


**ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E MEIO AMBIENTE
ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL**

FILIPE FERREIRA DA PONTE

**UTILIZAÇÃO DE BOMBA DE CALOR COMO
COMPLEMENTO NA SECAGEM DO CAFÉ**
(*Coffea arabica* L.)

**UNIVERSIDADE
FEDERAL
FLUMINENSE**



**NITEROI
2021**

FILIFE FERREIRA DA PONTE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental.

Orientadora:

Prof^a Dr^a Roberta Jimenez de Almeida Rigueira

Niterói
2021

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

P813u Ponte, Filipe Ferreira da
Utilização de bomba de calor como complemento na secagem do café (Coffea arabica L.) / Filipe Ferreira da Ponte ; Roberta Jimenez de Almeida Rigueira, orientadora. Niterói, 2021.
42 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental)-Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, 2021.

1. Pós-colheita. 2. Qualidade dos grãos. 3. Teor de umidade. 4. Umidade de equilíbrio. 5. Produção intelectual. I. Jimenez de Almeida Rigueira, Roberta, orientadora. II. Universidade Federal Fluminense. Escola de Engenharia. III. Título.

CDD -

FILIPPE FERREIRA DA PONTE

**UTILIZAÇÃO DE BOMBA DE CALOR COMO COMPLEMENTO NA SECAGEM DO
CAFÉ (*Coffea arabica* L.)**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola e Ambiental.

Aprovada em 05 de maio de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a Roberta Jimenez de Almeida Rigueira, Orientadora, D.Sc – UFF

Prof. Ivanovich Lache Salcedo, D.Sc – UFF

Prof. Leonardo da Silva Hamacher, D.Sc – UFF

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus avós, Hélio e Serofélícia e Manuel e Reasilva, na certeza de que eles tiveram um papel fundamental para que hoje eu tenha condições de finalizar um curso de Engenharia.

AGRADECIMENTOS

O primeiro reconhecimento será aos meus avós. Naturais do Rio de Janeiro, Sergipe e Porto, fixaram residência no Rio de Janeiro, onde hoje existe a comunidade do Jacarezinho e dedicaram-se ao máximo ao trabalho para que as próximas gerações tivessem melhores oportunidades. Eles podem ficar orgulhosos, pois, o objetivo foi alcançado com êxito.

Com essa base formada, chega o momento dos meus pais. São as pessoas que estiveram ao meu lado a todo momento, desde as apresentações infantis no maternal até o meu primeiro dia de estágio em uma empresa. Nesse meio tempo, eles também foram os maiores incentivadores para que eu fosse atleta. Era só olhar para arquibancada que eles estavam lá. Na verdade, na arquibancada da vida, eles sempre torcerão por mim.

Sei que a natação tem papel de destaque na minha vida. Por isso, agradeço aos meus técnicos, em especial ao Aníbal Reigas, Thiago Guimarães e Moreno Azevedo.

Queria destacar os meus professores, tanto dos colégios quanto da gradua o. Tenham certeza de que cada um de vocês contribuiu para a pessoa e profissional que me tornei. Em especial, agradeço a Roberta Rigueira por esses meses de dedica o   minha orienta o.

Aos meus amigos digo:   engraçado perceber o quanto nós crescemos juntos! Obrigado pelos conselhos e pelas noites viradas estudando (ou em festas). Vocês fazem parte desta conquista e sei que estão comemorando esse momento. Agradeço, e muito, as vezes em que vocês me cederam uma cama para dormir em Niterói para que eu pudesse estar nas aulas no horário correto.

Luisa, a pessoa que mais me falou "você   muito bom e pode ficar tranquilo que vai dar certo", não me deixou desmotivar diante das dificuldades ao longo do caminho.

RESUMO

O aumento populacional e a expansão da agroindustrial contribuem para o aumento da produção agrícola. A manutenção da qualidade dos produtos agrícolas está relacionada a vários fatores, bióticos e abióticos, e dentre eles destaca-se o teor de água dos grãos. O teor de água de um produto exerce grande influência na variação de temperatura da massa de grãos durante a armazenagem. Desta forma, aumentando a produção de alimentos, necessariamente há que se incrementar as condições para uma armazenagem segura dos grãos. A utilização de bomba de calor deve ser um dispositivo considerado e estudado na secagem de produtos agrícolas. Pesquisadores consideram que sistemas de secagem que a utilizam apresentam alta eficiência e facilidade na operação. Isso se deve ao possível controle da temperatura e da umidade relativa do ar, a medida que as trocas de energia entre o ar, evaporador e condensador permanece praticamente inalteradas. O teor de água do café é um dos parâmetros que está relacionado diretamente à qualidade dos grãos comercializados, portando, o seu controle ao longo do processo produtivo visa diminuir os danos que podem ocasionar perdas aos produtores. O objetivo desse trabalho foi estudar a utilização de bomba de calor como complemento na secagem do café (*Coffea arábica* L.), a fim de observar as variações de teor de umidade ao longo do tempo de utilização desse sistema. Os grãos da variedade (*Coffea arábica* L.) foram armazenados em silo de alvenaria nas condições de pergaminho e descascado para a comparação da complementação da secagem através de dois sistemas. Foram utilizados os sistemas: bomba de calor e aeração com ar a temperatura ambiente. O teor de água nos dois métodos foi coletado semanalmente, ao longo de 40 dias, observando as diferenças de percentuais entre a camada inferior e superior no interior do silo. Com a adoção da bomba de calor foi possível reduzir para 2 pontos a diferença do teor de água entre essas camadas, quando comparado à aeração. Conclui-se que a utilização da bomba de calor constitui uma alternativa na complementação da secagem, e para manutenção da qualidade do café tendo em vista que o teor de água dos grãos é influenciado diretamente pela umidade relativa do ar e temperatura, sendo de extrema importância para a conservação de grãos e sementes.

PALAVRAS – CHAVE: pós-colheita; qualidade dos grãos; teor de água.

ABSTRACT

The increase in population and the expansion of agro-industrial products contribute to the increase in agricultural production. The maintenance of the quality of agricultural products is related to several factors, biotic and abiotic, and among them stands out the water content of the grains. The water content of a product exerts influence on the temperature variation of the grain mass during storage. Thus, by increasing food production, it is also necessary to increase the conditions for safe storage of grains. The use of heat pump should be a device considered and studied in the drying of agricultural products. Researchers considers that systems that use it have high efficiency and ease of operation. This is due to the possible control of temperature and relative humidity, as the energy exchanges between air, evaporator and condenser remain virtually unchanged. The water content of coffee is one of the parameters that is directly related to the quality of the grains marketed, so its control throughout the production process aims to reduce the damage that can cause losses to producers. The objective of this work was to study the use of heat pump as a complement in coffee drying (*Coffea arábica* L.), in order to observe the variations in water content in grains over the time of the use of this system. The grains of the variety (*Coffea arábica* L.) were stored in a brickwork silo under parchment conditions and peeled to compare the complementation of drying through two systems. The following systems were used: heat pump and air aeration at ambient temperature. The water content in both methods was collected weekly over 40 days, observing the percentage differences between the lower and upper layer inside the silo. With the adoption of the heat pump it was possible to reduce to 2 points the difference in water content between these layers, when compared to aeration. It is concluded that the use of the heat pump is an alternative in complementing drying, and for maintaining the quality of coffee considering that the water content of the grains is directly influenced by the relative humidity of the air and temperature, being extremely important for the conservation of grains and seeds.

KEY WORDS: post-harvest; quality of the grains; water content

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Terreiro suspenso. Montado no interior de uma estufa. Fonte: Silva et al. (2015).....	19
Figura 2 - Detalhe de transformação do terreiro convencional em terreiro híbrido. Fonte: Silva et al. (2013)	20
Figura 3 - Cafés (natural e descascado) enleirados para a secagem na ausência de radiação solar. Fonte: Silva et al. (2013).....	20
Figura 4 - Vista geral de um secador de camada fixa (Modelo UFV). Fonte: Silva et al. (2008b)	21
Figura 5 - Secador horizontal rotativo – modalidade fluxos cruzados (Gentileza Pinhalense). Fonte: Silva et al (2015).....	23
Figura 6 - Esquemas de funcionamento de um secador de fluxos cruzados que pode operar de forma contínua. Fonte: Silva et al. (2008b)	24
Figura 7 – Secador de fluxos concorrentes modelo UFV. Fonte: Silva et al (2008b).	25
Figura 8 - Sistema de armazenagem com silo-secador em fluxos contracorrentes. Fonte: Silva et al. (2008b).	25
Figura 9 - Secador de fluxos contracorrentes, modelo UFV. Fonte: Silva et al. (2008b).....	26
Figura 10 – Esquema simplificado da bomba de calor. Fonte: Nicacio (2010).....	30
Figura 11 - Planta baixa da bomba de calor experimental. Fonte: Monte (2008).	31
Figura 12 – Trajetória e as suas modificações ao passar pela bomba de calor. Fonte: Monte (2008)	31

Figura 13 – Croqui com a utilização da bomba de calor e sistema de aeração em silo experimental.....	33
Figura 14 - (a) Vista lateral da bomba de calor com equipamento de controle de temperatura e umidade relativa do ar; (b) Vista da grade da área de circulação do ar interno da bomba de calor; (c) Vista interna da bomba de calor. Fonte: Lacerda Filho, (2010).....	34
Figura 15 – Imagem lateral da bomba de calor, com sistema de controle. Fonte: Lacerda Filho (2010).	34
Figura 16 - sistema de controle de seleção de processo (aeração ou secagem), teor de umidade e umidade relativa do ar. Lacerda Filho (2010).	34
Figura 17 – Bomba de calor conectada ao silo experimental. Fonte: Lacerda Filho (2010).....	35
Figura 18 - Figura 18 – Representação gráfica dos valores médios de teor de umidade (% b.u.) dos grãos de café em pergaminho - UTA.....	36
Figura 19 – Representação gráfica dos valores médios de teor de umidade (% b.u.) dos grãos de café descascados - UTA.....	37
Figura 20 – Representação gráfica dos valores médios de teor de umidade (% b.u.) dos grãos de café em pergaminho – Aeração.....	38
Figura 21 - Representação gráfica dos valores médios de teor de umidade (% b.u.) dos grãos de café descascados – Aeração.....	38
Figura 22 – Representação gráfica dos valores médios de temperatura e umidade relativa do ar ambiente entre 09 de agosto de 09 de setembro de 2010.	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	16
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA.....	17
3.1. SISTEMAS DE SECAGEM PARA CAFÉ	17
3.1.1. <i>Secagem em terreiro convencional</i>	17
3.1.2. <i>Secagem em terreiro suspenso</i>	18
3.1.3. <i>Secagem em terreiro híbrido</i>	19
3.1.4. <i>Secadores mecânicos</i>	21
3.1.5. <i>Secadores de leito fixo</i>	21
3.1.6. <i>Secagem em secador rotativo</i>	22
3.1.7. <i>Secagem em secadores de coluna</i>	23
3.1.8. <i>Secadores de fluxo concorrente e contracorrente</i>	24
3.1.9. <i>Secagem combinada</i>	26
3.1.10. <i>Seca-aeração</i>	27
3.2. BOMBA DE CALOR	27
3.3. UMIDADE DE EQUILÍBRIO - CHUNG E PFOST (1967, 1976)	31
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	32
4.1. TEOR DE ÁGUA DOS GRÃOS, UMIDADE E TEMPERATURA DO AR AMBIENTE	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
6. CONCLUSÕES	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42

1. INTRODUÇÃO

Em atendimento ao aumento da população e a expansão da agroindústria é necessário aumentar a produção agrícola preservando a sua qualidade.

