de combustão as nozes que servirão futuramente como alimentos. Mesmo que dessa forma a eficiência seja menor (0,3) em relação ao aquecimento direto (0,85), conforme valores apresentados nas tabelas do Apêndice A. A figura 18 ilustra as partes principais do equipamento: ventilador radial, caixa de secagem e gerador de ar quente cujo modelo baseia-se na sugestão de Silva et al. (2018).

Figura 18 – Modelo 3D do equipamento de secagem



Fonte: O Autor (2018)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ENSAIOS PRELIMINARES REALIZADOS

O período de safra da noqueira pecã ocorre entre o final do mês de abril até a metade do mês de maio para os países localizados no hemisfério Sul; e, em países do hemisfério norte, seis meses antes.

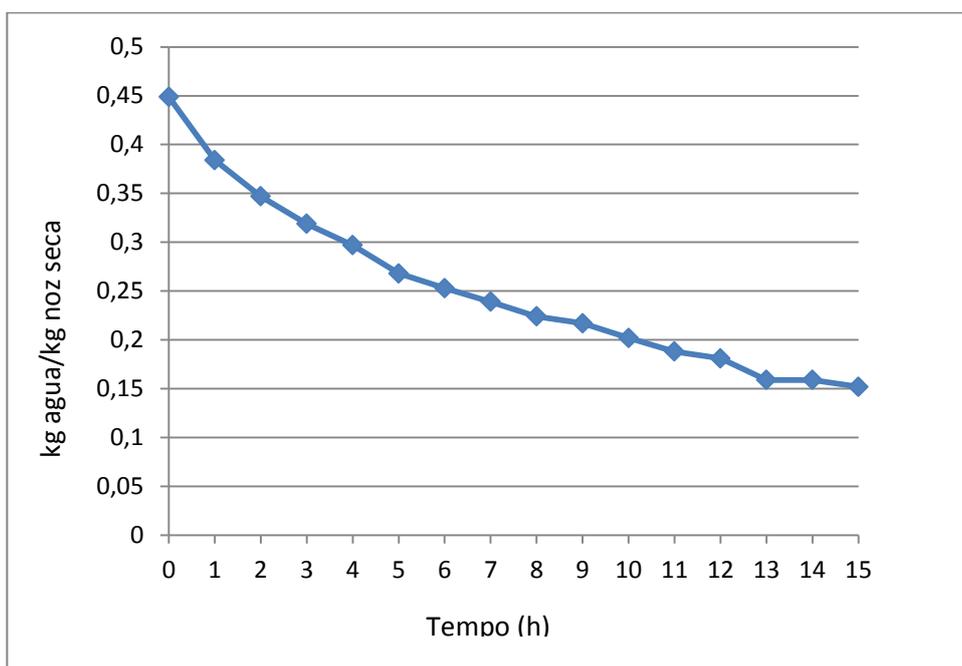
Com o objetivo de secar as nozes recém-colhidas e avaliar sua curva de secagem, bem como a variação de umidade e peso durante o processo, foram realizados testes preliminares no Laboratório de Alimentos da Universidade de Caxias do Sul, com nozes pecã da variedade Barton provenientes de pomar comercial adulto da Empresa Paralelo 30, localizado na cidade de Cachoeira do Sul – RS.

As nozes utilizadas no experimento eram recém-colhidas, tinham teor de umidade inicial em torno de 30%, medidos em um equipamento infravermelho, da marca *Gehaka*. Primeiramente, foram distribuídas em duas bandejas enumeradas (bandeja 1 e bandeja 2) contendo um quilograma de fruta cada.

Para a secagem, foi utilizado o equipamento da marca Werner, que é montado por uma resistência elétrica e um ventilador axial, controlados para manter a temperatura interna da estufa conforme desejado. Nesse caso, a temperatura interna foi de 38 °C. Ao final do experimento, estimou-se um gasto energético de 0,4250 kWh para os dois quilogramas de noz, - valor estimado pela soma dos gastos energéticos da resistência e do ventilador, obtendo um gasto de 0,2125 kWh para cada quilograma do produto, valor que corresponde a aproximadamente 14 kW para secar uma tonelada em 15 horas.

Para avaliar a perda de água das amostras, com auxílio de uma balança da marca Toledo e modelo 2096, a evaporação foi monitorada a cada 30 minutos nas primeiras cinco horas, e após, a cada hora, até o tempo total de 15 horas. A perda de água pode ser observada na figura 19.

Figura 19 – Relação entre kg água/kg de noz seca e tempo de secagem



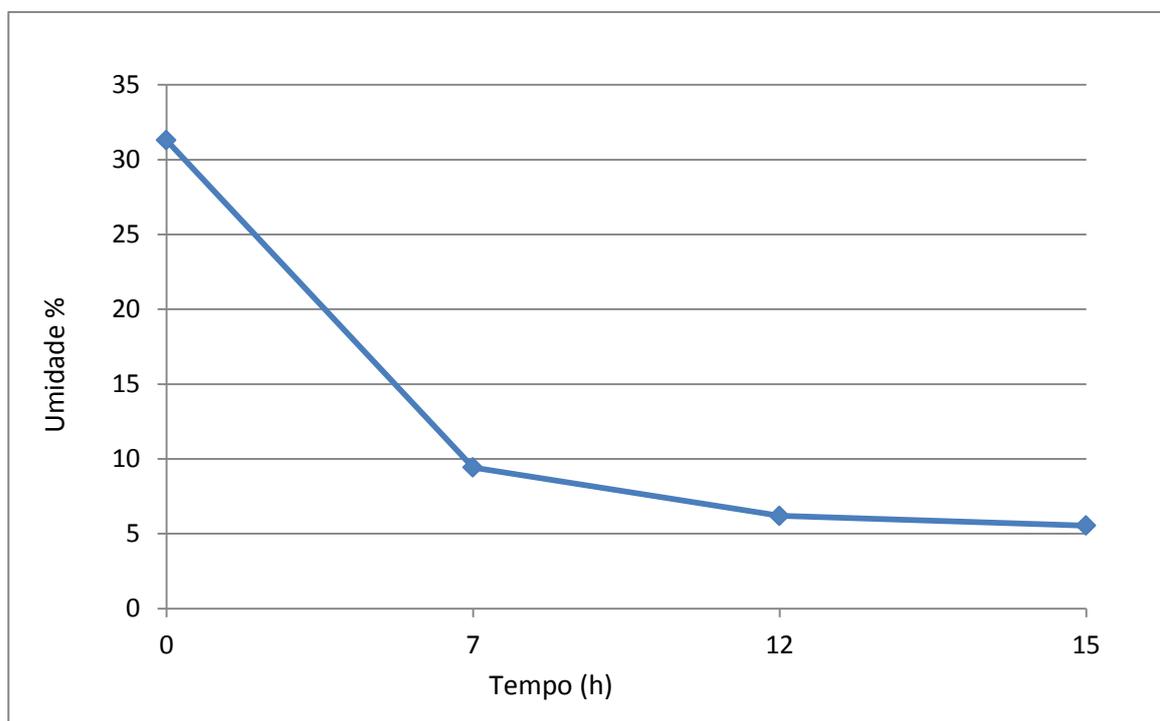
Fonte: O autor (2018).

Observou-se perda de 205 gramas de água das nozes na bandeja 1 e 195 gramas naquelas da bandeja 2, o que corresponde a aproximadamente 20% do valor inicial da massa de noz de 1 kg. Pode-se observar também uma queda mais acentuada no teor de umidade nas primeiras horas de secagem.

Uma balança de precisão foi utilizada para medir a perda de água, em que foram dispostas, antes do ensaio, vinte nozes úmidas, que pesaram em média 11,9 gramas; e após as 15 horas de secagem, vinte nozes úmidas, que pesaram 9,2 gramas, cada uma. Levando à perda de 22,3% de umidade.

A umidade das frutas foi avaliada, com auxílio de medidor de umidade com infravermelho, do fabricante Gehaka, modelo IV 2002 e precisão de duas casas decimais para percentual de umidade. A umidade foi coletada quatro vezes durante a secagem, em quatro nozes aleatórias em cada avaliação, e variou de 31,3% na base úmida ao início até 5,6% ao fim do ensaio, como mostra a figura 20.

Figura 20 – Relação de umidade na base úmida das nozes com tempo de secagem



Fonte: O autor. (2018).

Os parâmetros obtidos nesse estudo preliminar vão ao encontro dos dados mencionados por Tarigan et al. (2007), que se referem à maior dificuldade em remover a água da noz quanto menor for sua umidade. Isso pode ser observado na figura 16, em que inicialmente a curva de peso vs. umidade decai rapidamente e de maneira gradativa decai de forma mais lenta. Uma possível explicação sobre esse dado foi aventada por Cecchi (2003), que afirma que isso se deve à maior quantidade de água livre (intragranular) no início do processo e à sua diminuição ao final, quando resta apenas água ligada.

O estudo utilizou a forma indireta de aquecimento para não contaminar as nozes com resíduos de combustão, com eficiência de 30%. Tendo em vista esse valor de eficiência e de aproximadamente 512 MJ de energia necessária para uma tonelada, calcula-se um total de $Q_{Evaporação}$ de 1705 MJ ($512 \text{ MJ} \div 0,3$).

