

SVETLANA FIALHO SORIA GALVARRO

**USO DE UM GASEIFICADOR AUTOMATIZADO DE BIOMASSA NA
QUALIDADE DA SECAGEM DE CAFÉ CEREJA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

G182u Galvarro, Svetlana Fialho Soria, 1984-
2013 Uso de um gaseificador automatizado de biomassa na
 qualidade da secagem de café cereja / Svetlana Fialho Soria
 Galvarro. – Viçosa, MG, 2013.
 xiv, 81f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Jadir Nogueira da Silva.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 75-81.

1. Café - Secagem. 2. Biocombustíveis. I. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

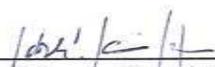
CDD 22.ed. 633.73

SVETLANA FIALHO SORIA GALVARRO

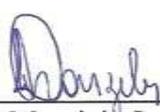
**USO DE UM GASEIFICADOR AUTOMATIZADO DE BIOMASSA NA
QUALIDADE DA SECAGEM DE CAFÉ CEREJA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 16 de julho de 2013.



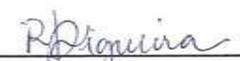
Roberto Precci Lopes
(Coorientador)



Sérgio Mauricio Lopes Donzeles



Paulo Marcos de Barros Monteiro



Roberta Jimenez de Almeida Rigueira



Jadir Nogueira da Silva
(Orientador)

“Um pouco de ciência nos afasta de Deus. Muito, nos aproxima.”
(Louis Pasteur)

DEDICO

A meu pai Alberto, aos meus irmãos

Skarlen, Stephanie e Alan,

E ao meu marido Sergio Baia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida e por ser refúgio em todas as horas.

A minha mãe Dulcineia Fialho (*In memorian*) presente de alguma forma em tudo que faço. A meu pai Alberto, pelo amor, confiança e pelas oportunidades proporcionadas.

Aos meus irmãos Skarlen, Stephanie e Alan, especialmente, a Skarlen pelo constante companheirismo.

Ao meu marido Sergio Baia, pelo amor diário, cumplicidade, compreensão e apoio nos momentos difíceis e à sua família que já se tornou minha também.

A Prof.^a Anita Ferreira pela amizade, carinho, por acreditar em mim e abrir portas que fizeram toda a diferença na minha vida pessoal e profissional.

A minha eterna gratidão ao meu orientador Prof. Jadir Nogueira da Silva pela atenção, torcida, paciência, amizade e confiança no meu trabalho, pelas oportunidades preciosas e por me proporcionar todas as condições, nesses oito anos de trabalho juntos, para que eu me tornasse uma pessoa e uma profissional melhor.

Aos meus coorientadores: prof. Roberto Lopes Precci e José Helvécio Martins pelos conselhos e valiosos ensinamentos repassados.

Aos meus estagiários que tornaram possível a parte experimental deste trabalho, que durante um mês de coleta de dados não mediram esforços, vestiram a camisa deste projeto, trabalhando sábados, domingos e feriados com total dedicação e bom humor. A vocês o meu muito obrigada: Carolina Justino, Thuane Barbosa, Jeniffer Guimarães, Máira Dário, Daniel Gualhano e Lucas Viana.

A Oscar Rezende por sua amizade, companheirismo e pela generosidade com que compartilhou comigo tempo e conhecimento na primeira fase de automação do

gaseificador, o que foi fundamental para realização deste trabalho. E mesmo a distância se fez presente, me ajudando muito através dos inúmeros telefonemas compartilhados.

Aos meus amigos de Pós Graduação que com sua alegria e amizade tornaram a caminhada mais suave: Cissa, Patrícia, Raquel, Romenique, Ivanildo, Gmo Vargas e família, Fernanda Baptestini e Juliana Paes.

A Priscilla Braga que foi uma parceira com sua torcida doce e amizade incondicional, que trouxe mais alegria e força aos meus dias com a luz e a presença diária de sua família linda.

A Roberta Rigueira pela confiança, exemplo de profissionalismo, amizade e por seu olhar e cuidado materno que me acompanharam tão docemente ao longo desses anos.

A Fabio Zanatta e Samuel Martin, pela amizade, generosidade de compartilhar tempo e conhecimento que foi de fundamental importância na minha formação durante os anos de iniciação científica e, conseqüentemente, na condução deste trabalho.

Aos funcionários da área de Armazenamento: Edison, Sr “Catitu”, Zé Eustáquio, pela colaboração diária. Especialmente, ao “Tunico” que não mediu esforços na oficina do DEA para fazer as peças que eu precisava.

À Universidade Federal de Viçosa pelas oportunidades concedidas.

Ao CNPq, FAPEMIG e Capes pelo apoio financeiro, indispensável para realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

Svetlana Fialho SoriaGalvarro, filha de Dulcineia Fialho e José Alberto SoriaGalvarroOntiveros, nasceu em 31 de dezembro de 1984, na cidade de Viçosa, Estado de Minas Gerais.