No armazenamento de grãos, as interações entre fatores abióticos (temperatura, teor de água, concentração de gases, umidade relativa do ar ambiente, condições de armazenagem, características do sistema de aeração), e fatores bióticos (grãos, insetos, ácaros, fungos e bactérias) fazem com que os produtos armazenados se tornem um ecossistema e, dependendo dos níveis dos fatores e do grau das interações, pode ocorrer alteração da qualidade.

A manutenção da qualidade dos grãos armazenados está relacionada, principalmente, com o teor de água e temperatura do produto (DEVILLA, 2004), e depende do controle de insetos, fungos e bactérias, que se reproduzem e se desenvolvem no meio (SUN & WOODS, 1997). A redução da temperatura da massa de grãos, abaixo de 15°C tem sido eficiente na redução da atividade de água dos grãos e, assim, na redução da atividade de insetos e de fungos (SUN & WOODS, 1994; SUN & BYRNE, 1998).

O teor de água de um produto exerce grande influência na variação de temperatura da massa de grãos durante a armazenagem (KHANKARI et al., 1994). Por isso, recomenda-se a secagem e a limpeza do produto antes do seu armazenamento, pois esses procedimentos diminuem a ação da microflora na massa de grãos, retardando a velocidade das trocas gasosas e o processo de deterioração natural.

Variações climáticas contribuem para a formação de gradientes de temperatura na massa de grãos armazenada. Temperaturas diferentes nos ambientes interno e externo de um silo provocam correntes de ar na massa de grãos, que podem induzir à migração de umidade das áreas de altas temperaturas para as de baixa temperatura, devido às correntes convectivas. A migração de umidade pode potencializar o desenvolvimento de insetos, fungos e bactérias e iniciar a deterioração do produto (CHANG & STEELE, 1995; GONG et al., 1995).

Desta forma, para aumentar a produção de alimentos, necessariamente há que se incrementar as condições para uma armazenagem segura dos grãos. Para isto são requeridas técnicas adequadas que reduzam, a níveis aceitáveis, o processo de deterioração que, por ser altamente dependente da temperatura e do

teor de água dos grãos, está relacionada com a respiração do produto e dos microrganismos que o acompanham (SAUER, 1992).

A secagem é um processo pós-colheita que tem por finalidade retirar parte da água contida nos produtos agrícolas, e assim facilitar a sua preservação. É definida como um processo simultâneo de transferência de calor e massa, e a taxa de remoção de água é determinada pela taxa na qual calor e massa possam ser transferidos (BROOKER et al., 1992). Por meio desse processo, a água é retirada do produto e transportada pelo ar que passa através da massa porosa de grãos.

Diversas técnicas de secagem podem ser aplicadas em diferentes produtos. As de aplicação prática utilizam o ar como meio secante. O ar é usado, na maior parte dos sistemas de secagem, como elemento que introduz calor aos grãos ao mesmo tempo em que extrai a sua umidade. Assim sendo, as diferentes estratégias diferem apenas na forma como o ar e a energia transitam pelo sistema de secagem (GROFF, 2002).

A adoção da técnica da aeração tem sido muito utilizada na prevenção e ou solução de problemas de conservação dos grãos armazenados. Seus principais objetivos são: resfriar, uniformizar a temperatura, prevenir o aquecimento e o umedecimento e promover remoção de odores na massa de grãos (SILVA et al., 2000; NAVARRO & CALDERON, 2000).

O uso adequado da aeração em uma massa de grãos armazenada, além de reduzir o custo da armazenagem, é de fundamental importância para se manter a qualidade do produto. A temperatura e o teor de água podem ser reduzidos com a aeração, tendo-se por consequência menor deterioração dos grãos.

Santos (2007) apresenta que a bomba de calor deve ser um dispositivo considerado e estudado na secagem de produtos agrícolas. Ele considera que sistemas que a utilizam apresentam alta eficiência e facilidade na operação. Isso se deve ao possível controle da temperatura e da umidade relativa do ar, a medida em que as trocas de energia entre o ar, evaporador e condensador permanece praticamente inalteradas. A utilização da bomba de calor permite a operação utilizando ar seco e aquecido em baixas temperaturas, inferior a 60 °C (MONTE, 2008).

Portanto, o conhecimento da variação de temperatura e do teor de água em diferentes locais de uma massa de grãos, ao longo de um processo de aeração e secagem, pode ser uma ferramenta importante no desenvolvimento e na avaliação

de estratégias de controle para manter os grãos sadios e reduzir o custo com tratamento químico, direcionado para insetos e fungos.

Diversos estudos experimentais têm sido conduzidos utilizando sistemas de secagem com bomba de calor, com a finalidade de obter melhor qualidade dos produtos, maior eficiência energética e otimização de componentes e projetos destes sistemas, principalmente quando se refere a sistemas de produção de café.

O café é um dos produtos mais produzidos no Brasil. De acordo com a CONAB, o ano de 2020 foi um ano de bialidade positiva e apresentou uma área de 2,16 milhões de hectares cultivados com café arábica e conilon, sendo 1,4% a mais que o ano de 2019 (CONAB, 2020). Essa área foi dividida em 1,88 milhões de hectares em produção e 277,3 mil hectares de lavouras em formação. A produção de café arábica registrou 48,77 milhões de sacas colhidas, enquanto o café conilon apresentou 14,31 milhões de sacas colhidas, totalizando 63,08 milhões de sacas beneficiadas, um aumento de 27,9% em relação a 2019. Segundo Monte (2008), o preço de mercado do café está ligado diretamente à qualidade do grão beneficiado.

Os processos de pós-colheita e secagem interferem diretamente qualidade do café. No momento da colheita, a mucilagem do café apresenta alto teor de açúcar e umidade em torno de 60% b.u. Para evitar a deterioração e fermentação dos grãos, mantendo a sua qualidade no armazenamento, busca-se atingir com a secagem a umidade final entre 11 e 12% b.u. (LACERDA FILHO e SILVA, 2006). Através da secagem pode-se obter um aumento de produção, pois, se torna possível a antecipação da colheita, a diminuição de perdas no campo e redução de agentes de degradação dos grãos (MONTE, 2008).

Desse modo, esse trabalho teve como objetivo estudar a utilização de bomba de calor como complemento na secagem do café (*Coffea arábica* L.), a fim de observar as variações de teor de umidade ao longo do tempo de utilização desse sistema.

2. OBJETIVOS

Objetivou-se, com esse trabalho, estudar a utilização de bomba de calor como complemento na secagem do café (*Coffea arábica* L.), a fim de observar as variações de teor de umidade ao longo do tempo de utilização desse sistema.

Especificamente monitorar o processo de secagem em grãos descascados e em pergaminho, quando comparado ao sistema de aeração com ar a temperatura ambiente.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Sistemas de secagem para café

De acordo com Silva et al. (2008c), a secagem de café no Brasil pode ser dividida em dois métodos: a secagem em terreiros e a secagem em secadores. Eles definem que o primeiro método consiste na dispersão do produto em uma superfície de cimento, tijolos, de chão batido ou de asfalto, onde é necessária a movimentação frequente da massa de grãos e tem a energia solar como ferramenta atuante no processo. Dessa forma, esse processo é dependente das condições ambientais da localidade e da mão de obra necessária para operacionalização do sistema, podendo se tornar mais inoportuno se comparado aos secadores mecânicos (AMPESAN et al., 2010). O segundo método é a utilização de ventiladores que forcem a passagem do ar aquecido através dos grãos, que podem estar estáticos, ou não, dentro do secador. A secagem em combinação, que tem por característica realizar uma pré-secagem em terreiro ou em pré-secadores e depois ser complementada em silo ou tulha secadora com ar natural ou levemente aquecido (um aumento de temperatura de até 10° acima da temperatura ambiente) vem sendo mais estudada e aplicada em locais específicos (SILVA et al., 2008c).

3.1.1. Secagem em terreiro convencional

A secagem em terreiros convencionais é feita através da dispersão da massa de café em uma superfície de concreto, lama asfáltica, tijolo de argila e chão batido. Esse método se torna dependente das condições climáticas do local a medida em que a energia solar é a responsável pela redução de umidade dos grãos. Outro fator de atenção para a sua utilização é a necessidade de mão de obra constante para o revolvimento e recobrimento das pilhas de grãos ao longo dos dias. Santos (2007) defende que nesse tipo de secagem o trabalho deverá seguir lotes homogêneos. Por isso, deve-se seguir a secagem considerando a época de colheita, estágio de maturação, ou teor de água dos grãos, com objetivo de manter a uniformidade e qualidade final do produto.

Para Silva et al. (2008c), no terreiro, o processo de fermentação do produto é acelerado por conta do desenvolvimento de microrganismos na superfície do café

somado à sua elevação da respiração e temperatura. Segundo eles, os secadores mecânicos comercializados atualmente possuem dificuldades para secar o café logo após a colheita, ou recém-saído do lavador, devido ao alto teor de umidade que dificulta o escoamento da massa de grãos no interior do secador. Eles recomendam secar o café em terreiros, ou pré-secadores, até o estado de meia-seca (35 a 40% b.u.), com secagem continuada em secador mecânico até a umidade atingir 22% e posteriormente a secagem complementar, em silos ventiladores, no decorrer do armazenamento com objetivo de atingir a umidade de comercialização, a qual gira em torno de 12%.