A partir das equações (12) e (13) obtém-se a quantidade de calor necessária proveniente do combustível e também a sua respectiva massa.

$$\dot{Q}_{lenha} = \frac{Q_{Evaporação}}{\text{Tempo (s)}} = \dot{m}_{lenha} \cdot PCI_{lenha} \quad (12)$$

$$\dot{m}_{lenha} = \frac{Q_{Evaporação}}{Tempo (h) \cdot PCI} \quad (13)$$

Onde: $Q_{Evaporação}$ é 1705 MJ; tempo de secagem 15 horas e o $PCI_{Combustivel}$ 8400 kJ/kg (vide Tabela 4), considerando o menor valor para lenha de eucalipto (úmida). Logo, a partir das equações (10) e (11), obtém-se que:

$$\dot{Q}_{lenha} = \frac{1705000 \text{ kJ/ton} \cdot \frac{1}{1000} \text{ ton/kg}}{15h \cdot 3600 \text{ s/h}} = 0,031 \frac{\text{kJ/s}}{\text{kg noz}}$$

$$\dot{m}_{lenha} = \frac{0,032 \text{ kJ/s} \cdot \text{kg}}{8400 \text{ kJ/kg}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} = 0,0135 \frac{\text{kg lenha}}{\text{h} \cdot \text{kg noz}}$$

Em vista do que foi estudado, pode-se dizer que serão necessários, para a secagem de uma tonelada de noz-pecã, 13,5 kg/h de lenha. Esse valor se assemelha aos 15,8 encontrados nas extrapolações feitas sobre os dados apresentados por Silva et al. no Anexo A. Além disso, o \dot{Q}_{lenha} encontrado para uma tonelada é de 31 kW.

4.2 EFICIÊNCIA DO LEITO FIXO

O ar aquecido, ao ser insuflado para dentro a câmara de secagem, percorrerá toda a extensão da camada de noz até chegar à superfície de onde é expelido. Durante esse percurso, o ar quente (40 °C) percola entre as nozes e remove sua umidade. Contudo, o aproveitamento é reduzido, devido à pouca diferença de temperatura do ar quente e das nozes e à alta porosidade do leito.

Foi estimada uma eficiência de 50% para a taxa de troca térmica e de massa entre o ar e as nozes. Isso eleva a demanda de energia de 31 kW para aproximadamente 62 kW por tonelada de noz, valor que corresponde ao consumo de lenha de 27 kg/h. Segundo Gomide (1983), apesar de diferentes estudos desenvolvidos a respeito da transferência de calor em leitos fluidos, os resultados são discordantes e a eficiência pode variar.

4.3 DIMENSIONAMENTO DA ESTUFA DE AQUECIMENTO DO AR

Conforme a equação (3) mostrada no capítulo 2 e o valor de calor para evaporação da água, pode-se então determinar a área necessária para a troca de calor.

$$\dot{Q} = F \cdot U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad (3)$$

$$A = \frac{62000}{20 \cdot 372,36 \cdot 1} \approx 8,3 \text{ m}^2$$

Onde \dot{Q} é a quantidade de calor trocada, 62 [kW]; U é o coeficiente global de transferência de calor 20 [$W/m^2 \cdot K$], valor típico para troca gás-gás, segundo Kreith et al. (2011); F é o fator de correção utilizado no método ΔT_{ml} para trocadores de calor diferentes daqueles de duplo-tubo correntes opostas ou paralelas; A é a área superficial em contato com o fluido [m^2]; e ΔT_{ml} é a média logarítmica da diferença das temperaturas. O trocador de calor utilizado no presente estudo é do tipo casco e tubos (parte em amarelo da figura 18), para o qual o valor de F obtido na forma gráfica foi aproximadamente igual a 1 devido à grande diferença entre as temperaturas. O ΔT_{ml} é dado pela equação (4).

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (4)$$

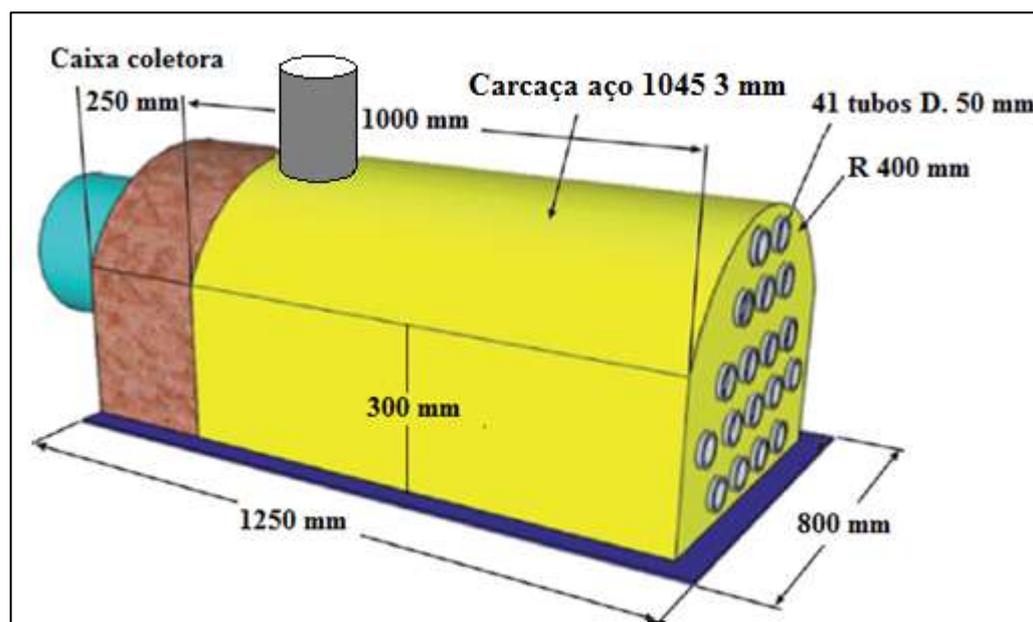
Para a configuração do trocador de calor de correntes opostas o ΔT_1 é ($T_{quente,entrada} - T_{fria,saida}$) e ΔT_2 é ($T_{quente,saida} - T_{fria,entrada}$) ambas em ($^{\circ}C$ ou K), e as temperaturas adotadas para o sistema foram: $T_{quente,saida} = 250 \text{ }^{\circ}C$ (saída para a chaminé), $T_{quente,entrada} = 600 \text{ }^{\circ}C$ (temperatura dos gases na entrada do banco de tubos), $T_{fria,saida} = 45 \text{ }^{\circ}C$ e $T_{fria,entrada} = 15 \text{ }^{\circ}C$.

Logo, pode-se estimar a diferença logarítmica entre as temperaturas.

$$\Delta T_{ml} = \frac{(600 - 45) - (250 - 15)}{\ln\left(\frac{600 - 45}{250 - 15}\right)} = 372,4 \text{ }^{\circ}C$$

Com isso, determinou-se que a área total de troca de calor deve ser de 8,3 m^2 (tubos + carcaça). Conforme figura 21, para uma área de carcaça de 1,85 m^2 , são necessários 41 tubos de diâmetro 50 mm e 1000 mm de comprimento. O Apêndice C mostra a distribuição dos tubos no trocador de calor.

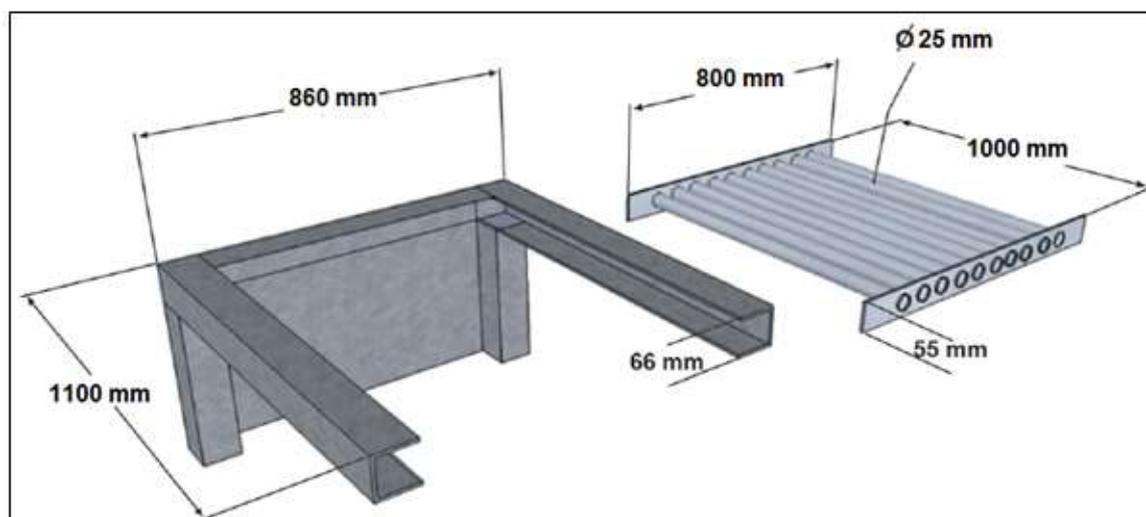
Figura 21 – Representativo do dimensionamento da carcaça



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2018)

Para o dimensionamento da grelha do queimador, com base no estudo de Silva et al. (2017), foi utilizado uma grelha com área livre de $0,18 \text{ m}^2$ para a queima de aproximadamente 15 kg de lenha/h. Dessa maneira, neste estudo, projetou-se a grelha com $0,4 \text{ m}^2$ de área livre, visto que ela deverá queimar aproximadamente 27 kg de lenha/hora. Os espaços livres da grelha são de 25 mm . A largura da grelha deve ser de 800 mm (largura da carcaça) e 1000 mm de comprimento, valor determinado pelo comprimento usual das toras de lenha. A figura 22 mostra as dimensões da grelha.

Figura 22 – Dimensionamento da grelha do queimador e seu suporte

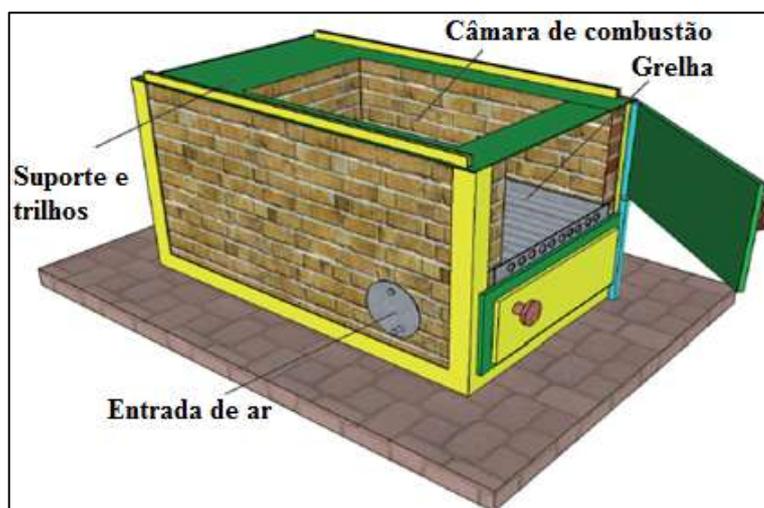


Fonte: Adaptado de Silva et al. (2018)

4.4 BASE DA FORNALHA E COBERTURA DO TROCADOR DE CALOR

Para a construção da parte inferior da fornalha, a qual sustenta a grelha e o trocador de calor, são utilizados tijolos maciços com revestimento interno de plaquetas refratárias na base e nas laterais. As dimensões externas de 1300 x 900 x 1500 mm são necessárias para apoiar toda a estrutura do trocador de calor e sua carcaça na base, sendo para isso utilizada uma plataforma com trilhos conforme figura 23.