Em 2003 concluiu o ensino médio pelo Colégio de Aplicação (COLUNI). Graduou-se em Engenharia Agrícola e Ambiental, pela Universidade Federal de Viçosa em julho de 2011. Em agosto de 2011 iniciou o mestrado em Engenharia Agrícola, pela Universidade Federal de Viçosa, na área de concentração em Armazenamento de Produtos Vegetais, concluindo o curso em julho de 2013.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE QUADROS	xi
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
2.1. OBJETIVO GERAL	2
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
3.1. O PROCESSO DE SECAGEM.....	2
3.2. SECAGEM EM CAMADA FIXA	6
3.3. SECAGEM EM TERREIROS.....	8
3.5. AUTOMAÇÃO DO GASEIFICADOR UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA	12
3.6. PROCESSAMENTO E QUALIDADE DO CAFÉ	14
3.6.1. Processamento do café.....	14
3.6.2. Parâmetros qualitativos para avaliação da qualidade do café.....	16
3.6.3. Cor	17
3.6.4. Condutividade Elétrica e Lixiviação de Potássio	18
3.6.5. Classificação da bebida.....	20
3.6.6. Classificação quanto à peneira.....	22
3.6.7. Classificação quanto ao tipo e defeitos do café	23
4. METODOLOGIA.....	24
4.1. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE SECAGEM	25
4.1.1. O Reator de gaseificação	25
4.1.2. Sistema de ventilação no reator de gaseificação.....	26

4.1.3. O gaseificador	26
4.1.4. O sistema de secagem	27
4.1.5. Os sistemas de ventilação para condução do ar de secagem para os silos....	29
4.1.6. Os sistemas de aquisição de dados	30
4.2. TESTES E AVALIAÇÃO DO SISTEMA	31
4.2.1. Testes experimentais	31
4.2.2. A secagem em terreiro	32
4.2.3. Características físicas, químicas e qualitativas do café.	33
4.3. TESTE DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE SECAGEM.....	38
4.4. DETERMINAÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA E DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SECAGEM.....	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
5.1. SISTEMA DE SECAGEM.....	44
5.2. AVALIAÇÃO DO SISTEMA.....	45
5.2.1. TEMPERATURAS DA MASSA DE GRÃOS, DO AR E UMIDADE RELATIVA DO AR	45
5.2.2. QUANTIDADE DE IMPUREZAS	50
5.2.3. MASSA ESPECÍFICA APARENTE	51
5.2.4. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	54
5.2.5. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS QUALITATIVAS.....	57
5.3. DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA	66
5.3.1. AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	66
6. CONCLUSÕES	70
6.1. SISTEMA DE SECAGEM.....	70
6.2. QUALIDADE DO CAFÉ.....	71
6.3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	71
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do Sistema de Lógica Difusa.....	13
Figura 2 - Sólido de Hunter.	18
Figura 3 - Diagrama esquemático do reator do gaseificador e suas dimensões.	25
Figura 4 - (a) Reator de gaseificação construído; (b) Sistema de ventilação acoplado a câmara de combustível dentro do reator do gaseificador.	26
Figura 5 - Reator de gaseificação juntamente com o combustor de gases e câmara de mistura formando o gaseificador.	27
Figura 6 - Corte longitudinal do conjunto gaseificador.....	27
Figura 7 - Gaseificador depois de construído.	27
Figura 8 - Etapas de construção dos silos secadores e do acoplamento dos silos ao gaseificador.....	28
Figura 9 - Bifurcação em Y para distribuição do ar nos silos secadores.....	28
Figura 10 - Silos secadores de alvenaria.....	29
Figura 11 - Sistemas de ventilação para insuflação do ar de secagem nos silos secadores.	29
Figura 12 - Diagrama de operação do gaseificador e da coleta dos dados de temperatura nas zonas de secagem, pirólise, combustão, redução e na chama.	30
Figura 13 - Café cereja nos silos secadores e sistema de aquisição de dados.	31
Figura 14 - Sistema gaseificador-silos construído para secagem de café.....	31
Figura 15 - (a) Secagem em terreiros de concreto; (b) Secagem em terreiros suspensos.	32
Figura 16 - Em primeiro plano terreiro de concreto e ao fundo à esquerda o conjunto de terreiros suspensos.	32
Figura 17 - (a) e (b) Preparação das amostras para leitura da condutividade elétrica; (c) amostras prontas para leitura de condutividade, após permanecerem 24h à 25 °C; (d) Condutímetro utilizado nas análises.	34
Figura 18 - (a) e (b) Preparação das amostras para medir a lixiviação de potássio; (c) e (d) Fotômetro de chama utilizado nas análises.....	35
Figura 19 - Amostra de 100 g de café utilizada e conjunto de peneiras utilizadas na classificação por peneiras.	37
Figura 20 - Preparo das oito repetições para análise da massa de mil grãos.	37