Em estudo com café cereja descascado da variedade Catuaí, Ampessan et al. (2010) experimentaram três tratamentos para secagem de café até atingir entre 11 e 12% de b.u. Os tratamentos foram a secagem completa em terreiro com pavimentação de concreto, a secagem completa em terreiro com pavimentação de asfalto e a secagem completa em terreiro de leito suspenso, que foi utilizado como testemunha. Eles verificaram que a secagem em asfalto aconteceu mais rápido, e com maior eficiência, do que a secagem em terreiro de concreto. No mesmo estudo eles apresentam que a incidência de fungos reduziu conforme a diminuição do teor de água, independente do material utilizado na pavimentação.

3.1.2. Secagem em terreiro suspenso

O terreiro suspenso, presente na Figura 1, se mostra como opção para a realizar a operação de secagem de café. Sua utilização consiste na ideia de que a massa de café será espalhada em uma chapa perfurada que se encontra elevada em relação ao solo.



Figura 1 - Terreiro suspenso. Montado no interior de uma estufa. Fonte: Silva et al. (2015)

Segundo Silva, Moreli e Siqueira (2015) essa forma de secagem utiliza os raios solares para aquecimento do produto e, devido a diferença de altura entre a base do terreiro e o solo, a passagem do ar é facilitada fazendo com que haja maior troca de calor e transporte de massa de vapor de água proveniente do produto.

Ampessan et al. (2010) obtiveram como resultado que a contaminação fúngica foi menor no terreiro suspenso, em comparação a secagem em terreiro de cimento e asfalto, devido a circulação de ar na massa de grãos a todo tempo, até mesmo no período da noite. Através da prova de xícara eles concluíram que não houve influência do tipo de terreiro na qualidade da bebida.

3.1.3. Secagem em terreiro híbrido

Visando diferentes escolhas de secadores, o terreiro híbrido figura entre as alternativas possíveis. Conforme descrito por Silva et al. (2013), esse sistema é uma adaptação do terreiro convencional, pois, é inserido um sistema de ventilação composto por ventilador, túnel e distribuidores de ar. Segundo eles, o aquecimento do ar é de responsabilidade das fornalhas, que utilizam a queima de biomassa, ou alguma outra forma de aquecer o ar, que efetuará a secagem dos grãos dispostos na calha de distribuição. A Figura 2 apresenta o esquema de um local onde há o terreiro convencional juntamente com o terreiro híbrido, permitindo a secagem nos dois modelos de acordo com a preferência e planejamento dos responsáveis. O

produto será disposto ao longo das calhas de distribuição, como evidenciado na Figura 3, e assim prosseguirá com a secagem.

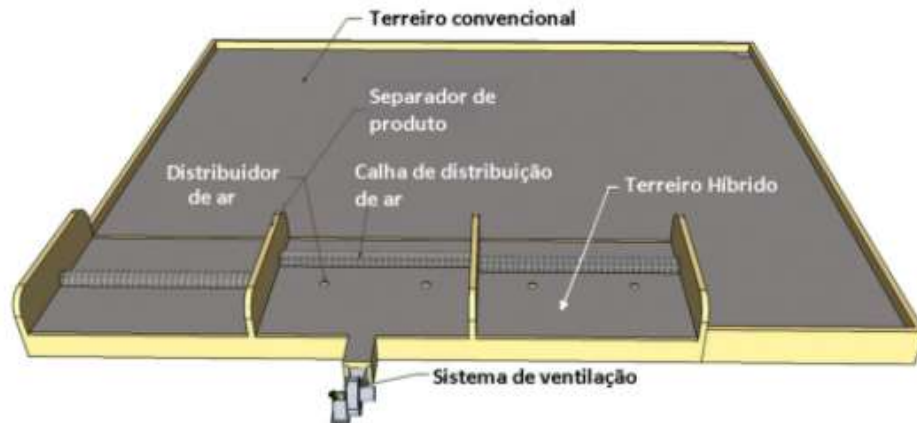


Figura 2 - Detalhe de transformação do terreiro convencional em terreiro híbrido.
Fonte: Silva et al. (2013)



Figura 3 - Cafés (natural e descascado) enfileirados para a secagem na ausência de radiação solar. Fonte: Silva et al. (2013)

Silva et al. (2013) apresentam que esse método possibilita a secagem do café recém-saído do lavador ou descascador, utilizando o ar aquecido a 50 °C e duração inferior a 50 horas efetivas. Ainda segundo os autores, deve-se utilizar uma cobertura plástica em dias chuvosos e a noite quando o sistema não possuir uma cobertura permanente. Eles informam que dessa maneira o sistema admite a secagem durante 24 horas ao dia, pois, o produto aproveita a energia solar ao

longo do dia e utiliza o fluxo de ar aquecido em dias de baixa luminosidade, períodos chuvosos ou ao longo da noite.

3.1.4. Secadores mecânicos

De acordo com Silva et al. (2008c) o café suporta uma temperatura máxima de 70°C em um secador convencional. Para eles, as temperaturas mais elevadas ocasionam prejuízos ao produto, pois, o escoamento de muitos grãos no secador não é adequado. Essa situação provoca a supersecagem de uma parcela e não possibilita o atingimento do teor de umidade ideal (11 a 12% b.u.) de parte desse montante

3.1.5. Secadores de leito fixo

Os secadores de leito fixo têm por característica manter o produto estático no decorrer do processo de secagem e é composto por fornalha de fogo direto, ventilador e câmara de secagem (SILVA et al., 2015) conforme mostrado na Figura 4. Como os grãos ficam estáticos, é recomendável que exista o revolvimento a cada três horas de forma manual ou através de revolvedores mecânicos, sendo a sua operação de forma contínua ou por intervalos pré-definidos. A prática de revolver o café tem como objetivo a homogeneização de temperatura e teor de água (SILVA et al., 2015).



Figura 4 - Vista geral de um secador de camada fixa (Modelo UFRV). Fonte: Silva et al. (2008b)

Em trabalho com secador de leito fixo sem revolvimento, Silva, Marques e Caixeta (2017) desenvolveram um experimento com café Catuaí 144 onde das 8:00 às 21:00 utilizou-se o ar de secagem com temperatura entre 35°C e 40°C, sem que

ultrapassasse os 35°C na massa de grãos. A partir das 21:00h a temperatura de secagem não passou dos 25°C na entrada de ar. Essa metodologia foi utilizada todos os dias, exceto no 6º e 10º dia de seca por conta do descanso do café. Foi apresentado que a seca levou onze dias, pois, o café utilizado no experimento é enquadrado na produção de cafés especiais e, por isso, as temperaturas de secagem foram baixas ocasionando um aumento no tempo. Realizou-se a secagem em terreiro para comparar o resultado da bebida entre os dois métodos. A partir dos resultados, os autores concluíram que foi possível realizar a secagem de café especial em secadores de camada fixa sem que houvesse comprometimento da qualidade. O café que após a seca experimentou descanso obteve pontuação de bebida superior ao café secado em terreiro e o café que foi provado imediatamente ao final da seca. Com medições a partir da meia-seca no secador estático, foi apresentado que a desigualdade de umidade entre a camada inferior e a camada superior diminuiu ao longo do processo de secagem.

3.1.6. Secagem em secador rotativo

Santos (2007) descreve esse tipo de secador como sendo formado por um cilindro tubular horizontal, ou ligeiramente inclinado, que gira em torno do seu eixo longitudinal a medida em que o ar de secagem é inserido no mesmo sentido ou, nos casos de secadores inclinados, em sentido contrário à trajetória do produto. Em secadores contínuos, o produto úmido chega à parte superior do tambor através de um transportador e sai na parte mais baixa por gravidade.

Na secagem de café, o secador de tambor horizontal não-inclinado é utilizado como pré-secador ou secador. Sendo o ar de secagem introduzido radialmente na massa de grãos através de uma câmara localizada no centro do tambor (SANTOS, 2007), o que pode ser observado na Figura 5.

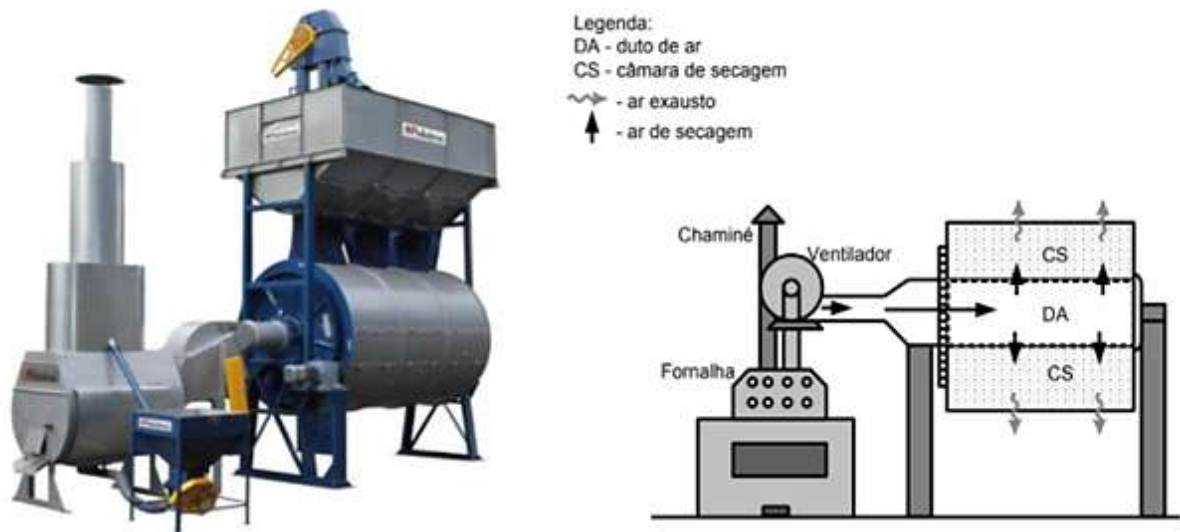


Figura 5 - Secador horizontal rotativo – modalidade fluxos cruzados (Gentileza Pinhalense). Fonte: Silva et al (2015).

Silva e Sobrinho (2001) em estudo com secador rotativo horizontal e secador vertical intermitente de fluxo cruzado concluíram que utilizando o primeiro secador na pré-secagem e complementando no segundo, ou, secando em sua totalidade através do secador rotativo horizontal, não tiveram alterações na qualidade do café seco e beneficiado, quando comparado com o café secado em terreiro. Outro resultado apresentado é que a secagem parcial utilizando o secador horizontal seguido pelo vertical obteve menor consumo específico de energia, com isso, é mais eficiente energeticamente realizar a secagem total em um secador horizontal.