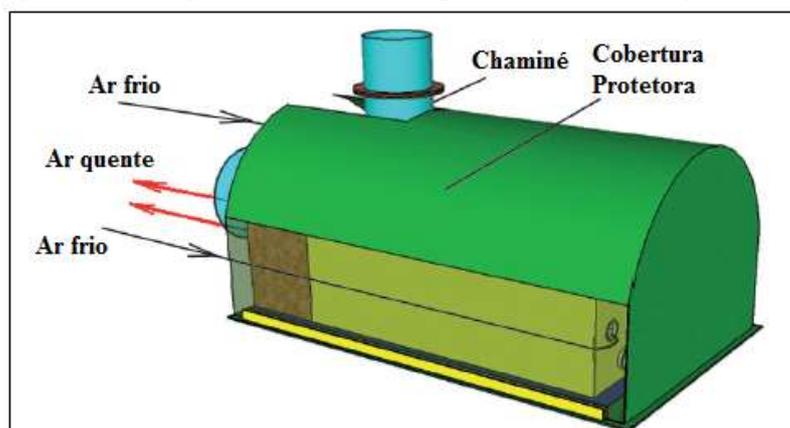
Figura 23 – Base da fornalha e trilho de sustentação do trocador de calor



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2018)

Uma cobertura protetora será adicionada à parte superior do trocador de calor com o objetivo de guiar o ar frio até a entrada dos tubos, o fazendo passar primeiramente por toda a superfície aquecida da carcaça, conforme a figura 24. Além de proteger o trocador do contato com o meio externo.

Figura 24 – Esquema da cobertura protetora e sua função



Fonte: Adaptado de Silva et al. (2018)

4.5 CONTROLADOR DE TEMPERATURA DO LEITO E GRELHA DO LEITO FIXO

O controle de temperatura do ar insuflado no leito deve ser controlado para que não exceda a temperatura de 40 °C, caso contrário, pode gerar perdas na qualidade das nozes. Para isso, um medidor de temperatura será introduzido dentro do plenum do leito e permitirá a aferição da mesma através de um *display* digital. Caso a temperatura se encontre acima da desejada, uma tampa móvel, localizada na tubulação de ar antes da sucção do ventilador, poderá ser aberta para a entrada de ar frio no ambiente até que a temperatura volte à desejada.

Para sustentar as nozes no leito de secagem, foi dimensionada grelha de 1 mm de espessura, com as mesmas dimensões do leito fixo, 1,8 x 3 m. A grelha de aço inox 403 é perfurada com furos de 17 mm de diâmetro e espaçamento entre furos de 1,5 mm. Uma estrutura em perfis de aço será disposta sob a grelha para sustentá-la.

4.6 SELEÇÃO DO VENTILADOR

Para deslocar o ar quente proveniente do trocador de calor até a câmara de secagem, selecionou-se a máquina geradora de fluxo do tipo ventilador centrífugo, que requer a vazão volumétrica do ar e da pressão total proporcionada pelo mesmo para vencer as perdas de carga do sistema.

4.6.1 Perda de carga nos tubos do gerador de calor

A perda de carga no percurso do ar através dos tubos do trocador de calor (figura 18 ou 21) foi calculada pela equação (5). Já o número de Reynolds foi calculado pela equação (6), considerando os seguintes dados: $\rho_{ar,40\text{ }^{\circ}\text{C}} = 1,12 \text{ kg/m}^3$; $D_{tubo} = 0,05 \text{ m}$; $V_{tubos} = \dot{V}_{ar}/N_{tubos} \cdot A_{tubo} = 40/60 \cdot 41 \cdot 0,00196 \cong 8,3 \text{ m/s}$; e $\mu_{ar,40\text{ }^{\circ}\text{C}} = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$.

$$R_e = \frac{1,12 \cdot 0,05 \cdot 8,3}{1,9 \cdot 10^{-5}} = 24404 \text{ (regime turbulento)}$$

Sabendo que se trata de um escoamento turbulento, o fator de atrito é encontrado através do diagrama de Moddy (FOX, et al, 2006), que relaciona a rugosidade relativa

(0,05 mm/50 mm = 0,001) com o número de Reynolds (no caso igual a 24404), obtendo um fator de atrito $f \cong 0,026$.

Utilizando a equação (5) para determinar a perda de carga do sistema pode-se determinar que:

$$\Delta P = 0,026 \cdot 1,12 \cdot \frac{1 \cdot 8,3^2}{2 \cdot 0,05} \cong 20 \text{ Pa} \cong 2 \text{ mmca}$$

4.6.2 Perda de carga no leito fixo

Para a obtenção de valores de perda de carga através do leito de nozes pode-se utilizar a equação de Ergun (7), que tem seus termos sugeridos conforme equações (14), (15), (16), (17), (18), (19) e (20).

$$\varepsilon = \frac{V_{leito} - V_{sólidos}}{V_{leito}} \quad (14)$$

Onde V_{leito} é o volume total do leito dado pelas dimensões do equipamento [m³] e $V_{sólidos}$ é o volume total de sólidos presentes no leito [m³]. Para o cálculo de $V_{sólidos}$ utilizaram-se as informações coletadas do experimento de secagem realizado no laboratório de alimentos da UCS, em que após a secagem, cada noz apresentou a massa média de 9,2 gramas. Conforme Fronza e Hamann (2016) a densidade da noz pecã é torno de 400 kg/m³.

$$V_{leito} = L_{leito} \cdot C_{leito} \cdot H_{leito} \quad (15)$$

$$V_{sólidos} = \frac{V_{leito} \cdot \rho_{noz}}{m_{noz}} \cdot V_{noz} \quad (16)$$

Em que V_{noz} é dada pela equação (17), tendo como base uma noz pecã padrão de semi eixo maior $a = 0,0225 \text{ m}$ e semi eixos menores $b = c = 0,0125 \text{ m}$, pode-se obter o volume total dos sólidos presentes e a porosidade.

$$V_{noz} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot c \quad (17)$$

$$V_{noz} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot 0,0225 \cdot 0,0125 \cdot 0,0125 = 1,47 \cdot 10^{-5}$$

$$V_{leito} = 1,8 \cdot 3 \cdot 0,7 = 3,8 \text{ m}^3$$

$$V_{sólidos} = \frac{3,8 \cdot 400}{0,0092} \cdot (1,47 \cdot 10^{-5}) = 2,42 \text{ m}^3$$

$$\varepsilon = \frac{3,8 - 2,42}{3,8} = 0,36$$

A velocidade do fluido no leito pode ser descrita conforme a equação (18), na qual consideram-se a porosidade do leito e a área para a passagem do ar, pode-se escrever que:

$$v = v_0/\varepsilon \quad (18)$$

$$\text{Onde: } v_0 = \frac{\text{Vazão de ar (m}^3/\text{s)}}{\text{área da base do leito fixo (m}^2)} = \frac{0,667}{3 \cdot 1,8} = 0,123 \frac{\text{m}}{\text{s}} \text{ e } \varepsilon = 0,36.$$

$$v = 0,123/0,36 = 0,343 \text{ m/s}$$

Quanto à sua forma, a noz pode ser tratada como um elipsoide de semieixos antes definidos. Portanto, seu diâmetro equivalente é obtido pela comparação do volume da elipsoide com o volume de uma esfera, conforme equação (19). Dessa maneira, obtém-se o diâmetro equivalente para esfera $D_p = 30,4 \text{ mm}$.

$$V_{esf} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 \quad (19)$$

$$V_{esf} = V_{noz} \rightarrow \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot 0,0225 \cdot 0,0125 \cdot 0,0125$$

$$r = 0,0152 \text{ m} \rightarrow D_p = 0,0304 \text{ m}$$

Para cálculo da esfericidade (Φ), existem tabelas com valores pré-estabelecidos. Contudo, segundo Tannous e Rocha (2018), esse valor pode ser calculado através da área da superfície de uma esfera com volume igual ao da partícula (noz), dividida pela área superficial da partícula, conforme a equação (20).

$$\Phi = \frac{A_{esf}}{A_{noz}} \quad (20)$$

Em que A_{esf} é a área superficial da esfera [m²] e A_{noz} a área superficial da noz [m²]. Considerando que A_{esf} e A_{noz} sejam dadas, respectivamente, pelas equações a seguir.

$$A_{esf} = 4 \cdot \pi \cdot r^2$$

$A_{noz} = 4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{a^p \cdot b^p + a^p \cdot c^p + b^p \cdot c^p}{3} \right)^{\frac{1}{p}}$, sendo $p = 1,6075$, uma constante geométrica.

$$\Phi = \frac{0,0029}{0,00306} = 0,94$$

Substituindo todos os dados obtidos na equação de Ergun (13), pode-se observar a queda de pressão no leito de nozes.

$$\Delta P = 150 \cdot \frac{(1,9 \cdot 10^{-5}) \cdot 0,343 \cdot 0,7 \cdot (1 - 0,36)^2}{0,948^2 \cdot 0,0304^2} \cdot \frac{(1 - 0,36)^2}{0,36^3} + 1,75 \cdot \frac{0,343^2 \cdot 1,12 \cdot 0,7 \cdot (1 - 0,36)}{0,948 \cdot 0,0304} \cdot \frac{(1 - 0,36)}{0,36^3}$$

$$\Delta P \cong 84,06 \text{ Pa} \cong 8,6 \text{ mmca}$$

Segundo a equação de Ergun, a queda de pressão durante o trajeto pelo leito fixo é baixa, devido à lenta velocidade do fluido na base do leito e à elevada porosidade do particulado.