Figura 21 - Leitura dos parâmetros de cor.....	38
Figura 22 - Registro no tubo de condução de ar aquecido para os silos secadores.	39
Figura 23 - Início da produção de chama pelo gaseificador, visualizada através das aberturas laterais presentes no combustor de gases.....	39
Figura 24 - Local de descarga do café seco nos silos.....	40
Figura 25 - (a) Manômetro utilizado para medir a pressão estática na entrada dos silos; (b) Termo higrômetro utilizado para medir a temperatura e umidade de exaustão.....	41
Figura 26 - Sistema de secagem completo.....	44
Figura 27 - Variação da temperatura do ar ambiente durante a secagem do café, um função do tempo, durante o teste 2, referente ao tratamento 1.....	45
Figura 28 - Variação da umidade relativa do ar ambiente durante a secagem do café, em função do tempo, durante o teste 2, referente ao tratamento 1.....	46
Figura 29 - Variações entre as temperaturas médias na massa de grãos e no de secagem no plenum, durante a secagem de café referente ao teste 1 (tratamento 1) no sistema de secagem.....	46
Figura 30 - Variações entre as temperaturas médias na massa de grãos e no ar de secagem no plenum durante a secagem de café referente ao teste 3 (tratamento 1) no sistema de secagem.....	47
Figura 31 - Variação da temperatura de exaustão do ar durante a secagem de café no sistema de secagem.....	47
Figura 32 - Variação da umidade relativa do ar de exaustão durante a secagem de café no sistema proposto.....	48
Figura 33 - Curva de secagem do café para os testes 2 e 4 do tratamento 1.....	48
Figura 34 - Curvas de secagem do café secado nos terreiros suspenso 1 e 2.....	49
Figura 35 - Curvas de secagem do café secado nos terreiros de concreto 1 e 2.....	49

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Parâmetros e especificações do secador, requeridos para avaliação do desempenho.	5
Quadro 2- Classificação oficial do café (Coffea arábica L.) quanto à bebida.	21
Quadro 3 - Escala de qualidade da metodologia SCAA.	21
Quadro 4 - Classificação do café em relação aos pontos obtidos.	22
Quadro 5 - Classificação do café beneficiado do grão cru em função do defeito/tipo. ...	24
Quadro 6 - Classificação por peneiras, de acordo com a Instrução Normativa número 8.	36
Quadro 7 - Teor de impureza para os tratamentos.	50
Quadro 8 - Teor de impureza na massa de frutos de café encontrado nos teses referentes à secagem nos terreiros suspensos e nos de concreto (Testemunhas).	50
Quadro 9 - Teste de média aplicado para os valores de porcentagem de impureza (PI) entre os tratamentos.	51
Quadro 10 - Resultados médios da massa específica aparente do café secado utilizando o sistema (tratamento 1).	52
Quadro 11 - Resultados médios da massa específica aparente do café secado nos terreiros de concreto e suspenso.	52
Quadro 12 - Teste de média aplicado para os valores de massa específica (ME) entre os tratamentos.	53
Quadro 13 - Resultados médios da análise de condutividade elétrica de café seco utilizando o sistema (tratamento 1).	54
Quadro 14 - Resultados médios da análise de condutividade elétrica de café seco no terreiro suspenso e no de concreto (Tratamento 2 e 3).	54
Quadro 15 - Teste de média aplicado para os valores de condutividade elétrica (CE) entre os tratamentos.	55
Quadro 16 - Valores médios da análise de lixiviação de potássio para o café seco utilizando o sistema (tratamento 1).	56
Quadro 17 - Valores médios da análise de lixiviação de potássio para o café seco no terreiro suspenso e no de concreto (Tratamentos 2 e 3).	56
Quadro 18 - Valores médios da análise de lixiviação de potássio para o café seco no terreiro suspenso e no de concreto (Tratamentos 2 e 3).	57