3.1.7. Secagem em secadores de coluna

Santos (2007) apresenta que esse tipo de secagem é caracterizado por colunas verticais construídas em chapas perfuradas, que possuem o ar de secagem atravessando perpendicularmente a massa de grãos. Ele defende que nos casos em que o produto estiver em movimento o secador é chamado de fluxos cruzados. O autor expõe que, na secagem de café, o secador em colunas com recirculação do produto é o mais utilizado. Segundo Silva (2000, apud SANTOS, 2007, p. 27), nesse tipo de secador deve-se evitar que a temperatura do ar ou da massa de café esteja acima de 45°C por períodos superiores a duas horas. A Figura 6 dispõe a operação do secador de fluxos cruzados (a) e um modelo com a capacidade de trabalhar de forma contínua.

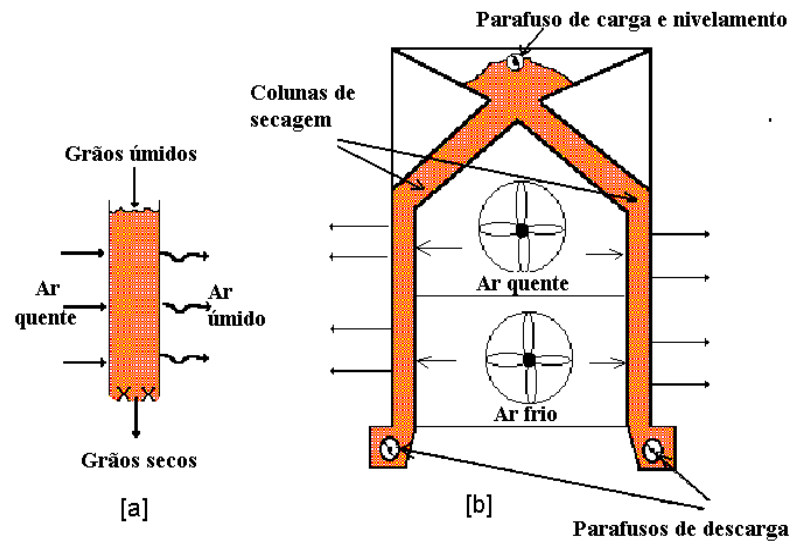


Figura 6 - Esquemas de funcionamento de um secador de fluxos cruzados que pode operar de forma contínua. Fonte: Silva et al. (2008b)

3.1.8. Secadores de fluxo concorrente e contracorrente

Silva et al. (2000, apud LACERDA FILHO e SILVA, 2001) descreveram que em secadores de fluxo concorrente, a massa de grãos e o ar de secagem estão direcionados em sentidos iguais no interior do secador (Figura 7). A taxa de evaporação é mais elevada na parte superior da massa, pois, o produto com maior teor de umidade entra em contato com o ar de temperatura mais alta. Dessa forma, as trocas de energia e massa na entrada da câmara de secagem causam a redução na temperatura inicial do ar de secagem e na umidade do produto, fazendo com que a temperatura seja inferior à temperatura inicial do ar de secagem.

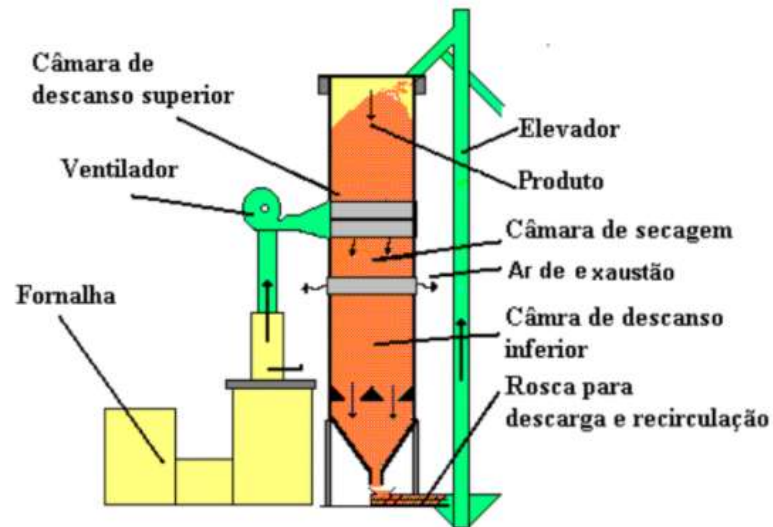


Figura 7 – Secador de fluxos concorrentes modelo UFV. Fonte: Silva et al (2008b).

Os secadores de fluxo contracorrente são descritos por Silva et al. (2008b) como sendo aqueles que possuem como característica ter o ar de secagem em sentido ascendente enquanto o sentido dos grãos é descendente, ou seja, possuem direções opostas. Eles apresentam que em silos secadores (Figura 8) com esse tipo de fluxo, a frente de secagem se encontra próxima à chapa perfurada no fundo do silo e o ar de secagem deve ter uma temperatura de até 70 °C para evitar danos no produto.



Figura 8 - Sistema de armazenamento com silo-secador em fluxos contracorrentes. Fonte: Silva et al. (2008b).

Os secadores de fluxos contracorrentes, em torre, foram desenvolvidos pela UFV e podem ser construídos com recursos encontrados no mercado local, tais como chapas metálicas, alvenarias ou madeira (SILVA et al., 2008b). Nesse modelo, os tubos de exaustão de ar se encontram acima do sistema de aquecimento e ventilação do sistema, descrição de Silva et al. (2008b) que pode ser observada na Figura 9.

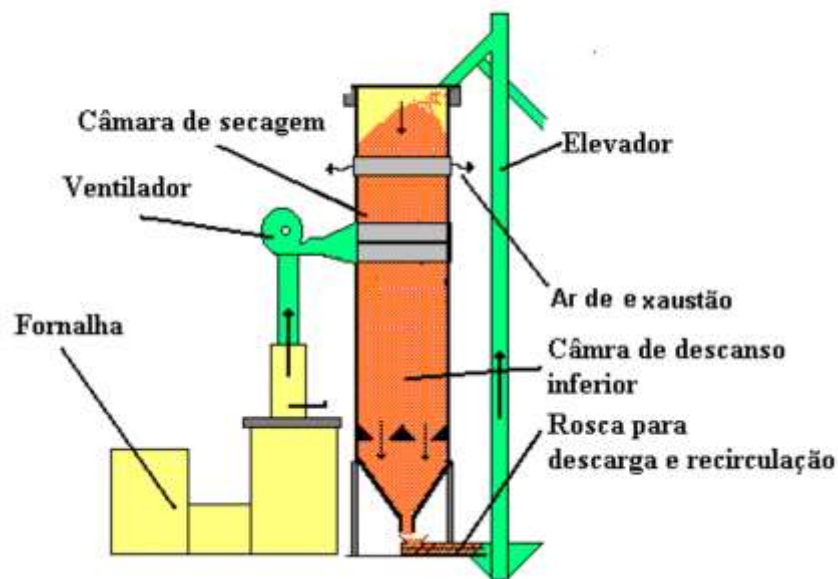


Figura 9 - Secador de fluxos contracorrentes, modelo UFV. Fonte: Silva et al. (2008b).

Como resultado no estudo com secador de fluxo concorrente, com secagem em lote, Lacerda Filho e Silva (2001) observaram que o café a meia seca em terreiro de cimento apresentou um resultado adequado para se ter café de qualidade. No mesmo estudo eles utilizam o ar de secagem a uma temperatura de 85 ± 5 °C sem que exista interferência na qualidade do café, apresentando classificação de bebida apenas mole, sendo o mesmo resultado obtido na secagem em terreiros.

3.1.9. Secagem combinada

Silva et al. (2008b) discorrem que a secagem combinada começa na separação do café tipo cereja por densidade, prossegue para o descascamento e posteriormente ocorre a lavagem para remoção da mucilagem. Posteriormente é realizada a pré-secagem em secador de camada fixa, com revolvimento da massa a

cada três horas. De acordo com eles, existe também a opção de a pré-secagem ser realizada em secador rotativo ou em outro sistema de secagem de alta temperatura que seja adequado para café com elevado teor de umidade e presença de mucilagem.

Após a pré-secagem, onde o produto atingirá valores próximo a 25% b.u., a depender das condições climáticas de secagem em baixas temperaturas, os grãos seguem para a secagem complementar em silos, com ar natural ou aquecido. Eles defendem que esse método reduz o tempo de secagem em alta temperatura, eleva a capacidade dos secadores e diminui o consumo de energia em mais de 50% em comparação com sistemas mais tradicionais de secagem.

Lacerda Filho e Silva (2006) concluíram que o café colhido pelo método de derriça no chão, lavado e depois separado os frutos pesados dos “bóias”, pode ser secado com meia-seca (com umidade inicial entre 68,9 e 71,3% b.u. e final entre 44,0 e 47,5% b.u.) em secador de camada fixa e complementação com secadores de fluxos concorrentes (até a umidade final entre 12,2 e 13,8%). Eles defendem que os frutos com teor de água em torno de 45% b. u. apresentaram boa fluidez no secador de fluxos concorrentes e que a secagem com ar na temperatura entre 80 e 100 °C não comprometeu a qualidade do café nesse tipo de secador. Já no secador de leito fixo a temperatura do ar variou entre 50,4 e 76,0 °C.

3.1.10. Seca-aeração

Outro método de secagem é a seca-aeração, que segundo Silva et al. (2008b), consiste na secagem dos grãos em temperaturas elevadas, seguido de um período de repouso e posteriormente uma etapa de resfriamento. Para eles, o período de repouso propicia a redistribuição da umidade na massa dos grãos e também no interior dos grãos de café. Já a fase de resfriamento consiste na utilização de fluxo de ar ambiente para complementar a secagem e para diminuir a temperatura na massa de grãos. Para Silva et al. (2015) esse sistema proporciona redução de danos mecânicos e térmicos ao café e permite a racionalização do secador no período da colheita.

3.2. Bomba de calor

A bomba de calor é um equipamento térmico que opera baseado na compressão de vapor e que possui a capacidade de resfriar ou aquecer o ar. Em

máquinas de refrigeração, o objetivo é absorver o calor de uma fonte fria a partir do evaporador. O calor extraído do condensador pode ser direcionado para a atmosfera ou para uma massa de água. Dessa forma, esse calor pode ser utilizado para satisfazer uma carga de aquecimento, sendo essa prática caracterizada como uma bomba de calor. Ainda assim, o efeito de refrigeração continuará acontecendo e poderá ser usado ou não de acordo com a necessidade (PITA, 2002, apud SANTOS, 2007, p.4).

De acordo com Nicacio (2010) a bomba pode ser utilizada em situações de aquecimento ou resfriamento, abrindo a possibilidade de ser empregada em etapas de pré-processamento e durante a conservação dos produtos agrícolas.