4.6.3 Perda de carga na placa perfurada

Para o cálculo de perda de carga através da placa perfurada foi utilizada a equação sugerida por Idelchik (1960), a qual avalia a perda relacionando a área total do segmento por onde o fluido escoar, área livre de escoamento, velocidade do fluido e sua viscosidade, conforme equações (21), (22) e (23).

$$\Delta P = k \cdot \rho_{ar} \cdot v^2 \cdot 0,5 \quad (21)$$

$$k = (1 - f) + (0,707 \cdot (1 - f)^{0,375})^2 \cdot \left(\frac{A_0}{A_1} \right)^2 \quad (22)$$

$$f = \frac{A_1}{A_0} \quad (23)$$

Onde: A_1 é a área total livre da passagem do ar [m²], considerando furos com 15 mm de diâmetro espaçados em 2 mm; A_2 é a área total da placa [m²]; v é a velocidade do fluido no leito [m/s]; ρ_{ar} é a massa específica do ar [kg/m³], obtém-se que:

$$f = \frac{\pi \cdot 7,5^2}{((2 \cdot 7,5) + 2)^2} = 0,61$$

$$k = (1 - 0,61) + (0,707 \cdot (1 - 0,61)^{0,375})^2 \cdot \left(\frac{289}{176,71}\right)^2 = 1,7$$

$$\Delta P = 1,7 \cdot 1,12 \cdot 0,123^2 \cdot 0,5 = 0,014 \text{ Pa} \approx 0,0015 \text{ mmca}$$

Somada às perdas de carga nos tubos, no leito e na placa perfurada, previu-se algumas perdas adicionais no sistema, estimadas em 10 mmca. A tabela 5 reporta os valores das perdas de carga calculadas e aquelas estimadas.

Tabela 5 – Perdas de carga no sistema dimensionado

Tipo de perda de carga	Perda de carga (mmca)
Tubos do trocador (estufa)	2
Leito de nozes	8,57
Placa perfurada	0,0015
Perdas adicionais no sistema	10
Total	≅ 20,6

Fonte: O autor (2018)

Como o valor da perda de carga total nos tubos, no leito de nozes e as perdas adicionais foi de aproximadamente 21 mmca, valor baixo para fins de seleção do ventilador centrífugo, adotou-se a vazão volumétrica de 40 m³/min (2400 m³/h) e a pressão total de 40 mmca.

Com o auxílio de uma fabricante de ventiladores, foi selecionado um ventilador de 12 pás votadas para trás de diâmetro 352 mm. Conforme observado no Anexo B, o rendimento é de 81,4% e a potência consumida é de 0,69 CV.

4.7 VIABILIDADE E CUSTO DE PRODUÇÃO DO SECADOR DE NOZ PECÃ

A fim de estimar os custos para produzir e montar o equipamento, foram consultados fornecedores de material e empresas para a manufatura de itens do secador.

Para as laterais do leito fixo foi utilizada chapa galvanizada de 2,7 mm de espessura, visto que estará em contato direto com o alimento. Para a base do leito foi utilizada chapa de

aço SAE 1045 de 2 mm de espessura. Ambas foram orçadas pela empresa Panatlântica SA em 02/10/2018 e seus valores podem ser encontrados na tabela 5. Ainda foram utilizadas chapas galvanizadas de 1,95 mm para a fabricação dos dutos de ar, que ligam a saída da estufa até a entrada do leito, totalizando uma área de aproximadamente 5 m² em chapas, a qual pode variar de acordo com a posição em que for instalado o secador. As espessuras utilizadas são medidas padrões de mercado.

Para a grelha do leito fixo foi utilizada uma tela moeda de aço inox 403, com furos de 17 mm de diâmetro e espessura de 1 mm, orçada pela Royal Máquinas em 10/10/2018.

Para a carcaça do trocador de calor e sua proteção, foram utilizadas chapas de aço SAE 1045 e 3 mm de espessura. Ainda foram utilizados tubos de aço SAE 1045 por entrarem em contato com a alta temperatura da fornalha (≈ 600 °C). Os tubos são diâmetro interno de 50 mm e 3 mm de espessura de parede, pelos quais passa o ar de secagem sendo aquecido. Esses itens foram orçados pela empresa Panatlântica SA em 02/10/2018.

A base do trocador de calor (fornalha) foi projetada em tijolos maciços na parte externa e revestida com plaquetas refratárias, orçada em 03/10/18 pela loja Taqui Materiais de Construção. A área total da base é de aproximadamente 6,5 m² (laterais + piso). Além disso, estimam-se quatro dias para a construção do forno (parte em alvenaria), devido ao tempo de cura do material, com um custo adicional de mão de obra R\$ 120,00/dia-pessoa. Para a grelha do queimador foram utilizadas tubos de aço SAE 1045 com diâmetro de 25 mm e 3 mm de espessura, conforme detalhado no item 4.3. Ainda com os mesmos tubos, foram projetados quatro suportes de 1,8 m cada para a sustentação da grelha do leito fixo.

A tabela 6 demonstra os custos de materiais utilizados na construção do equipamento. Todos os valores já apresentam incluso 5% de IPI.

Tabela 6 – Custos de material com 5% IPI incluso

Item	Valor (R\$)
Chapa Galvanizada 1,95 mm	94,50/m ²
Chapa Galvanizada 2,7 mm	130,20/m ²
Tubo Aço SAE 1045 D.50 mm Esp. 3 mm	15,95/m
Tubo Aço SAE 1045 D.25 mm Esp. 3 mm	7,68/m
Chapa Aço SAE 1045 3 mm	103,89/m ²
Chapa Aço SAE 1045 2 mm	71,29/m ²
Tela Moeda Aço Inox Esp. 1 mm	207,00/m ²
Tijolo Maciço	34,00/m ²
Plaqueta Refratária	125,00/m ²

Fonte: O Autor (2018)

A montagem do trocador de calor, dutos e leito fixo, que envolve corte, solda e dobra, requer contratação de mão de obra externa, a qual foi estimada em um dia de trabalho de 8 horas e orçada em R\$ 250,00/hora.

O ventilador foi orçado pela empresa WindTec de Caxias do Sul em 22/10/2018, no valor de R\$ 3.750,00, estando inclusos o ventilador, o motor elétrico para o acionamento e o damper para regulação de vazão.

A tabela 7 estima os custos totais de material, de acordo com a quantidade utilizada e leva em consideração o tempo total e custo de mão de obra de montagem.

Tabela 7 – Estimativa de custo total de material e mão de obra para a construção da estufa

Item	Material Utilizado	Quantidade Utilizada	Custo Total (R\$)
Tubos do trocador	Tubo Aço 1045 3 mm	41 m	653,95
Carcaça do trocador	Chapa Aço 1045 3 mm	2,8 m ²	290,89
Proteção do trocador	Chapa Aço 1045 3 mm	2,8 m ²	290,89
Base do trocador	Tijolos Maciços	6,5 m ²	221,00
Base do trocador	Plaquetas Refratárias	6,0 m ²	750,00
Grelha do queimador	Tubo Aço 1045 25 mm	16 m	122,88
Portas queimador/cinzeiro	Chapa Aço 1045 2 mm	1 m ²	71,29
Suportes trocador/grelha	Chapa Aço 1045 2 mm	1 m ²	71,29
Dutos de ar	Chapa Galvanizada 1,95 mm	5,0 m ²	472,50
Base do leito fixo	Chapa Aço 1045 2 mm	5,4 m ²	384,96
Laterais do leito fixo	Chapa Galvanizada 2,7 mm	9,6 m ²	1.249,90
Grelha do leito fixo	Tela Moeda Aço Inox 1 mm	5,4 m ²	1.117,80
Sustentação da grelha	Tubo Aço 1045 25 mm	7,2 m	55,29
Ventilador	WDRPBd 352	1 unidade	3.750,00
Termômetro	Termômetro Digital	1 unidade	150,00
Mão de obra base de tijolo	-	4 dias	480,00
Mão de obra montagem	-	8 horas	2.000,00
		Custo Total	11.652,64

Fonte: O autor (2018)

5. CONCLUSÕES

O presente estudo apresentou a proposta de desenvolver e dimensionar um equipamento capaz de promover a secagem de uma safra de noz pecã de aproximadamente 25 toneladas ao teor final de 6% de umidade.

Através de ensaios realizados no Laboratório de Alimentos da Universidade de Caxias do Sul, pode-se avaliar como a noz pecã se comporta quando submetida ao fluxo de ar aquecido. Observou-se que da colheita ao consumo, a noz precisa de uma perda de umidade de em torno de 20%, valor que corresponde a 200 mL de água/kg de noz. Além disso, o ensaio confirmou a teoria de Cecchi (2003), que afirma que à medida que a perda de água ocorre mais difícil se torna a sua remoção. Isso ocorre devido à quantidade de água intragranular e resulta em tempo de secagem mais prolongado para se obter a umidade desejada, que foi em torno de 15 horas.

Com o conhecimento da quantidade de perda de água necessária para se realizar a secagem, valores de consumo energético para o processo puderam ser calculados. Valores esses que, de acordo com poder calorífico dos combustíveis usuais existentes, contribuíram para a escolha do mesmo e de sua quantidade. A partir da avaliação do custo e disponibilidade, a lenha de eucalipto foi selecionada como combustível a ser usada no processo de secagem.

Baseado no estudo de Silva et al. (2018), sobre secadores de grãos de café, o presente estudo usou como modelo o projeto estrutural e o adaptou para a secagem de noz pecã de acordo com as informações adquiridas em bibliografia sobre o tema e cálculos para as necessidades de projeto. Através do método das diferenças logarítmicas das temperaturas do ar de secagem e dos gases de combustão, pôde-se determinar também a área de troca de calor necessária e, conseqüentemente, o diâmetro dos tubos e seus comprimentos.