Quadro 19 - Classificação do tipo de bebida de café seco utilizando o sistema (Tratamento 1), de acordo com a nota recebida para o tipo de bebida.	58
Quadro 20 - Classificação do tipo de bebida de café seco nos terreiros suspensos e de concreto (Tratamentos 2 e 3), de acordo com a nota recebida para o tipo de bebida.	58
Quadro 21 - Valores médios para o tipo de café secado utilizando o sistema de secagem (Tratamento 1) e o número de defeitos encontrados.....	59
Quadro 22 - Valores médios para o tipo de café secado em terreiros, suspenso e de concreto, e o número de defeitos encontrados.....	59
Quadro 23 - Teste de média aplicado para os valores de defeito entre os tratamentos. .	60
Quadro 24 - Resultado da classificação por peneiras para o café secado utilizando o sistema (Tratamento 1).	61
Quadro 25 - Resultado da classificação por peneiras para o café secado em terreiro de concreto (Tratamento 3).....	61
Quadro 26 - Resultado da classificação por peneiras para o café secado em terreiro suspenso (Tratamento 2).....	62
Quadro 27 - Valores médios da massa de mil grãos do café secado utilizando o sistema de secagem (Tratamento 1).....	63
Quadro 28 - Valores médios da massa de mil grãos do café secado nos terreiros suspensos e de concreto (Tratamentos 2 e 3).....	63
Quadro 29 - Valores médios dos parâmetros para análises de cor referentes à secagem do café no sistema (Tratamento 1).....	64
Quadro 30 - Valores médios dos parâmetros para as análises de cor referentes à secagem do café no terreiro de concreto (Tratamento 3).....	65
Quadro 31 - Valores médios dos parâmetros para as análises de cor referentes à secagem do café no terreiro suspenso (Tratamento 2).....	65
Quadro 32 - Resultados da análise de eficiência energética da secagem do café no sistema (Tratamento 1).	66
Quadro 33 - Resumo dos resultados da análise de eficiência energética para a secagem de café nos terreiros de concreto.....	70
Quadro 34 - Resumo dos resultados da análise de eficiência energética para a secagem de café no terreiro suspenso.....	70

RESUMO

GALVARRO, Svetlana Fialho Soria, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2013. **Uso de um gaseificador automatizado de biomassa na qualidade da secagem do café cereja.** Orientador: Jadir Nogueira da Silva. Coorientadores: Roberto Precci Lopes e José Helvécio Martins.

Para a manutenção da qualidade do café dentro dos padrões de comercialização, a etapa de pós-colheita precisa ser muito bem conduzida, principalmente, as relacionadas à limpeza, secagem e armazenamento, para que a qualidade não seja perdida durante o armazenamento. Destas etapas, a secagem é de fundamental importância e se mal conduzida pode comprometer a qualidade do produto. Ainda são poucos os estudos sobre a tecnologia da gaseificação, sobretudo na sua aplicação para secagem de grãos. Dessa forma, esta pesquisa visa contribuir para a aplicação do ar aquecido, proveniente de um gaseificador automatizado de biomassa (carvão de eucalipto), na secagem de café. A secagem do café cereja neste trabalho foi realizada em dois silos secadores acoplados a um gaseificador automatizado de biomassa, do qual provém o ar aquecido utilizado durante o processo. Três tratamentos foram determinados para a condução do trabalho, sendo eles: o tratamento 1 consistiu em 8 horas de secagem por dia com revolvimento da massa de grãos em intervalos de 2h e o tratamento 2 consistiu da secagem de café em terreiros suspenso e o tratamento 3 consistiu da secagem em terreiro de concreto. Para avaliar a influência da secagem do café através do sistema foram analisados os seguintes parâmetros: classificação de bebida, condutividade elétrica, lixiviação de potássio, massa de mil grãos. O café secado no sistema foi classificado quanto à bebida como apenas mole, obtendo nota média de 79 pontos. Com base nos resultados foram obtidos os seguintes valores médios: 146,86 $\mu\text{Scm}^{-1}\text{g}^{-1}$ para condutividade elétrica; 34,04 ppm.g⁻¹ para lixiviação de potássio; 160,90 g para o massa de mil grãos. De acordo com os resultados obtidos, o sistema de secagem apresentou-se como uma alternativa aos pequenos produtores de café, pois não houve perda de qualidade na sua bebida e por ser um sistema versátil, uma vez que além do café é possível secar outros grãos. Além disso, a automação do sistema propiciou um controle preciso da temperatura do ar de secagem durante todo o processo, o que é de fundamental importância para uma boa secagem do café.

ABSTRACT

GALVARRO, Svetlana FialhoSoria, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2013. **Use of an automatic biomass gasifier on the quality of drying ripe coffee cherries.** Adviser: Jadir Nogueira da Silva. Co-advisers: Roberto Precci Lopes and José Helvécio Martins

In order to maintain coffee quality within the commercialization standards, the post-harvest stages must be very well conducted, especially those related to cleaning, drying and storing, so that quality is not lost during storage. Among these stages, drying is the most important and if poorly conducted could put the quality of the product at risk. Drying requires clean warm air in order not to contaminate the product. Few studies have been performed on gasification, especially application of this process to drying grains. Therefore, the objective of the present study was to apply heated air generated by an automated biomass gasifier (eucalyptus charcoal) in coffee drying. Drying of the ripe coffee cherry in this study was performed in two drying silos attached to an automated biomass gasifier which generates the heated air used in the process. Two treatments were determined to conduct the study: treatment 1 consisted of 8 hours of drying per day, with revolving the grain mass every 2 hours; and treatment 2 consisted of drying the coffee on a suspended terrace and treatment 3 consisted of drying the coffee on concrete. In order to evaluate the influence of coffee drying in the system proposed, the following parameters were analyzed: beverage classification, electrical conductivity, potassium lixiviation and one thousand grain weight. Coffee dried in the proposed system was classified as a soft beverage, obtaining an average grade of 79 points. Based on the results, the following average values were obtained: $146.86 \mu\text{Scm}^{-1}\text{g}^{-1}$ for the electrical conductivity; 34.04 ppm.g^{-1} for potassium lixiviation; 160.90 g as the one thousand grain weight. Drying performed using the proposed method showed to be viable since the dry coffee obtained presented good qualitative results regarding the specific mass, electrical conductivity, potassium lixiviation, color and other parameters which indicated that there was no risk of final quality loss in the beverage.