A função da bomba de calor é bombear a energia térmica de um nível energético mais baixo, geralmente o ar ambiente, para um nível energético mais alto. (SANTOS, 2007). Da mesma forma que o estudo de Santos (2007), o nível energético superior nesse estudo será o ar de secagem, pois, deseja-se estudar sua aplicabilidade para a seca de grãos de café. Sua utilização tem sido mais aceita em casos residenciais e comerciais de pequeno porte, a medida em que o equipamento é pequeno e de fácil manutenção (SANTOS, 2007).

Os componentes essenciais da bomba de calor são o compressor, condensador, válvula de expansão, evaporador e o fluido refrigerante (NICACIO, 2010). Para Larrinaga et al. (1993, apud SANTOS, 2007, p.5) os componentes podem ser descritos como:

- a. Fluido refrigerante - a substância tem a propriedade de mudança de estado em diferentes temperaturas, em uma determinada pressão, e permite a troca de calor entre a evaporação e condensação.
- b. Evaporador - é um trocador de calor que permite a evaporação do fluido refrigerante em uma baixa temperatura e pressão.
- c. Compressor - recircula o fluido refrigerante no sistema proporcionando uma diferença de pressão entre o evaporador e o condensador, pois, recebe o fluido do evaporador em determinada pressão e descarrega-o em uma pressão mais alta no condensador.
- d. Condensador - é um trocador de calor que permite a condensação do fluido evaporado, cedendo calor para o meio que necessita de aquecimento

- e. Elemento de controle - tem como função controlar o fluxo do fluido refrigerante no sistema, fazendo a ligação do condensador ao evaporador. Usa-se a válvula de expansão em grandes sistemas para ajustar automaticamente a quantidade de fluido refrigerante que será circulada.
- f. Filtro secador – componente que é instalado entre o condensador e elemento de controle e tem como função reter particular sólidas e desidratar o sistema, absorvendo a água remanescente da operação de montagem.

Conforme descrito por Nicacio (2010), o funcionamento do sistema ocorre quando o líquido refrigerante, em baixa pressão, absorve o calor latente de vaporização do fluido da vizinhança, geralmente o ar, e evapora no evaporador. O vapor gerado segue para o compressor, onde é consumida energia elétrica (há inserção de trabalho) para comprimir o vapor e aumentar a sua pressão. O processo continua com o vapor em alta pressão sendo inserido no condensador. Nesse local, ocorre a condensação e o resultado é o resfriamento do fluido e liberação de calor para a vizinhança. O fluido refrigerante segue para a válvula de expansão, com a finalidade de diminuir sua pressão até a pressão de evaporação, a fim de dar continuidade ao processo.

Santos (2007) em estudo com (*Coffea arabica L.*) cereja descascado, da variedade Catuaí, buscou a secagem dos grãos com a utilização de bomba de calor. A colheita do fruto foi realizada por derricha sobre o pano quando o teor de água dos grãos estava em torno de 60%. Foi realizado o processamento via úmida e o café cereja descascado e desmucilado foi espelhado em terreiro de cimento, com revolvimento, até atingir o teor de $42 \pm 1,0\%$ b.u. Posteriormente, foi realizada a pré-secagem em secador de leito fixo em leiras até o teor de água nos grãos se encontrar em $24,4 \pm 0,5\%$ b.u. A secagem complementar foi realizada em secador de café em lotes intermitentes de fluxos concorrentes, utilizando uma bomba de calor para condicionamento do ar de secagem. O teor de umidade atingido após a secagem foi de $11,0 \pm 0,8\%$ b.u.

Santos (2007) descreveu que o sistema operou com 100% de recirculação do ar de exaustão entre o secador de fluxos concorrentes e a bomba de calor. O ar de exaustão atravessa o evaporador da bomba de calor, sendo resfriado a uma temperatura inferior ao ponto de orvalho, fazendo com que houvesse a condensação da água ali presente. O evaporador apresentava uma temperatura menor que a de

ponto de orvalho do ar de exaustão. A partir do calor dissipado pelo compressor e pelo condensador da bomba de calor, o ar com menor razão de mistura foi aquecido a uma temperatura superior à temperatura ambiente e posteriormente foi direcionada novamente à massa de café para efetuar a secagem. A bomba de calor utilizada era constituída de dois evaporadores, quatro compressores, quatro condensadores, quatro válvulas de expansão e quatro filtros. Para cada evaporador e condensador passavam dois circuitos independentes. A Figura 10 apresenta o processo simplificado na bomba de calor.

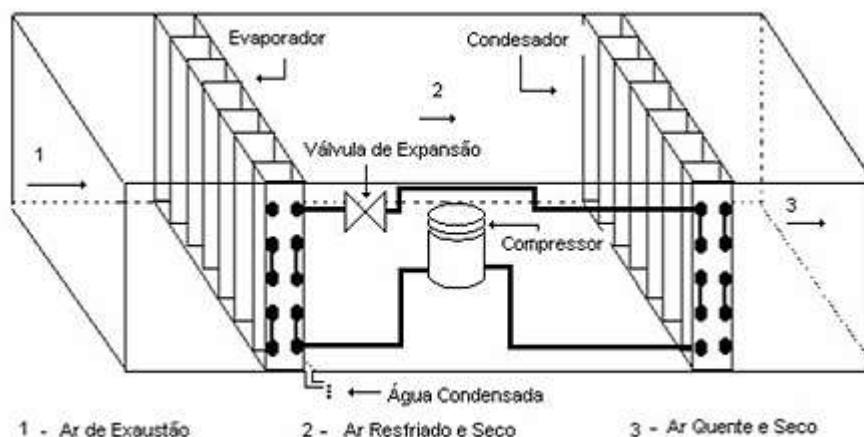


Figura 10 – Esquema simplificado da bomba de calor. Fonte: Santos (2007).

Monte (2008) apresenta a bomba de calor como sendo um dispositivo que utiliza um ventilador para inserir o ar atmosférico no sistema, realizando o seu resfriamento e secagem através da condensação de água presente nessa massa de ar. Um ventilador faz a sucção desse ar através do condensador, onde ele é aquecido, e direcionado à saída da bomba, apresentando um teor de umidade relativa inferior ao de entrada no sistema. A vista superior da bomba de calor utilizada está presente na Figura 11, e a variação de umidade do ar ao longo do interior do dispositivo se encontra na Figura 12.

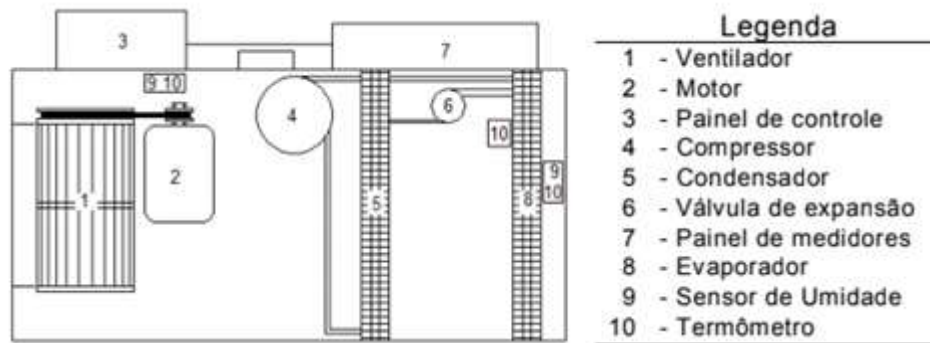


Figura 11 - Planta baixa da bomba de calor experimental. Fonte: Monte (2008).

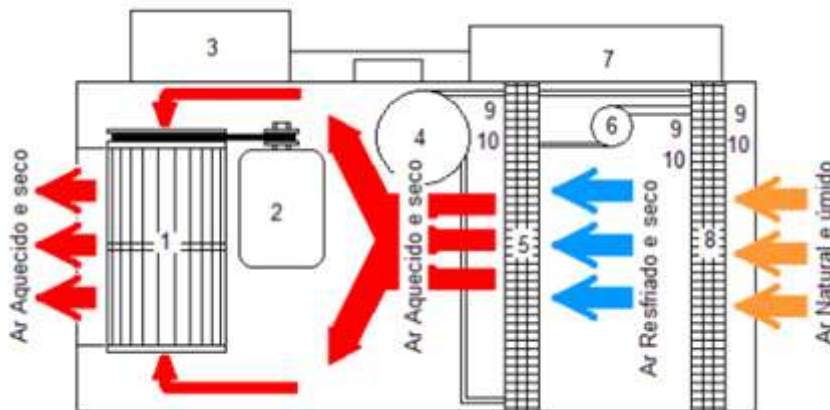


Figura 12 – Trajetória e as suas modificações ao passar pela bomba de calor. Fonte: Monte (2008)

3.3. Umidade de equilíbrio - Chung e Pfof (1967, 1976)

Os grãos de café têm por característica serem higroscópicos, logo, possuem a capacidade de absorver ou perder água na forma de vapor em relação ao ar ambiente. A umidade relativa, dos grãos e do ar, está ligada diretamente à essa movimentação de vapor d'água. À vista disso, quando o sistema se encontra com a pressão de vapor d'água dos grãos (P_{Vgr}) maior que a pressão de vapor d'água do ar ambiente (P_{Var}), ocorre a movimentação do vapor no sentido dos grãos para o ar ambiente e esse fato prova a secagem do produto. Em contrapartida, quando a P_{Var} é maior que a P_{Vgr} , o sentido do vapor se inverte em relação à primeira situação e provoca o umedecimento do produto. No momento em que os valores de P_{Vgr} e P_{Var} são iguais ocorre o equilíbrio higroscópico.

Os modelos matemáticos de Chung e Pfof (1967) e Pfof et al. (1976) modificada podem ser considerados clássicos e figuram entre uma das opções mais utilizadas no entendimento da umidade de equilíbrio dos grãos. Elas são descritas conforme as Equações 1 e 2 e seus parâmetros são definidos por:

U_e = umidade de equilíbrio dos grãos (decimal b.s.)

U_{Re} = umidade relativa de equilíbrio dos grãos (decimal)

a, b, c = constantes relacionadas ao tipo de produto que está sendo estudado.

T = temperatura do ar (°C)

UR = umidade relativa do ar (decimal)

$$U_e = a - b \cdot \{\ln[-(T + c) \cdot \ln(UR)]\} \quad \text{Equação 1}$$

$$U_e = \left(-\frac{1}{b}\right) \cdot \ln\left[(T + c) \cdot \frac{\ln(UR)}{(-a)}\right] \quad \text{Equação 2}$$

Silva et al. (2008a) apresentam que as constantes para calcular o teor de umidade de equilíbrio do café são $a = 0,350$, $b = 0,058$, $c = 50,555$. Utilizadas frequentemente em diferentes pesquisas até os dias de hoje.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Foram usados grãos de café (*Coffea arabica* L.) colhidos pelo Centro de Produção da Universidade Federal de Viçosa (safra 2009/2010).