Por fim, após a avaliação dos principais aspectos de comportamento e tempo de secagem do produto, bem como dos dimensionamentos de troca térmica e perda de pressão ocasionada pelo deslocamento de ar, o trabalho estimou os custos envolvidos. Ou seja, levando em conta todos os materiais, equipamentos e mão de obra necessários para a construção do secador, o valor total ficou estimado em aproximadamente R\$ 11.600,00. Valor esse menor do que os encontrados na região, de R\$ 16.000,00 e R\$ 20.000,00, referentes a secadores semelhantes e mencionados na seção 3.1.

Além dos custos de equipamentos, somam-se os de combustível. A quantidade de lenha consumida na unidade de tempo para secar uma tonelada de nós pecã foi calculada em

27 kg/h e a secagem, em 15 horas, para isso, o consumo de lenha seria de 405 kg de lenha/tonelada de noz. Portanto, o consumo de lenha por safra (25 toneladas de nozes) seria em torno de 10 toneladas, o que corresponde ao gasto total de aproximadamente R\$ 2.000,00/safra conforme valor da lenha de eucalipto mostrado na tabela 4. Ainda cabe ressaltar que, em termos financeiros nos dias atuais, em que a tonelada da noz pecã é comercializada em média a R\$13.000,00, seria necessário disponibilizar pouco além de uma tonelada de noz para a execução do projeto.

Com base nos resultados dos experimentos realizados na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que apontam um poder calorífico de 19.000 kJ/kg para a casca de noz-pecã (Apêndice A), a mesma passa a ser uma boa opção de combustível para o produtor caso tenha a opção de queima-la. Já a poda e o raleio das noqueiras são práticas comuns adotadas para que se obtenha uma boa produtividade do pomar, isso permite a utilização da própria lenha como combustível, reduzindo custos de operação.

O projeto do secador estabelecido pelo atual estudo evidencia que a sua montagem é acessível ao produtor rural de pequeno porte, já que sua execução é simples e seu custo é relativamente baixo. Ainda pode-se ressaltar que o secador é excelente opção quando comparado ao processo de secagem tradicional (ao tempo), por reduzir o tempo de secagem e melhorar a qualidade do produto final, bem como reduzir o número de perdas por fungos, bolores e danos externos. O secador de noz-pecã mostrou-se uma ferramenta economicamente vantajosa na produção e comercialização do alimento.

5.1 SUGESTÕES PARA A CONTINUIDADE DO TRABALHO

Aos engenheiros e pequenos produtores rurais, o estudo apresenta informações relevantes capazes de suscitar novos meios de aperfeiçoamento de máquinas de secagem de alimentos, especialmente de nozes-pecã; e novas maneiras de reduzir custos e otimizar a produção, respectivamente. Novos estudos em ensaios de bancada e em campo devem ser realizados a fim de confirmar a aplicabilidade prática da máquina de secagem de noz-pecã, além do seu custo-benefício.

Sugere-se ainda a aplicação de algumas modificações no trocador de calor com o intuito de reduzir a área de troca térmica e, por consequência, reduzir o número de tubos. Entre elas, a utilização de chicanas que conduzem o fluxo dos gases de combustão dentro do trocador, fazendo com que esses permaneçam mais tempo em contato com os tubos antes de

saírem pela chaminé, o que proporciona melhor aproveitamento de calor. Outra modificação para melhorar o aproveitamento térmico, seria a inserção de aletas ao longo do comprimento da superfície externa do trocador, de modo a aumentar a área de contato entre o ar e a área aquecida.

Visando uma melhor homogeneidade na umidade final das nozes, propõem-se discutir alguma forma de fazer com que o leito fixo seja movimentado mecanicamente durante a secagem.

REFERÊNCIAS

Adetec Caldeiras e Aquecedores. **Consumo de combustível**. Disponível em: <<http://adetec.ind.br/consumo.asp>>. Acesso em: 15 ago 2018.

Amêndoas de castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*) assistida a micro-ondas. **Ciências Exatas e Naturais**, 2003; (5) 2.

Aquecimento e Ventilação, 2018. **A temperatura da lenha queima de lenha no fogão. A temperatura de queima de lenha de diferentes tipos de madeira no forno de forno**. Disponível em: <<https://tehnashop.ru/pt/the-temperature-of-burning-birch-firewood-in-the-stove-the-burning-temperature-of-firewood-from-different-types-of-wood-in-the-furnace-furnace.html>>. Acesso em: 15 ago 2018.

BORÉ M, F.M.; RIBEIRO, R. C. MS; CORREA, P.C.; RIBEIRO, D.M.; RESENDE, O; **Calor específico e condutividade térmica de cinco variedades de café cereja descascado**. Universidade Federal de Lavras. II Simposio de Pesquisas dos Cafés do Brasil. 2001.

BRAGA, C.S.B; MOREIRA, C.A.; FILHO, A.P.; et al. **Desenvolvimento e avaliação de um secador solar para grãos, associado a silo subterrâneo**. R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental; 2005. v.9 (4); 666-670.

BRAZAFIC ENTERPRISES LTD. **Flat Bed Dryer & Pre-dryer**. Disponível em: <<http://www.brazaficenterprises.com/product/flat-bed-dryer-pre-dryer/>>. Acesso em: 25 ago 2018.

BUTTS, C.L.; OMARY, M.S. **Feasibility Tests for a Two-Stage Batch Dryer for Curing Farmer Stock Peanuts**. Peanut Science, 1999; 26:68-73.

CECCHI, H. M. **Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos**. 2. ed. Campinas: editora da Unicamp, 2003. 207p.

CELESTINO, S. M. C. **Princípios de Secagem de Alimentos**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2010. 51p.

DALL'AGNOL, A. Canal Rural. 2017. **Grandes produtores e consumidores de alimentos**. Disponível em: <http://blogs.canalrural.com.br/embrapasoja/2017/01/10/grandes-produtores-e-consumidores-de-alimentos/>>. Acesso em: 17 mar 2018.

DRYERATION (2018) **Secadores de grãos**. Disponível em: <<https://materiais.dryeration.com.br/secador-de-graos-dryeration>>. Acesso em: 25 ago 2018

ENGINEERING TOOLBOX, 2003. **Combustion of Wood - Heat Values**. Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/wood-combustion-heat-d_372.html>. Acesso em: 15 ago 2018.

ERICKSON, L.E. **Recent developments in intermediate moisture foods**. Journal food protections. Department of chemical engineering, Kansas State University, Manhattan, Kansas, 1981. v.5(5); 484-491.

FARMERS WEEKLY. **Pecan nuts: how to plan an orchard and prepare the soil.** laeveld.co.za. Disponível em: <<https://www.farmersweekly.co.za/crops/fruit-nuts/pecan-nuts-how-to-plan-an-orchard-prepare-soil/>>. Acesso em: 04 dez 2018.

FINCO. **Finco Difusores de ar.** Grelhas lineares GLS-GLD. Disponível em: <<https://www.fincoind.com/lista-produto/download/73>> . Acesso em: 05 dez 2018

FOX, R.W.; MCDONALD, A.T.; PRITCHARD, P.J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos.** 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

FRIESEN, O.H. **Heated-Air Grain Dryers.** Manitoba Department of Agriculture, Winnipeg, Manitoba. 1980. 27p.

FRONZA, D.; HAMANN, J. J. **Técnicas para o cultivo da Nogueira-Pecã.** Santa Maria: Colégio Politécnico da Universidade Federal de Santa Maria, 2016. 424 p.

FRONZA, D.; POLETTO, T.; HAMANN, J. J. **O cultivo da nogueira-pecã.** Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Politécnico, Núcleo de Fruticultura Irrigada, 2013.

GEORGIA PECANS. **Think Beyond the Pie.** laeveld.co.za. Disponível em: <<https://georgiapekans.org/think-beyond-the-pie/>>. Acesso em: 04 dez 2018.

GEORGIA PECAN NURSERY. Pecan Trees for Sale, Our Pecan Nursery, Wholesale & Retail. Disponível em: <<https://georgiapecantrees.com/pecan-tree-not-producing/>>. Acesso em: 04 dez 2018

GOMIDE, R. **Operações Unitárias: Operações com sistemas sólidos granulares.** São Paulo: Edição do Autor, 1983. 298 p.

GRECO, M.; CAMPOS, A. T.; KLOSOWSKI, E. S. **Variação de diferentes tempos de revolvimento em secador de camada fixa para café.** Acta Scientiarum, Agronomy. 2010; v. 32(4), 577-583

HENN, E. **Máquinas de Fluido.** 2. ed. Santa Maria: Editora Ufsm, 2006. 238 p.

HERRERA, E. **Early Harvest and Oven Drying Temperatures Influence Pecan Kernel Flavor.** Hort Science, 1994; 29(6): 671-672.

HERRERA, E. Storing Pecans. **New Mexico State University:** College of Agricultural, Consumer and Environmental Sciences New Mexico State University, Las Cruces, v. H-620, out. 2005. Disponível em: <http://aces.nmsu.edu/pubs/_h/H620/welcome.html>. Acesso em: 17 mar 2018.

IDELCHIK, I. E. **Handbook of Hydraulic Resistance. Coefficients of Local Resistance and of Friction** 4. ed. Moskva, Leningrad: Israel Program for Scientific Translations Ltd., 1960. 525 p

INCROPERA, F. et al. **Fundamentals of heat and mass transfer.** 6. ed. Indiana: John Wiley and Sons, Inc., 2007. 663 p.

KREITH, F.; MANGLIK, R. M.; BOHN, M. **Principles of heat transfer**. 7. ed. Stamford, CT: Cengage Learning, 2011. 784 p.

KRZYZANOWSKI, F.C., WEST, S.H., BARROS, J.B.R. **Drying peanut seed using air ambient temperature at low relative humidity**. Revista Brasileira de Sementes, 2006; 28 (3) 1-5.

LIMA, E. A.; SILVA, H. D.; LAVORANTI, O. J. **Caracterização dendroenergética de árvores de *Eucalyptus benthamii***. Pesquisa Florestal Brasileira, Colombo, 2011.