1. INTRODUÇÃO

Para a manutenção da qualidade do café dentro dos padrões de comercialização, a etapa de pós-colheita precisa ser muito bem conduzida, principalmente, as relacionadas à limpeza, secagem e armazenamento, para que a qualidade não seja perdida durante o armazenamento. Destas etapas, a secagem é a mais onerosa em termos de energia e se mal conduzida pode comprometer a qualidade do produto.

Todo ano a safra de café produz milhões de toneladas do grão que geralmente é colhido com 60% de teor de água, em base úmida (b.u.), sendo comercializado ou armazenado com teor de água a 12% b.u. Para propiciar essa redução do teor de água, o grão de café necessitou passar com algum tipo de secagem, processo este de fundamental importância para manter a qualidade da bebida do café.

Esse processo de secagem demanda ar quente limpo a fim de não contaminar o produto, sendo uma opção de tecnologia para suprir essa demanda o processo de gaseificação.

O conhecimento da gaseificação vem aumentando nos últimos anos devido à necessidade de tecnologias que propiciem modos eficientes e viáveis de conversão de energia. Todavia, o controle das condições do ar aquecido não é satisfatório em gaseificadores sem automação, uma vez que nos sistemas de gaseificação de biomassa ocorrem flutuações de temperatura nas regiões de redução e pirólise, o que ocasiona oscilação no processo de gaseificação, resultando na variação da produção do gás e, conseqüentemente, na temperatura do ar aquecido.

A automação de um gaseificador de biomassa propicia condições adequadas para o fornecimento de ar aquecido, através do controle da temperatura na zona de combustão do gaseificador. Manter a temperatura desta zona na faixa de 800°C a 1200°C é condição adequada para que ocorra boa gaseificação. O gás resultante da gaseificação a elevadas temperaturas quando em contato com o ar, entra em combustão e libera calor que pode ser utilizado para aquecer o ar de secagem. Este ar pode ser misturado com o ar ambiente na câmara de mistura, a fim de obter ar com temperatura recomendada para secagem de café.

No entanto, ainda são poucos os estudos sobre a tecnologia da gaseificação, sobretudo na sua aplicação para secagem de grãos. Dessa forma, esta pesquisa visa contribuir para a aplicação do ar aquecido, proveniente de um gaseificador automatizado de biomassa (carvão de eucalipto), na secagem de café.

Dessa forma, proporciona-se ao pequeno e médio produtor um equipamento eficiente, viável ambiental, social e economicamente para secagem de café, grão este tão importante para a economia do Brasil e, especialmente, para uma região produtora de café como a Zona da Mata Mineira. Para isso, este trabalho tem os objetivos citados a seguir.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a qualidade do café cereja seco em camada fixa, utilizando como fonte de energia a biomassa de carvão vegetal (eucalipto) para aquecimento do ar, por meio de um gaseificador automatizado.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar um sistema de secagem com base em um gaseificador de biomassa para secagem de café cereja;
- Testar o sistema de secagem por meio de realização de experimentos de secagem e comparação dos parâmetros qualitativos do café, em relação ao produto seco em terreiro de concreto e terreiro suspenso;
- Determinar a eficiência energética do sistema proposto para secagem de café em comparação com outros sistemas.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. O PROCESSO DE SECAGEM

A secagem de produtos agrícolas é um processo simultâneo de transferência de energia entre o produto e o ar de secagem, levando à remoção do excesso de água contido no grão por meio da evaporação, geralmente causada por convecção forçada de ar aquecido, permitindo a manutenção de sua qualidade durante o armazenamento. A água é retirada lentamente para que não ocorram fermentações durante o processo de secagem. Por isso, a escolha adequada do método de processamento e secagem vai depender de cada região a ser aplicada (BROOKER et al., 1978 apud BORÉM, 2008).

A secagem, por ser a principal etapa do processamento do café, para obtenção de produto de boa qualidade, deve receber uma maior atenção. É nessa etapa que o café

estará mais sujeito às fermentações indesejáveis e deteriorações, pois o fruto geralmente é colhido com teor de água entre 30 a 65% (BOREM, 2004).