Esse trabalho foi realizado em parceria com a dissertação de Mestrado, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), do discente José Vitor Nicácio, no ano de 2010, intitulado “Desenvolvimento de um sistema de controle automático para condicionamento de ar de secagem” (NICACIO, 2010). Como o experimento envolveu processo de patente, os resultados não puderam ser divulgados após a sua realização.

Durante o período de armazenamento o produto foi submetido a utilização de uma Unidade de Tratamento de ar (UTA), denominada Bomba de Calor, em um silo de alvenaria, cilíndrico, com dimensão de 1,735 m de diâmetro e 2,75 m de altura, com fundo construído de chapas metálicas perfuradas, com capacidade estática de

2,50 t. Para o sistema de aeração com ar natural foi utilizado um ventilador axial, com motor trifásico de 1,5 kW posicionado na entrada do silo (Figura 13). O sistema de coleta de dados apresenta 7 pontos de amostragem, porém, apenas 6 pontos foram considerados na análise, a medida em que o silo não foi carregado em sua totalidade.

Termopares “tipo T” (AWG 2-24, PVC-PVC) (cobre constantan) foram colocados no interior do silo distantes (verticalmente) entre si de 0,40 m, a fim de monitorar a temperatura da massa de grãos.

Foram realizadas leituras semanais de teor de água, por um período de aproximadamente 40 dias. O experimento avaliou possíveis alterações dos grãos em função do teor de água do produto em pergaminho e descascado.

As Figuras 14 a 17 mostram o protótipo da bomba de calor instalada na área experimental.

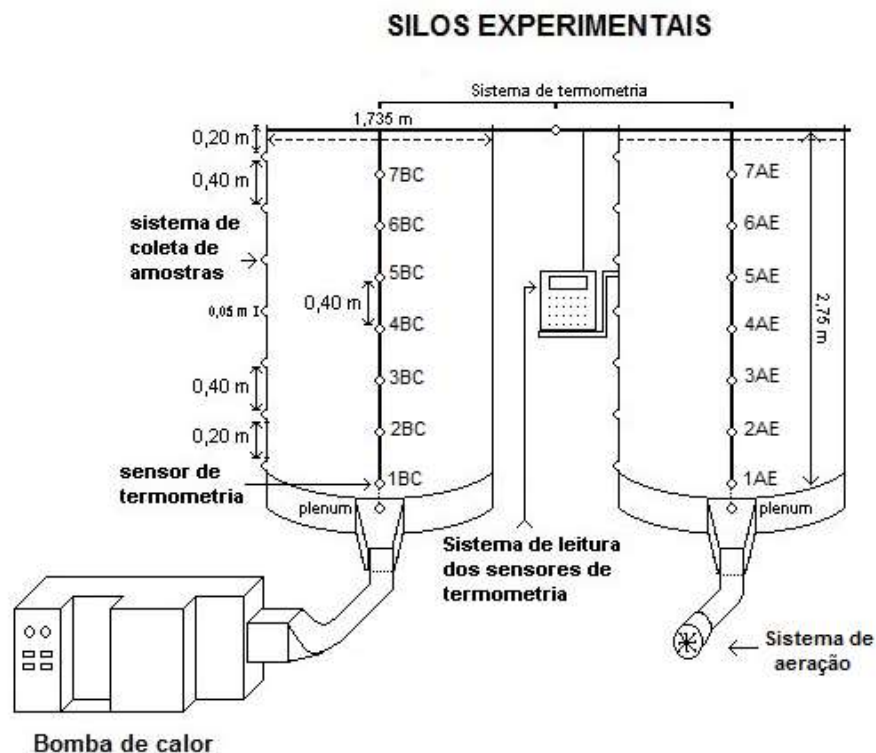


Figura 13 – Croqui com a utilização da bomba de calor (BC) e sistema de aeração (AE) em silo experimental.

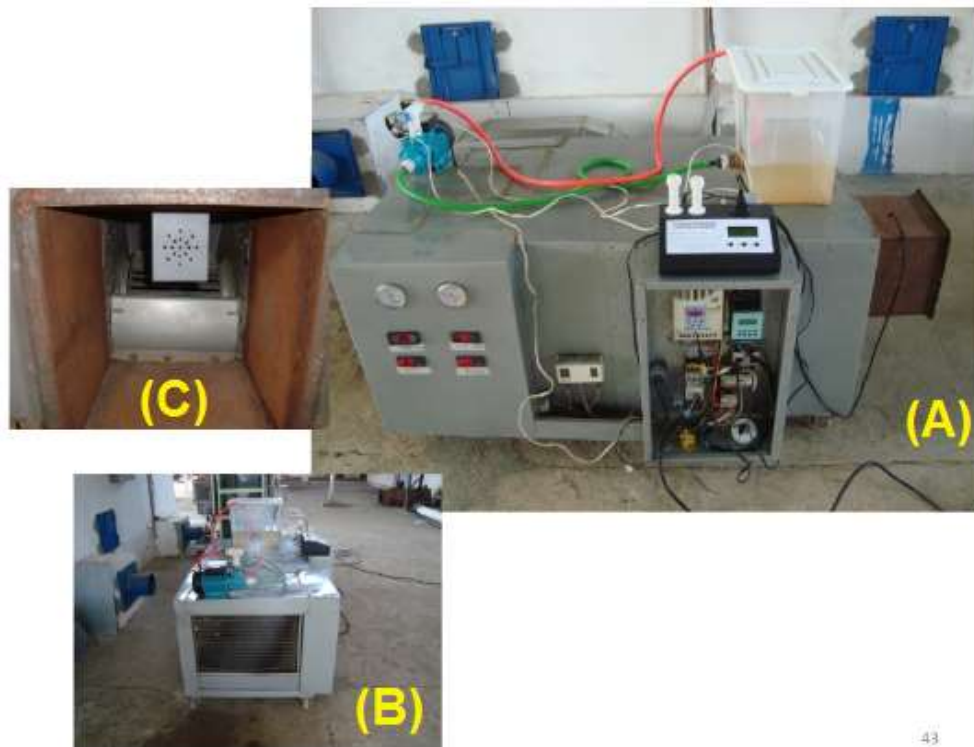


Figura 14 - (a) Vista lateral da bomba de calor com equipamento de controle de temperatura e umidade relativa do ar; (b) Vista da grade da área de circulação do ar interno da bomba de calor; (c) Vista interna da bomba de calor. Fonte: Lacerda Filho, (2010).



Figura 15 – Imagem lateral da bomba de calor, com sistema de controle. Fonte: Lacerda Filho (2010).

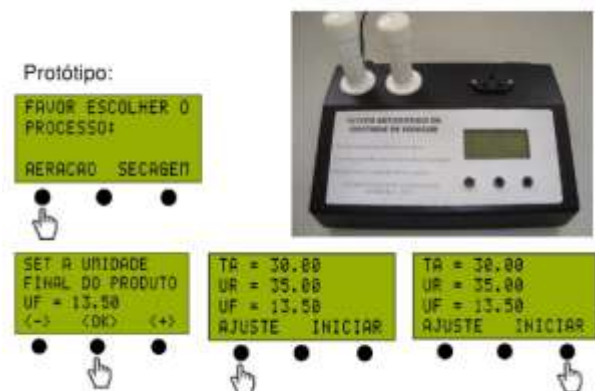


Figura 16 - sistema de controle de seleção de processo (aeração ou secagem), teor de umidade e umidade relativa do ar. Lacerda Filho (2010).



Figura 17 – Bomba de calor conectada ao silo experimental. Fonte: Lacerda Filho (2010).

A bomba de calor foi acionada a partir dos valores adotados para a complementação da secagem, sendo teor final de 12% b.u., temperatura ambiente de 25°C, umidade relativa do ar de 70%. Sensores instalados nos silos de alvenaria, dispostos na parte inferior, meio e superior, enviavam informações para o sistema de controle que, a partir da equação de Chung e Post (1967), introduziam o ar tratado para a massa de grãos de café, em pergaminho, a fim de complementar a secagem.

Esse procedimento proporcionou observar a variação do teor de água dos grãos nas camadas inferiores e superiores do silo.

4.1. Teor de água dos grãos, umidade e temperatura do ar ambiente

Para a coleta dos dados foram adotados grãos de café em pergaminho e grãos descascados.

Foi utilizado o método direto, em estufa com circulação forçada de ar a $103\pm 2^\circ\text{C}$, durante 72 horas, com três repetições, e amostras contendo aproximadamente 30 g, conforme as normas estabelecidas pela “American Association of Cereal Chemists” citado por Lacerda Filho (1986).

A umidade relativa do ar e a temperatura do ar ambiente foi coletada utilizando um termohigrógrafo, substituindo as cartas gráficas semanalmente durante o período de 09 de agosto a 09 de setembro de 2010.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Entre os dias 26/07/2010 e 09/08/2010 ocorreu o carregamento do silo. A utilização da bomba de calor, como complemento do processo de secagem, para os grãos de café em pergaminho, após 7 a 8 dias de acionamento, obteve, em média, uma diferença de 2 pontos percentuais entre a camada inferior e a superior do silo experimental tanto para grãos em pergaminho quanto para grãos descascado (Figuras 18 e 19). As legendas das imagens informam a posição das amostragens, onde 1BC é a representação da camada inferior do silo, sendo elevado até o 6BC que representa a camada superior do silo.

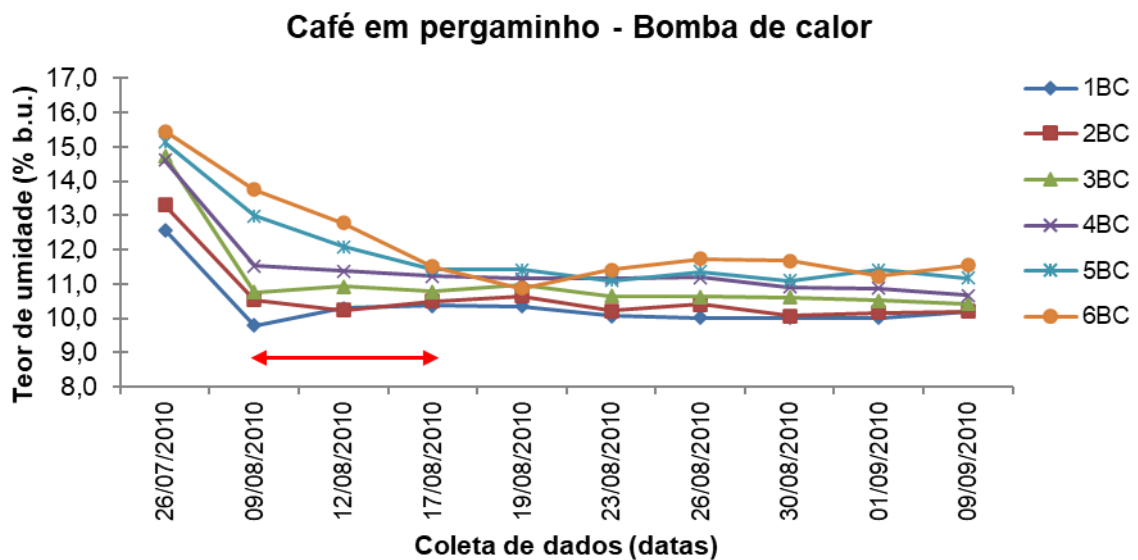


Figura 18 - Figura 18 – Representação gráfica dos valores médios de teor de umidade (% b.u.) dos grãos de café em pergaminho – Bomba de calor.