LOPES, R. P.; SILVA, J. S.; REZENDE, R. C. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Capítulo 3: Princípios Básicos de Psicrometria. Viçosa, MG. Editora Aprenda Fácil, 2014. 39-61p.

LOPES, R. P.; SILVA, J. S.; REZENDE, R. C. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Capítulo 3: Princípios Básicos de Psicrometria. Viçosa, MG. Editora Aprenda Fácil, 2014.51p.

MF RURAL (2018). **Secador leito fixo**. Disponível em: <<http://www.mfrural.com.br/detalhe/secador-leito-fixo-opcional-secador-solar-176990.aspx>>. Acesso em: 25 ago 2018

OHIO STATE UNIVERSITY EXTENSION. **An Introduction to On-Farm Solar Electric Systems**. Disponível em: <https://ohioline.osu.edu/factsheet/CDFS-4101>>. Acesso em: 25 ago 2018

PORTAL SOLAR LTDA (2018). **Simulador Solar**. Disponível em: <http://www.portalsolar.com.br/calculo-solar?gclid=CjwKCAjwns_bBRBCEiwA7AVGHqBKX3XC52RffSftflp7W_Tvnu2IKbLfMebia_r3rn1ziNdUm0apfBoCi7gQAvD_BwE>. Acesso em: 15 ago 2018.

RODRIGUES, I. **Processos de conservação de alimentos baseados na redução do conteúdo de água**. 2007-2008.

ROVANI, F. F. M. **Zoneamento de risco climático do cultivo da noqueira pecã (*carya illinoensis*) para o Rio Grande do Sul**. 2016. 232 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016. Disponível em: <<http://repositorio.ufsm.br/handle/1/3942>>. Acesso em: 18 mar. 2018.

SILVA, F.A.; MARSAIOLI, A. **Aspecto econômico de um processo de secagem de**

SILVA, J.S.; AFONSO, A.D.L.; DONZELLES, S.M.L. **Secagem e secadores: Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2000. p.107-138.

SILVA, J.S.; LOPES, R.P.; VITOR, D.G.; et. al. **Fornalha a lenha para secagem de café e grãos**. Brasília: Embrapa Café, 2014. Comunicado Técnico, 6. ISSN 2179-7757.

SILVA, J.S.; NOGUEIRA, R.M.; ROBERTO, C.D. **Processamento do Café com Higiene, Secadores Solar**. 2015. Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/1850557/>>. Acesso em 24 abr 2018.

SILVA, L.C. **Troca de Calor e Massa no Processamento de Grãos**. 2013. UFES – Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia de Alimentos. Disponível em: <http://www.agais.com/manuscript/ag013_troca_de_calor_massa_v3.pdf>. Acesso em: 15 abr 2018.

SOLER & PALAU, Soluções Inovadoras, 2018. **Ventiladores industriais**. Disponível em: <http://www.solerpalau.com.br/produtos/categorias/gama_industrial>. Acesso em: 13 out 2018. Acesso em 23 set 2018.

SOPA. The Soybean Processors Association of India, 2017. **World Soybean Production**. Disponível em: <<http://www.sopa.org/statistics/world-soybean-production/>>. Acesso em: 17 mar 2018.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. **Refrigeração Industrial**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2002. 384 p.

TAKATA V. V., PINTOS, V.G.V. **Caracterización de la nuez Pecan "Carya illinoensis" y sus perspectivas de comercialización en el Uruguay**. Tesis de grado, Universidad de la República (Uruguay). Facultad de Agronomía, 2013.

TALAIA, M.; VIGÁRIO, C. **Temperatura de ponto de orvalho: um risco ou uma necessidade**. Imprensa da Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016. 198p.

TANNOUS, K.; ROCHA, S. **Dinâmica de Sistemas Sólido-Fluido – Capítulo II**. Operações Unitárias I. Disponível em: <https://www.ggte.unicamp.br/ocw/sites/ocw/files/cursos/.../EQ651/.../Capitulo_II.pdf>.

TARIGAN, E.; PRATEEPCHAIKUL, G.; YAMSAENGSUNG, R.; et al. **Drying characteristics of unshelled kernels of candle nuts**. Journal of Food Engineering, 2007; 828–833.

TECNOLOGIA EM CALOR LTDA. **Tabela - Poder Calorífico Inferior - TEC Calor**. Tatuapé, São Paulo. Disponível em: <www.teccalor.com.br/PDF/TabelaPoderCalorifico.pdf>. Acesso em: 15 ago 2018.

VASCONCELOS, M. A.; MELO, A. B. **Conservação de alimentos**. Programa de escola técnica aberta do Brasil (ETEC – Brasil), 2010. 122p.

VILANOVA, L. **Mecânica dos Fluidos**. Santa Maria - RS: Colégio Técnico Industrial, 2011. 82 p.

WELLS, L. **UGA Pecan Extension: Storing Pecans**. 2018. Disponível em: <<https://site.extension.uga.edu/pecan/2018/01/storing-pecans/>>. Acesso em: 18 mar. 2018.

WELLS, Lenny. **Pecan: America's Native Nut Tree**. Tuscaloosa: The University Of Alabama Press, 2017. 263 p.

APÊNDICES

APÊNDICE A

ENSAIO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR

Ensaio de análise do poder calorífico superior foram executados em amostras de casca de noz pecã secas e moídas. O experimento foi realizado na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), com um calorímetro de marca Ika, modelo C-200, conforme figura a seguir.

Calorímetro IKA, modelo C-200

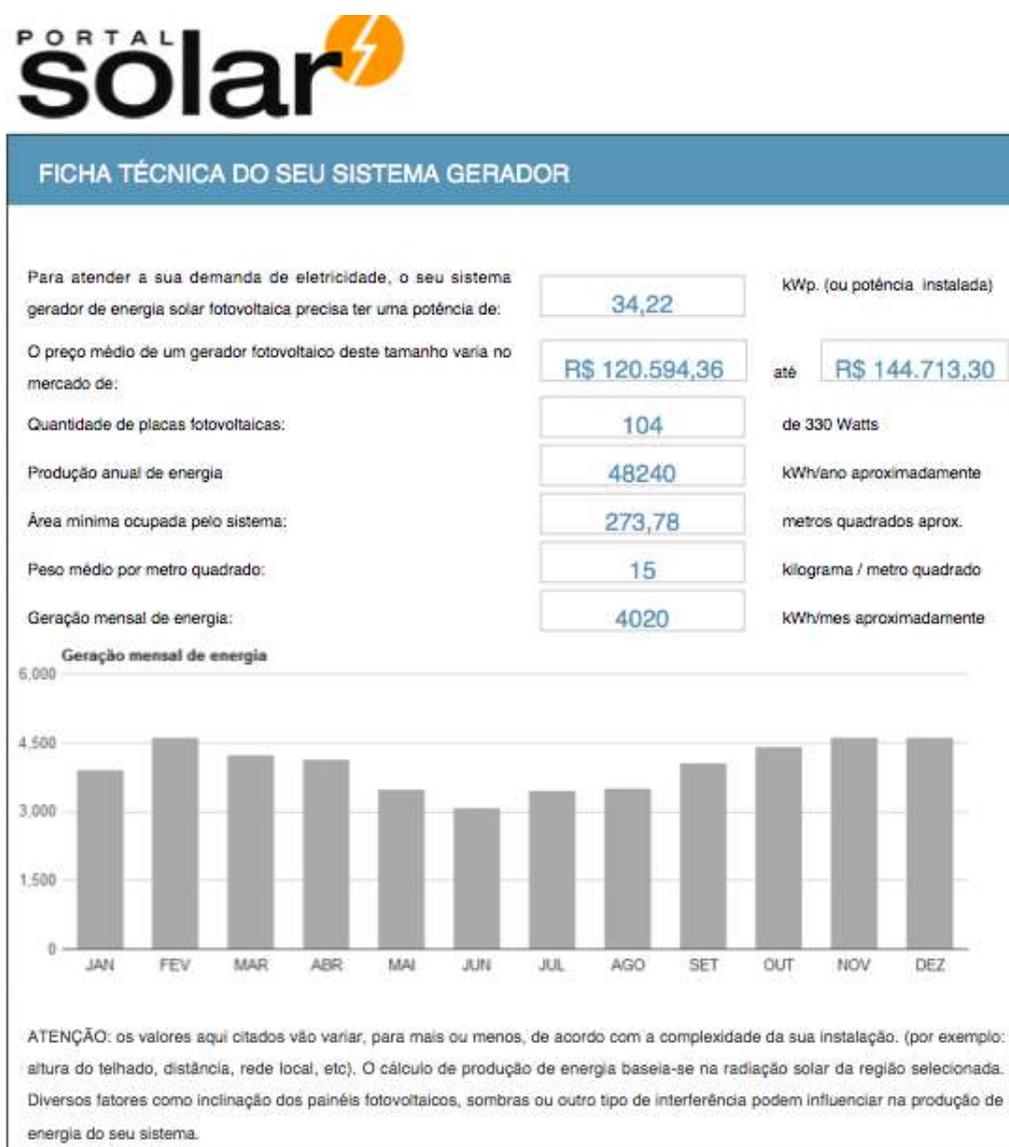


Fonte: Site do fabricante (2018)

Os resultados da análise mostraram que a casca da noz pecã gera caloria elevada quando comparada com outros combustíveis. Os valores obtidos para duas análises foram: 18801 kJ/kg e 19476 kJ/kg . Os valores obtidos evidenciam a possibilidade da sua utilização como complemento para o combustível durante o processo de secagem, caso a noz venha ser descascada e industrializada futuramente na propriedade.