A secagem é o processo mais econômico para a manutenção da qualidade de grãos agrícolas. O conteúdo de água final desejado é aquele correspondente ao valor máximo com o qual o produto pode ser armazenado por períodos predeterminados, à temperatura ambiente, sem que ocorra deterioração e/ou redução de qualidade (BARROS et al., 1994 apud SOBRINHO et al., 2003).

No Brasil, segundo os aspectos tecnológicos envolvidos, utilizam-se basicamente três métodos para secagem de café, de acordo com Silva (1999):

- Secagem em terreiros: espalha-se o produto em pisos, que podem ser de cimento, tijolo, chão batido ou asfalto;
- Secagem em secadores: força-se o ar aquecido a passar através da massa de grãos; e
- Secagem em combinação: faz-se uma pré-secagem em terreiro ou pré-secadores e a secagem complementar em secadores ou em silos secadores com ar natural ou levemente aquecido (até 10°C acima da temperatura ambiente).

Ambientes que possibilitam secagens rápidas, seja em terreiros ou em secadores mecânicos, dificultam os processos de fermentação, já que o intervalo de tempo menor para o processo de secagem, geralmente, dificulta o desenvolvimento de microrganismos. A secagem mais rápida proporciona, então, a manutenção das qualidades sensorial original dos grãos. Em contrapartida, quando o tempo de secagem é reduzido em função de elevados aumentos na temperatura do ar de secagem, pode-se comprometer o poder germinativo de sementes e promover o cozimento parcial do produto, alterando suas características físicas e químicas (SILVA, 1999).

LACERDA (1986) afirmou que a temperatura do ar de secagem não deve ultrapassar 75°C, uma vez que temperaturas iguais ou superiores a esta podem conferir ao produto uma qualidade inferior de bebida, se comparada àquela obtida com o café seco às temperaturas de 40, 45, 50 e 55°C.

A temperatura do ar é o parâmetro de maior flexibilidade num sistema de secagem em alta temperatura, influenciando significativamente a taxa e a eficiência de secagem, bem como a qualidade do produto e, se não for controlada, provoca danos físicos, como descoloração dos grãos, quebras e trincas (GUIDA & VILELA, 1996;

OCTAVIANI, 2000; AFONSO JÚNIOR, 2001; OLIVEIRA et al., 2001; RIBEIRO, 2003; CORADI, 2006).

OLIVEIRA et al. (2001), citado por CORADI (2006), estudando o efeito de diferentes graus de maturação (boia, cereja e mistura) e diferentes temperaturas de secagem (45 °C, 50 °C e 55 °C) na qualidade do café arábica, concluíram que as temperaturas de 45 °C e 50 °C tiveram os melhores resultados para a classificação por tipo. O teor ideal de água indicado para a finalização da secagem é 12,5%.

Segundo ISQUIERDO et al. (2009), a temperatura do ar, a temperatura da massa de grãos e o fluxo de ar, são parâmetros importantes que devem ser observados durante a secagem sendo que temperaturas e fluxos de ar elevados propiciam maior velocidade de secagem e, portanto, contribuem para a economia de energia.

Essencialmente, podem ser considerados dois métodos de secagem: natural e artificial (HALL, 1980; LASSERAN, 1979). A secagem natural ocorre na planta pela ação do sol e do vento, a capacidade de secagem e a qualidade do produto seco dependem das condições climáticas (BOLDUC, 1978).

A secagem artificial consiste em utilizar de artifícios técnicos com o objetivo de remover parte da água que os grãos possuem depois do amadurecimento fisiológico (TOLEDO & MARCOS FILHO, 1977, LASSERAN, 1979). O teor de água desejado é aquele correspondente ao valor máximo com o qual o produto pode ser armazenado durante períodos pré-determinados, à temperatura ambiente, sem que ocorram alterações nas características dos produtos como oxidação dos glucídios, fermentações intracelulares e desenvolvimento de bactérias ou fungos, geralmente acompanhados de aquecimento do grão (TOLEDO & MARCOS FILHO, 1977, LACERDA FILHO, 1986; SOUZA, 2000; REINATO et al., 2003; CORADI, 2006).

A secagem artificial em terreiro, além de requerer tempo relativamente longo, apresenta outras desvantagens, como: a utilização de grandes áreas nobres para sua construção, excessiva mão de obra e, muitas vezes, exposição do produto a condições climáticas adversas, o que pode favorecer o desenvolvimento de fungos e o processo de fermentação, que depreciam a qualidade do café (ROSSI & ROA, 1980, LACERDA FILHO, 1986; CAMPOS, 1998; PALACIN, 2007).

BAKKER-ARKEMA et al. (1978) propuseram uma metodologia para a avaliação do desempenho de secadores. Esta metodologia (Quadro 1) é baseada em um número reduzido de testes de campo, em determinadas condições padronizadas.

Quadro 1- Parâmetros e especificações do secador, requeridos para avaliação do desempenho.