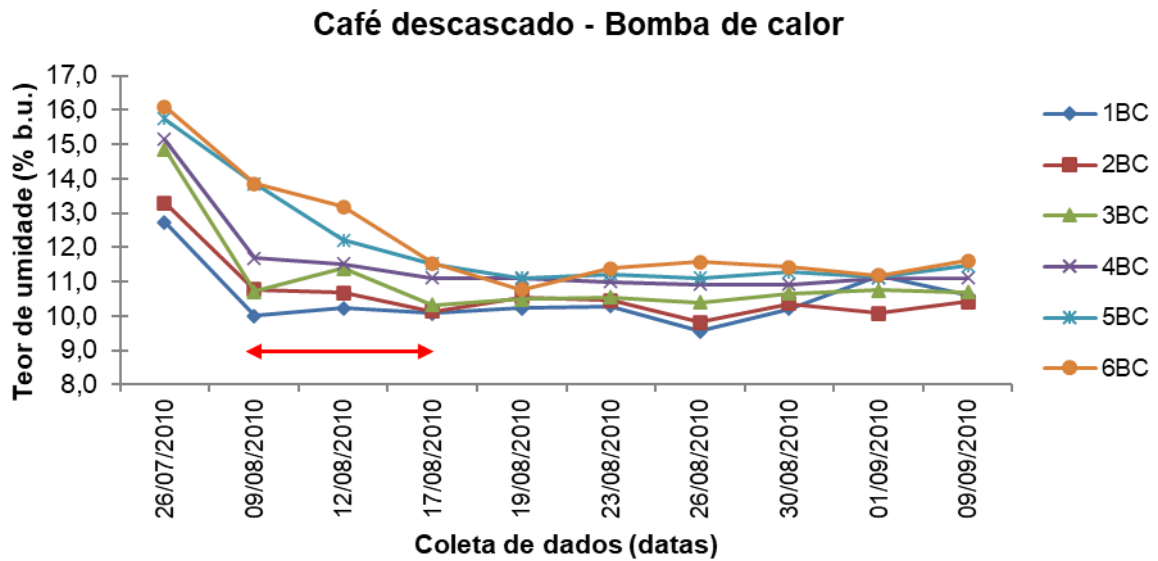


Figura 19 – Representação gráfica dos valores médios de teor de umidade (% b.u.) dos grãos de café descascados - Bomba de calor.

Ao utilizar um ventilador, em um sistema de aeração com ar a temperatura ambiente, somente após 15 dias de acionamento foi possível observar a diferença de 2 pontos percentuais entre a camada inferior e a superior do silo experimental tanto para grãos em pergaminho quanto para grãos descascado (Figuras 20 e 21). Assim como na bomba de calor, a legenda 1AE representa a camada inferior no silo e a 6AE representa a camada superior.

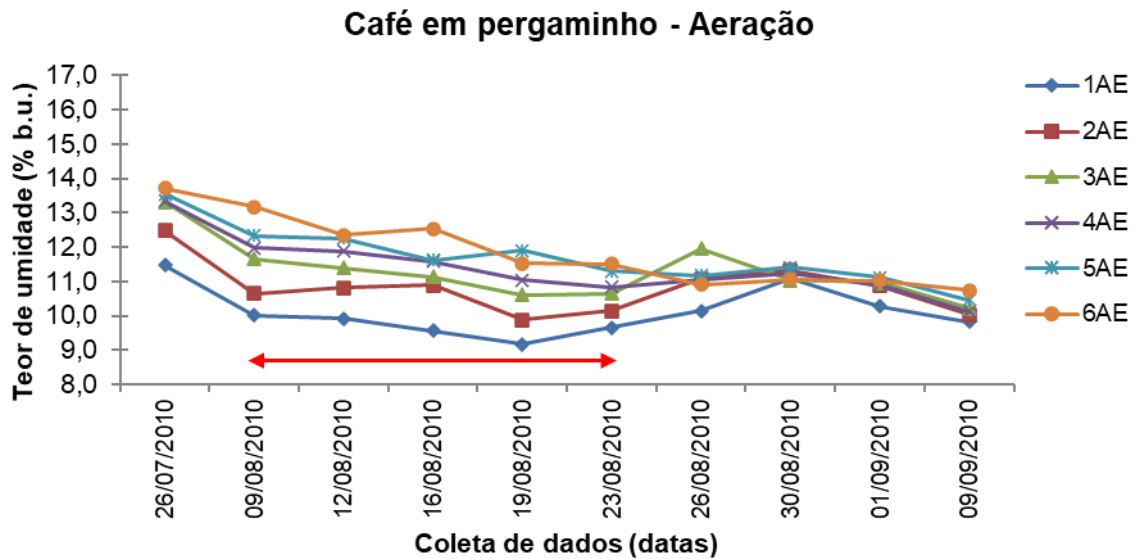


Figura 20 – Representação gráfica dos valores médios de teor de umidade (% b.u.) dos grãos de café em pergaminho – Aeração.

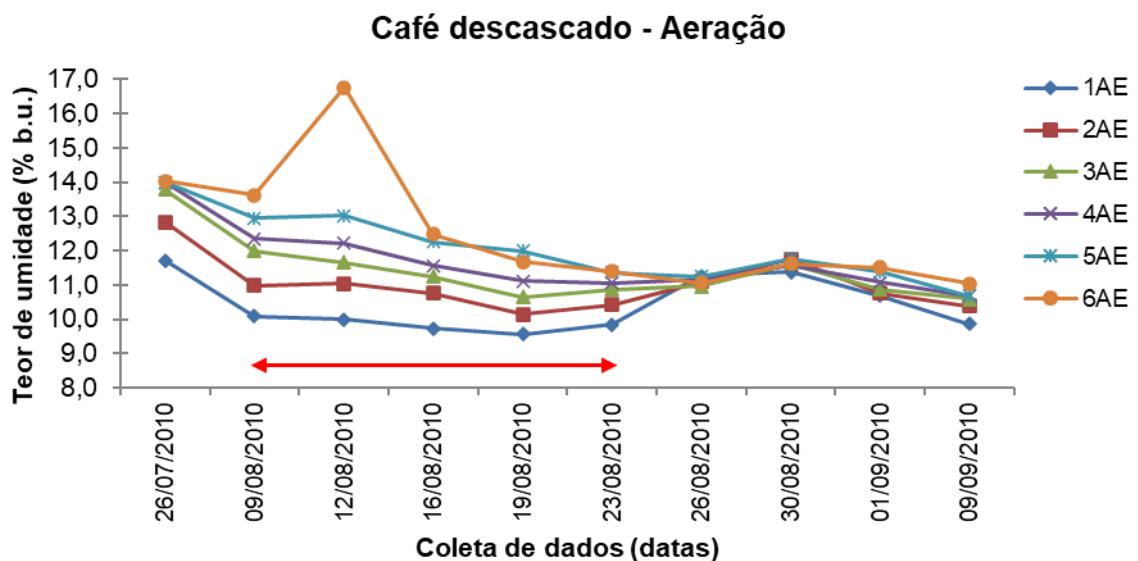


Figura 21 - Representação gráfica dos valores médios de teor de umidade (% b.u.) dos grãos de café descascados – Aeração.

Os valores de temperatura e umidade relativa do ar ambiente (Figura 22) influenciaram diretamente no teor de umidade dos grãos durante o período estudado.

Esse comportamento pode ser confirmado por Nascimento e Queiroz (2011), que estudaram a aeração de milhos secos (11% b. u.) e úmidos (17% b. u.) por três métodos diferentes, a aeração contínua, noturna e em condições de equilíbrio higroscópico entre os grãos e o ar. Observaram que os grãos na camada a 0,11 m do fundo (a mais próxima do fundo) usualmente apresentaram menor teor de água em comparação às camadas superiores. Durante o ensaio com os grãos secos, observou-se que houve o reumedecimento da massa devido à alta umidade relativa e baixa temperatura do ar ambiente. Posteriormente o teor de água foi reduzido até valores inferiores ao inicial, verificando a tendência de redução desse parâmetro nos grãos analisados. No caso dos grãos armazenados úmidos, ocorreu uma redução mais significativa do teor de umidade da massa por conta do aumento da temperatura no interior dos silos, proporcionado pela condição meteorológica do local.

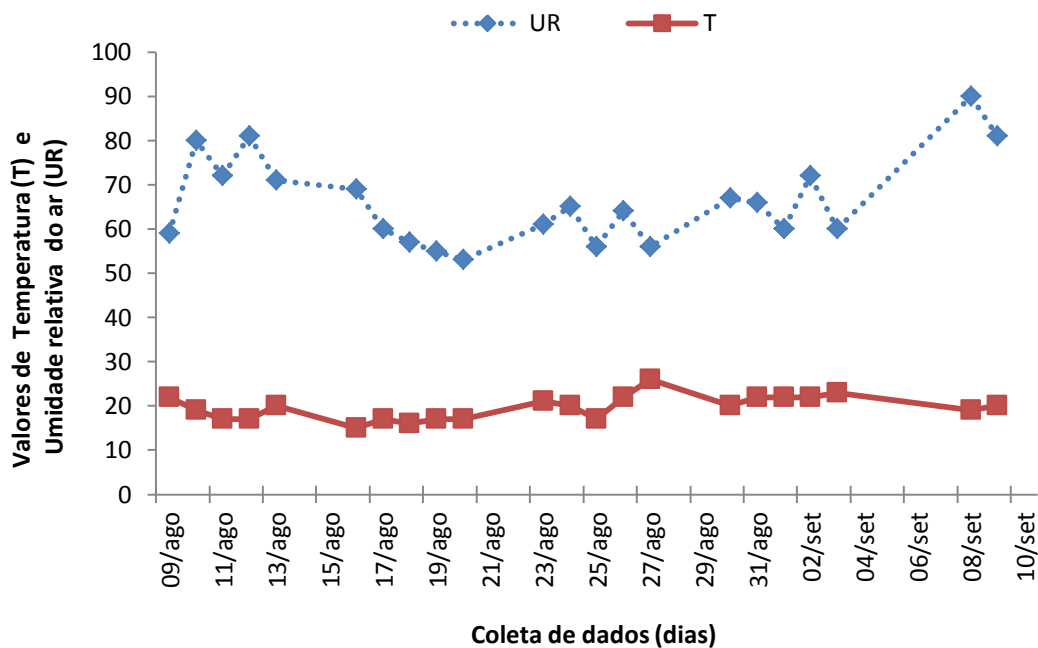


Figura 22 – Representação gráfica dos valores médios de temperatura e umidade relativa do ar ambiente entre 09 de agosto de 09 de setembro de 2010.