APÊNDICE B

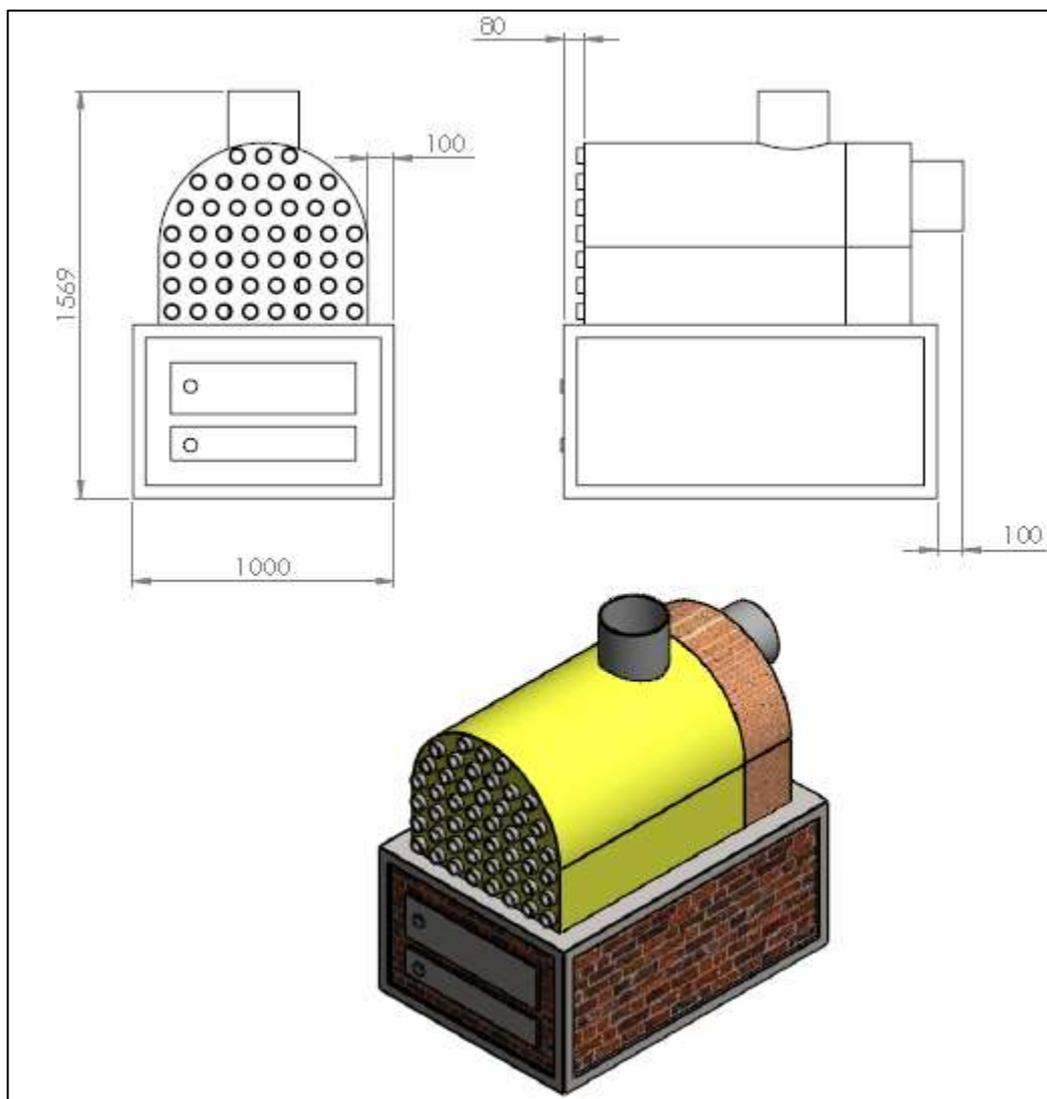
Foi avaliada a possibilidade de fornecimento de energia através do aquecimento solar de placas fotovoltaicas. As quais gerariam energia para resistências elétricas, aquecendo posteriormente o ar. Contudo, devido ao alto custo de implementação estimado no orçamento em R\$ 130.000,00 (Portal Solar, 2018), o sistema seria inviável para a propriedade em sua atual etapa de produção. Além disso, outros aspectos negativos de tal alternativa seriam que, no mês da colheita (maio), há média incidência solar e a necessidade da fonte de energia se daria uma vez ao ano apenas, enquanto sua obtenção seria ao longo do ano todo.



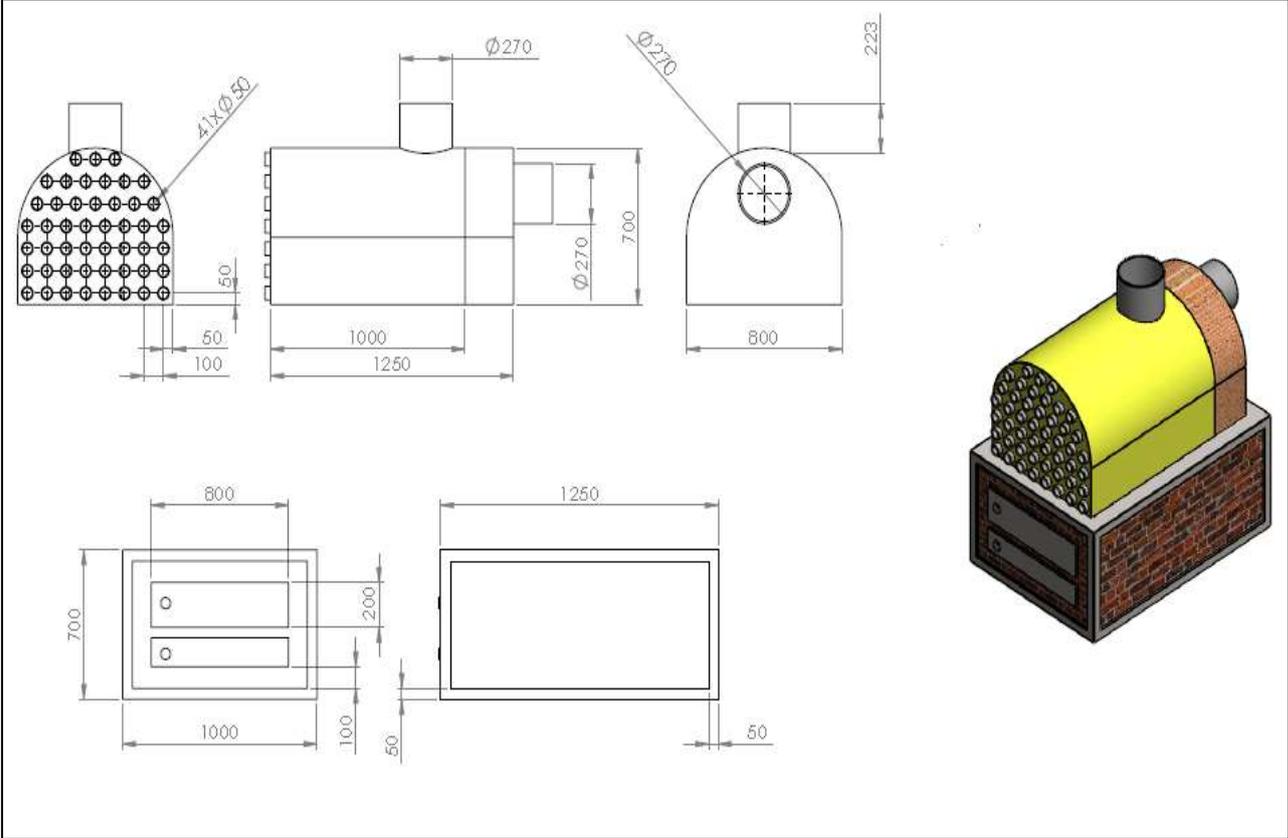
Fonte: Portal Solar Ltda (2018)

APÊNDICE D

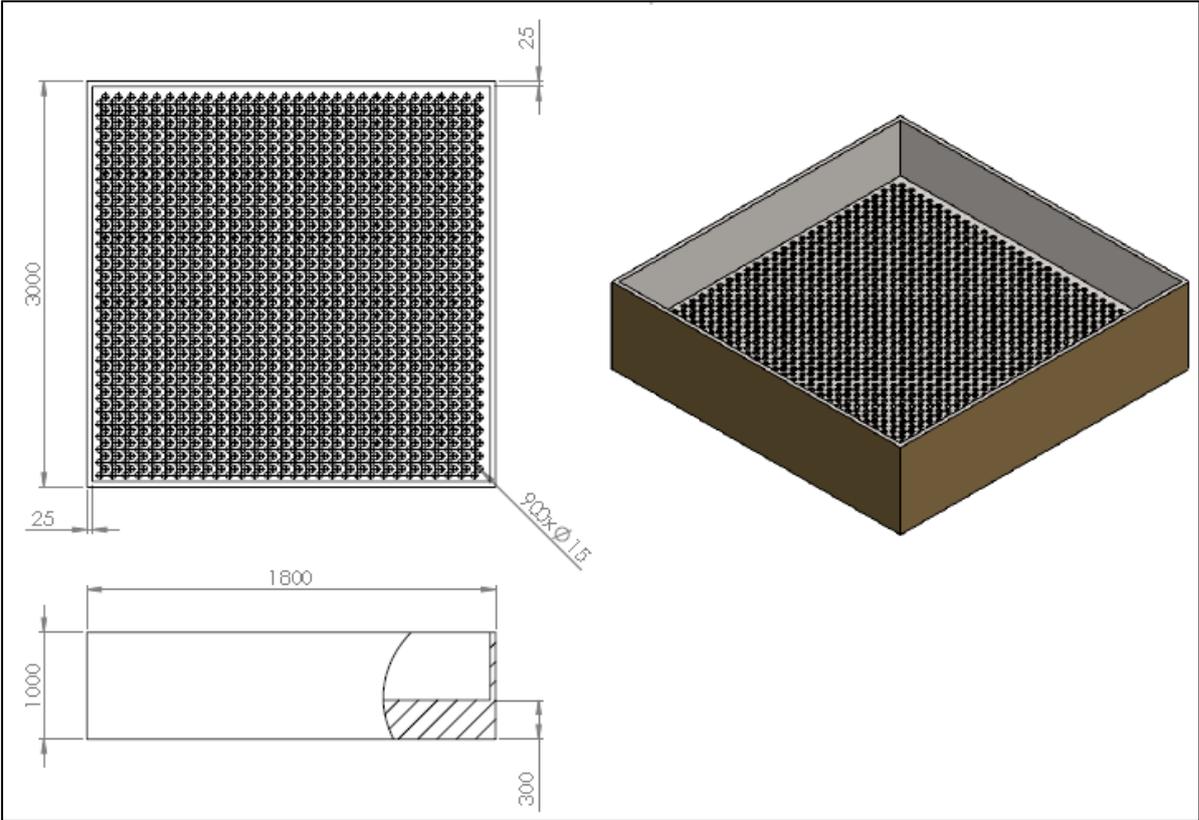
As imagens seguintes mostram de forma detalhada as dimensões da fornalha, trocador de calor e leito fixo.