Parâmetros	Unidade
Parâmetros dos grãos	
• tipo de grão	-
• teores de umidade inicial e final	% b.u.
• temperaturas inicial e final	°C
• percentagens de impurezas inicial e final	%
• massas específicas globais inicial e final	kg.m ⁻³
• massa do produto úmido	kg
• índices de qualidade	-
Parâmetros do ar	
• temperatura do ar de secagem	°C
• temperatura de bulbo seco do ar ambiente	°C
• umidade relativa do ar ambiente	%
Especificações do secador	
• densidade do fluxo de ar	m ³ .min ⁻¹ .m ⁻²
• volume total	m ³
• tempo de secagem	h
• tempo de resfriamento	h
• espessura da coluna de secagem	m
• pressão estática	mm.c.a.
• tempo de carregamento	min
• tempo de descarga	min
Uso de energia	
• ventilador e transportadores	kWh.lote ⁻¹
• tipo de combustível e quantidade utilizada por lote	kg
Dados do desempenho	
• duração do teste	h
• volume do produto úmido	m ³
• pontos percentuais de umidade removida	% b.u.
• capacidade de secagem	m ³ .h ⁻¹ de produto úmido
• capacidade de secagem	m ³ .h ⁻¹ de produto seco
• eficiência energética de secagem, excluindo a energia elétrica	kJ.kg ⁻¹ de água evaporada
• eficiência energética de secagem, incluindo a energia elétrica	kJ.kg ⁻¹ de água evaporada

A secagem de café apresenta algumas características que o distinguem de outros grãos (VILELA, 2002):

- a) alto teor de água inicial (cereja em torno de 60 a 70% b.u.);
- b) mistura heterogênea - grãos com diferentes teores de água (20 a 70%), cujas proporções variam durante a colheita;
- c) estrutura complexa do fruto - camadas de diferentes tecidos e teores de água, com polpa e mucilagem muito úmidas (em torno de 85%), e, logo após, um tecido celulósico duro (pergaminho) que encobre uma semente com 50% de teor de água;
- d) redução de volume durante a secagem (30 a 40%); e
- e) tamanho desuniforme dos frutos.

Grãos com teor de água inicial elevada devem ser secados utilizando fluxo de ar abaixas temperaturas (40 a 60°C), para que seja possível a migração de água do interior para a superfície. Caso contrário, a incidência de quebras e o trincamento dos grãos são elevados. O emprego de temperaturas de secagem elevadas provoca secagem rápida e intensa da superfície do grão, ocasionando endurecimento superficial, que dificulta a evaporação da umidade contida no seu interior (BIAGI et al., 1992).

3.2. SECAGEM EM CAMADA FIXA

A secagem pode ser feita em secadores de leito fixo que são de fácil construção, baixo custo e acessível a pequenos produtores, sendo bastante versáteis, uma vez que esse tipo de secador pode ser utilizado para os diferentes tipos de café (coco ou despulpado e cereja) e também para grãos como soja e milho (LACERDA, 1986).

A secagem de café em camada fixa é um método relativamente simples, cujo custo inicial de implantação está ao alcance de grande parte dos pequenos e médios produtores de café (SILVA e LACERDA FILHO, 1993).

O método consiste em depositar o café na câmara de secagem sobre uma chapa perfurada, cuja altura do produto pode variar de 0,15 a 0,50 m. De acordo com BROOKER et al. (1992), no processo de secagem em camada fixa, o ar de secagem move-se do fundo para o topo da camada de grãos. Trocas de água do grão para o ar tomam lugar em uma camada definida de grãos, conhecida como frente de secagem. No início do processo, a frente de secagem localiza-se na parte inferior da camada. À medida que a secagem prossegue, a frente move-se para cima, e, quando esta passa por toda a camada, toda massa é seca até atingir o teor de água final desejado.

A secagem de café em camada fixa, em substituição aos terreiros, no início do processo, apresentou-se como alternativa econômica, não só por impedir que o produto fique exposto às condições adversas de clima, mas também, por realizar a secagem em menor intervalo de tempo, tanto em pré-secagem, combinando com outro sistema, quanto para a secagem completa dos frutos (LACERDA FILHO & SILVA, 2006).

O terreiro secador, ou "terreiro híbrido" (sistema de camada fixa), é um sistema em leito fixo, construído de alvenaria, tendo um duto central de distribuição de ar. É equipado com um gerador de calor, em que o ar é aquecido de forma direta ou indireta. Utiliza combustíveis sólidos (carvão ou lenha) ou gasosos (GLP – gás liquefeito de petróleo, ou GN – gás natural) para fornecer a energia complementar ao ar de secagem (SILVA et al., 2001). Nesse sistema, o produto é enleirado sobre os dutos de

distribuição de ar, sendo revolvido em intervalos regulares de 3 horas (SILVA et al., 2001; SILVA & LACERDA FILHO, 2006). Esse sistema reduz o tempo de secagem de 20 dias (tempo médio de secagem em terreiro convencional na Zona da Mata mineira) para 2 a 4 dias. Um terreiro secador de 64 m² equivale a um terreiro convencional de, aproximadamente, 650 m² (SILVA et al., 2001).