Os resultados obtidos no presente estudo podem ser confirmados por Dürks et al. (2019), que observaram o armazenamento dos grãos de soja através de silos com refrigeração artificial e aeração convencional. O primeiro foi ligado durante sete

dias, até a massa de grãos atingir 17,8 °C, e posteriormente, o sistema era ligado a cada 30 dias e funcionava durante 24 horas para a manutenção da temperatura. O segundo, esteve ligado praticamente todos os dias, ou de acordo informações do sistema automatizado de termometria. Nesse método a temperatura média dos grãos manteve-se em 26,7°C. Segundo os autores, as duas formas de armazenamento apresentaram variação do teor de água ao longo do tempo, proporcionando, de modo geral, a redução de umidade no grão durante o período. Observou-se que, no silo aerado com ar natural, a redução do teor de água ocorreu de forma mais homogênea.

Portanto, considerando as condições estabelecidas neste estudo, considera-se que a utilização da bomba de calor como complemento da secagem do café pode proporcionar uma diferença de percentual, em torno de 2 pontos, entre as camadas superior e inferior, em menor tempo quando comparado a adoção de sistemas de aeração utilizando ar a temperatura ambiente.

A redução do tempo que leva à diminuição desse percentual pode vir a contribuir para manutenção da qualidade de grãos. De acordo com Rigueira et al. (2009) o teor de água dos grãos, influenciado diretamente pela umidade relativa do ar e temperatura, são de extrema importância para a manutenção da conservação de grãos e sementes. A respiração é diminuída drasticamente e o metabolismo é amenizado ao mínimo quando o esse teor se aproxima de 11 a 13% de base úmida. Logo é vital o conhecimento da temperatura e a umidade relativa para a armazenagem de grãos, pois conferem indicativos atraentes para a preservação da qualidade dos grãos.

6. CONCLUSÕES

Conclui-se que a utilização da bomba de calor como complemento da secagem do café pode proporcionar uma diferença de percentual, em torno de 2 pontos, entre as camadas superior e inferior, em menor tempo quando comparado a adoção de sistemas de aeração utilizando ar a temperatura ambiente.

A utilização da bomba de calor constitui uma alternativa na complementação da secagem, e para manutenção da qualidade do café tendo em vista que o teor de água dos grãos é influenciado diretamente pela umidade relativa do ar e temperatura, sendo de extrema importância para a conservação de grãos e sementes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMPESSAN, F.; LACERDA FILHO, A. F. de; VOLK, M. B. da S.; RIGUEIRA, R. J. de A. Comparação entre secagens de café cereja descascado em terreiros com diferentes tipos de pavimentação. *Revista Engenharia na Agricultura - REVENG*, Viçosa, MG, v.18, n.5, p. 373-381, out. 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.13083/reveng.v18i5.125>>. Acesso em 03 abr 2021.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. *Drying and storage of grains and oilseeds*. Westport: The AVI Publishing Company, 450 p. 1992.

CHANG, C.S.; STEELE, J.L. Development and evaluation of aeration control strategies for maintaining stored grain quality. *Applied Engineering in Agriculture*, St. Joseph, v.11, n.4, p.577-582, 1995.

CHUNG, D.S.; PFOST, H.B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 10(4): 149-157, 1967.

CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da safra brasileira - Café. Safra 2020 - Quarto levantamento - Dezembro 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cafe>>. Acesso em 28 abr 2021.

DEVILLA, I.A.; COUTO, S.M.; ZOLNIER, S.; SILVA, J.S. Variação da temperatura e umidade de grãos armazenados em silos com aeração. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.8, n.2/3, p.284-291, 2004.

DÜRKS, J. M.; BOTELHO, F. M.; BOTELHO, S. de C. C.; RUFFATO, S.; HOSCHER R. H. Perdas quantitativas e qualitativas em soja armazenada com aeração convencional e resfriamento artificial. *Revista de Ciências Agroambientais*. v.17, n.1, p.31-39, 2019. Disponível em: <<https://periodicos.unemat.br/index.php/rcaa/article/view/2861>>. Acesso em 28 abr 2021.

GROFF, R. Secagem de grãos. *SEED News*. v. 6, n. 2, p. 1-6. Pelotas, 2002.

GONG, Z.X.; DEVAHASTIN, S.; MUJUMDAR, A.S. A two-dimensional finite element model for kiln-drying of refractory concrete. *Drying Technology*, New York, v.13, n.3, p.585-605, 1995.

KHANKARI, K.K.; MOREY, R.V.; PATANKAR, S.V. Mathematical model for moisture diffusion in stored grain due to temperature gradients. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.37, n.5, p.1591-1604, 1994.

LACERDA FILHO, A. F. Avaliação de diferentes sistemas de secagem e suas influências na qualidade do café (*Coffea arábica* L.). Viçosa -MG: UFV, 1986. 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1986.

LACERDA FILHO, A. F. Secagem e resfriamento artificial do café. 2010. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/cafeicultura/ecagem-e-resfriamento-artificial-de-cafe>> Acesso em 01 abr 2021.

LACERDA FILHO, A., F.; SILVA, J. de S e. Secagem de café em secador de fluxos concorrentes. In: SIMPÓSIO DE PESQUISAS DOS CAFÉS DO BRASIL, 2., 2001, Vitória. Anais... Brasília: Embrapa Café, p.1007-1018. 2001.

LACERDA FILHO, A., F.; SILVA, J. S. Secagem de café em combinação. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB, DEAg/UFCG, v.10, n.3, p. 671–678, 2006.

MONTE, J. E. C. Desenvolvimento e análise de um sistema de controle para bomba de calor utilizada em processos agrícolas. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, p. 183. 2008.

NASCIMENTO, V. R. G.; QUEIROZ, M. R. de. Estratégias de aeração de milho armazenado: temperatura e teor de água. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.31, n.4, p.745-759, jul/ago, 2011.

NAVARRO, S.; CALDERON, M. Aeration of grain in subtropical climates. Agricultural Services Bulletin. Rome: FAO, 1982, 119p. n. 52

NICACIO, J. V. Desenvolvimento de um sistema de controle automático para condicionamento de ar de secagem. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, p. 73. 2010.

PFOST, H.B.; MAURER, S.G.; CHUNG, D.S.; MILLIKEN, G.A. Summarizing and reporting equilibrium moisture data for grains. St. Joseph: 1976. 25p. (ASAE Paper 76-3520).

RIGUEIRA, R. J. A.; LACERDA FILHO, A.F.; VOLK, M. B. S. Avaliação da qualidade do feijão armazenado em ambiente refrigerado. Alimentos e Nutrição, v. 20, n. 4, p. 649-655, 2009.

SANTOS, R. R. dos. Análise de sistemas de secagem de café utilizando bomba de calor e gás liquefeito de petróleo – GLP. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, p. 112. 2007.

SAUER, D. B. Storage of cereal grains and their products. St. Paul, American Association of Cereal Chemists Inc.1992. 615p.

SILVA, J. S.; BERBERT, P. A.; RUFATO, S.; AFONSO, A. D. L. Qualidade dos grãos. In: Silva, J. S. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. p.63-107. 2008a.

SILVA, J. S.; AFONSO, A. D. L.; DONZELLES, S. M. L.; NOGUEIRA, R. M. Secagem e secadores. In: Silva, J. S. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. p.109-146. 2008b.

SILVA, J. de S. e; DONZELES, S. M. L.; VITOR, D. G. Construção e Utilização do Terreiro Híbrido para a Secagem do Café. Brasília, Embrapa Café, 2013. p. 8. (Embrapa Café. Comunicado técnico, 2). Disponível em <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/86858/1/Construcao-e-utilizacao.pdf>>. Acesso em: 03 abr 2021.

SILVA, J. S.; LACERDA FILHO, A.F.; DEVILLA, I. A. Aeração de grãos armazenados. In: Silva, J. S. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 2000. p.261–277.

SILVA, J. S.; LACERDA FILHO, A. F.; RUFATO, S.; BERBERT, P. A. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. In: Silva, J. S. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. p.417-499. 2008c

SILVA, B. S.; MARQUES, R. A.; CAIXETA, I. F. Avaliação de secagem de café especial em secador de leito fixo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 43., 2017, Poços de Caldas. Anais... Brasília, DF: Embrapa Café, 2017. (1 CD-ROM), 1 p.

SILVA, L. C. da; MORELI, A. P.; SIQUEIRA, A. J. H. Café: preparo, secagem e armazenamento. In: MARCOLAN, A. L.; ESPÍNDULA, M. C. Café na Amazônia. Brasília, DF: Embrapa, 2015. Cap.16, p. 359-381.

SILVA, J. N. da; SOBRINHO, J. C. Análise energética da secagem de café em secadores horizontal e vertical de fluxos cruzados. In: SIMPÓSIO DE PESQUISAS DOS CAFÉS DO BRASIL, 2., 2001, Vitória. Anais... Brasília: Embrapa Café, 2001. p. 718-723. Disponível em: <<http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/1003>>. Acesso em: 03 abr 2021.

SUN, D. W.; WOODS, J. L. Deep bed simulation of the cooling of stored grain with ambient air: A test bed for ventilation control strategies. *Journal of Stored Products Research*, London, v.33, p.299-312, 1997.

SUN, D. W.; WOODS, J. L. Low temperature moisture transfer characteristics of wheat in thin layers. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, v.37, p.1919-1926, 1994.

SUN, D. W.; BYRNE, C. Selection of EMC/ERH isotherm equations for rapeseed. *Journal Agricultural Engineering Research*, Silsoe, n.69, p.307-315, 1998.