Fonte: O Autor (2018)



Fonte: O Autor (2018)



Fonte: O Autor (2018)

ANEXOS

ANEXO A

Tabela 1. Consumo horário ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$) de diferentes combustíveis para a temperatura do ar de secagem de 50°C .

Vazão	Combustível					
	GLP	Lenha		Carvão	Palha de café	
m^3/min	Aquecer direto $\eta = 0,97$	Aquecer indireto $\eta = 0,3$	Aquecer direto $\eta = 0,85$	Aquecer direto $\eta = 0,88$	Aquecer indireto $\eta = 0,4$	Aquecer direto $\eta = 0,85$
60	2,72	31,07	10,96	4,73	19,51	9,18
70	3,17	36,25	12,79	5,51	22,76	10,71
80	3,69	41,43	14,62	6,30	26,02	12,24
90	4,08	46,61	16,45	7,09	29,27	13,77
100	4,53	51,79	18,28	7,88	32,52	15,30
110	4,99	56,97	20,11	8,67	35,77	16,83
120	5,44	62,15	21,93	9,46	39,03	18,36
130	5,89	67,33	23,76	10,25	42,28	19,89
140	6,35	72,51	25,59	11,03	45,53	21,42
150	6,80	77,69	27,42	11,82	48,79	22,96
160	7,25	82,87	29,25	12,61	52,04	24,49
170	7,71	88,05	31,07	13,40	55,29	26,02
180	8,16	93,23	32,90	14,19	58,54	27,55
190	8,61	98,41	34,73	14,98	61,80	29,08
200	9,07	103,59	36,56	15,77	65,05	30,61
210	9,52	108,77	38,39	16,55	68,30	32,14
220	9,98	113,95	40,22	17,34	71,55	33,67
230	10,43	119,13	42,04	18,13	74,81	35,20

Os consumos apresentados variam de acordo com o equipamento, o seu estado de conservação, o teor de umidade do combustível e as condições do ambiente.

Fonte: Silva, Lopes, Vitor (2014)

Tabela 2. Consumo horário ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$) de diferentes combustíveis para a temperatura do ar de secagem de 60°C .

Vazão	Combustível					
	GLP	Lenha		Carvão	Palha de café	
m^3/min	Aquecer direto $\eta = 0,97$	Aquecer indireto $\eta = 0,3$	Aquecer direto $\eta = 0,85$	Aquecer direto $\eta = 0,88$	Aquecer indireto $\eta = 0,4$	Aquecer direto $\eta = 0,85$
60	3,42	39,09	13,79	5,95	24,55	11,54
70	3,99	45,61	16,09	6,94	28,64	13,46
80	4,56	52,13	18,39	7,93	32,73	15,38
90	5,13	58,64	20,69	8,92	36,82	17,31
100	5,70	65,16	22,99	9,92	40,92	19,23
110	6,27	71,68	25,29	10,91	45,01	21,16
120	6,84	78,19	27,59	11,90	49,10	23,08
130	7,41	84,71	29,89	12,89	53,19	25,00
140	7,99	91,23	32,19	13,88	57,28	26,93
150	8,56	97,74	34,49	14,88	61,38	28,85
160	9,13	104,26	36,79	15,87	65,47	30,77
170	9,70	110,78	39,09	16,86	69,56	32,70
180	10,27	117,30	41,39	17,85	73,65	34,62
190	10,84	123,81	43,69	18,84	77,74	36,55
200	11,41	130,33	45,99	19,84	81,84	38,47
210	11,98	136,84	48,29	20,83	85,93	40,39
220	12,55	143,36	50,59	21,82	90,02	42,32
230	13,12	149,88	52,89	22,81	94,11	44,24
240	13,69	156,39	55,19	23,80	98,21	46,16
250	14,26	162,91	57,49	24,80	102,30	48,09
260	14,83	169,43	59,79	25,79	106,39	50,01
270	15,41	175,94	62,09	26,70	110,48	51,93

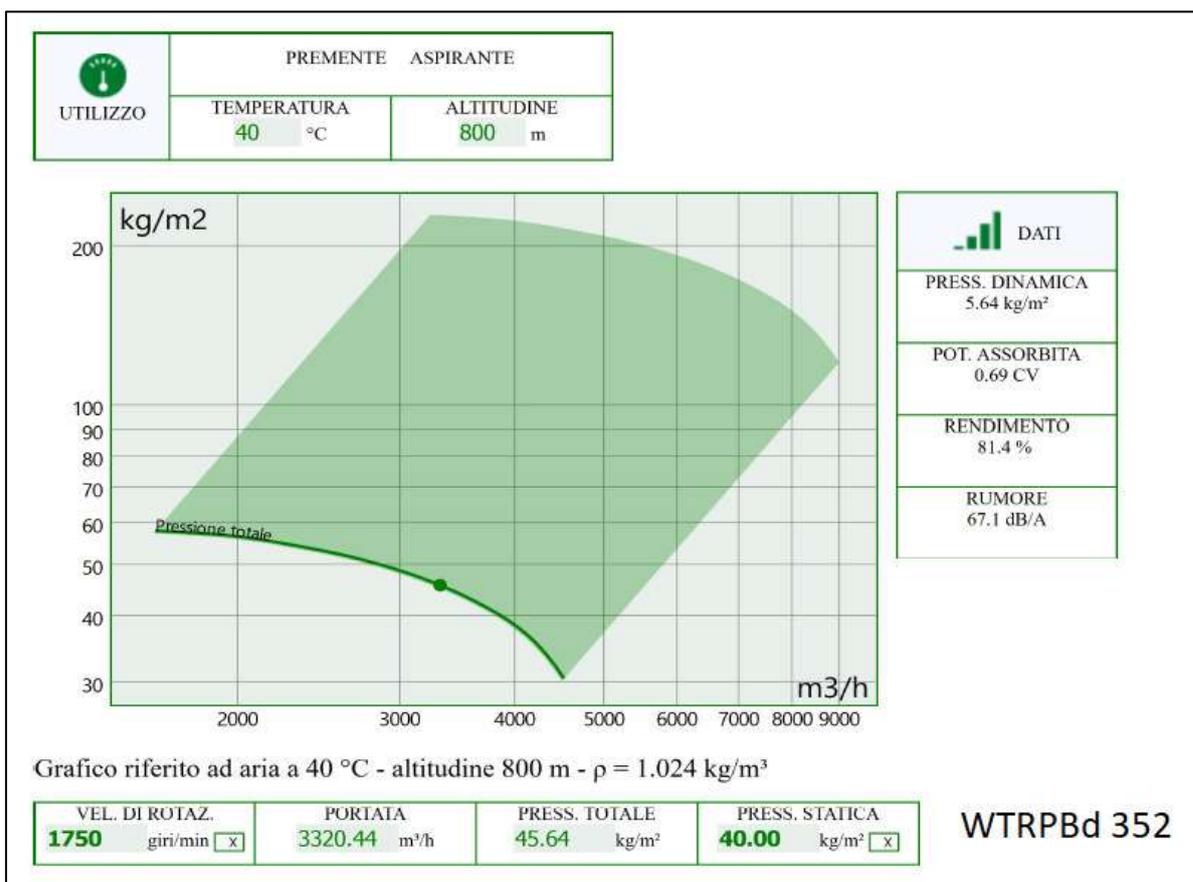
Fonte: Silva, Lopes, Vitor (2014)

Tabela 3. Consumo horário ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$) de diferentes combustíveis para a temperatura do ar de secagem de 70°C

Vazão m^3/min	Combustível					
	GLP	Lenha		Carvão	Palha de café	
	Aquecer direto $\eta = 0,97$	Aquecer indireto $\eta = 0,3$	Aquecer direto $\eta = 0,85$	Aquecer direto $\eta = 0,88$	Aquecer indireto $\eta = 0,4$	Aquecer direto $\eta = 0,85$
60	4,09	46,71	16,48	7,11	29,33	13,80
70	4,77	54,50	19,23	8,29	34,22	16,10
80	5,45	62,23	21,98	9,48	39,11	18,40
90	6,13	70,07	24,73	10,66	44,00	20,70
100	6,81	77,86	27,48	11,85	48,89	23,00
110	7,50	85,65	30,23	13,03	53,78	25,31
120	8,18	93,43	32,97	14,22	58,67	27,61
130	8,86	101,22	35,72	15,41	63,56	29,91
140	9,54	109,01	38,47	16,59	68,45	32,21
150	10,22	116,79	41,22	17,78	73,34	34,51
160	10,91	124,58	43,97	18,96	78,23	36,81
170	11,59	132,37	46,71	20,15	83,12	39,11
180	12,27	140,15	49,46	21,33	88,01	41,41
190	12,95	147,94	52,21	22,52	92,90	43,71
200	13,63	155,73	54,96	23,70	97,79	46,01
210	14,32	163,51	57,71	24,89	102,68	48,32
220	15,00	171,30	60,46	26,07	107,57	50,62
230	15,68	179,09	63,20	27,26	112,46	52,92
240	16,36	186,87	65,95	28,44	117,34	55,22
250	17,04	194,66	68,70	29,63	122,23	57,52
260	17,73	202,45	71,45	30,82	127,12	59,82
270	18,41	210,23	74,20	32,00	132,01	62,12

Fonte: Silva, Lopes, Vitor (2014)

ANEXO B



Fonte: WindTec (2018).