A secagem de café cereja descascado, em “terreiro híbrido” teve consumo específico de energia de 13.700 e 12.939 kJ·kg⁻¹ de água evaporada, para reduzir o teor de água do produto de 37,5 ± 0,5 % (b.u.) até 11,7 ± 0,5 % (b.u.), para as temperaturas do ar de secagem de 60 e 40°C, respectivamente. Para esta mesma redução de teor de água, a secagem em terreiro de cimento necessitou, de 18.046 kJ·kg⁻¹ de água evaporada, em valor médio. Quando o produto utilizado foi café cereja, o consumo específico de energia foi de 8,0 e 10,3 MJ·kg⁻¹ de água evaporada, para reduzir o teor de água do produto de 57,0 ± 0,5 % (b.u.) para 12,3 ± 0,3 % (b.u.), para as temperaturas do ar de secagem de 60 e 40°C, respectivamente. Para esta mesma redução de teor de água, a secagem em terreiro de cimento necessitou de 10,1 MJ·kg⁻¹ de água evaporada (DONZELES, 2002).

LACERDA FILHO (1986), trabalhando com secagem de café cereja em secador de leito fixo, obteve um consumo específico de energia de 7,0 MJ·kg⁻¹ de água evaporada para reduzir de 66,6 para 13% (b.u.). Verificou que não houve comprometimento da qualidade da bebida, sendo esta superior à do produto secado em terreiro construído com qualquer tipo de piso.

Deve-se realizar o revolvimento do produto em intervalos de tempo pré-determinados, a fim de uniformizar o teor de água e a temperatura. Tal operação é feita por um operador que revolve o produto utilizando-se de uma pá (VILELA, 1997; SILVA et al., 1995).

O revolvimento da massa de grãos no secador de camada fixa em intervalos regulares de tempo é recomendado para evitar os problemas que tais secadores apresentam quanto aos gradientes de temperatura e de teor de água do produto ao longo da camada no sentido do fluxo do ar de secagem. Porém, tal operação requer grande esforço físico por parte do operador, principalmente no início da secagem, quando o produto encontra-se ainda com alto teor de água. Para boa parte dos agricultores, o revolvimento manual do produto tem trazido problemas no que se refere à contratação

de mão-de-obra, visto que o operador, normalmente, não se dispõe a executar esta tarefa (DE GRANDI, 2009).

De acordo com NELLIST & BRUCE (1992), o procedimento para o teste de um secador de camada fixa pode ser resumido da seguinte maneira:

- a) carregar o secador e registrar sua capacidade;
- b) fixar a temperatura de secagem;
- c) iniciar a operação de secagem de acordo com os procedimentos recomendados;
- d) fazer os ajustes iniciais, fixar as condições de secagem e iniciara obtenção dos dados;
- e) durante o período de teste, manter regular as leituras dos sensores, perfazendo um mínimo de 12 leituras; e
- f) ao atingir a água pré-determinada, proceder ao resfriamento dos grãos, fazer a operação de descarga e determinar a massa de produto final.

3.3. SECAGEM EM TERREIROS

Na secagem em terreiros, o produto úmido é exposto ao sol em superfícies planas para aquecimento e remoção da água. É uma técnica simples e tradicional que, em condições favoráveis e com manejo correto, propicia um produto de qualidade. Entretanto, quando o produtor dispõe somente de terreiros para realizar a secagem completa do café, são necessárias grandes áreas, uso intensivo de mão-de-obra e maior tempo de secagem, expondo o produto às variações climáticas que elevam os riscos de ocorrerem contaminações e fermentações, reduzindo a qualidade final do produto (BORÉM, 2008).

O tempo médio para secagem completa do café em terreiro é variável e depende das características do produto, do tipo de terreiro, do manejo empregado, bem como das condições climáticas de cada região, variando de 15 a 20 dias para os cafés processados por via seca, podendo chegar até 30 dias em regiões com condições desfavoráveis e de 8 a 12 dias para os cafés processados por via úmida (BORÉM, 2008).

A secagem em terreiro, além de requerer um tempo relativamente longo para realização do processo, apresenta outras desvantagens como a necessidade de grandes áreas para a construção dos terreiros, excessiva mão de- obra e, muitas vezes, o produto fica exposto a condições climáticas adversas, favorecendo o desenvolvimento de fungos

e o processo de fermentação, que depreciam sua qualidade (CAMPOS, 1998; CORDEIRO, 1982; CORRÊA, 1982).

Apesar dos problemas citados, a secagem em terreiros é ainda muito utilizada, principalmente por pequenos e médios produtores, que não possuem poder aquisitivo para implantação de um sistema de secagem artificial ou são, em sua maioria, resistentes às inovações tecnológicas, devido ao baixo nível educacional em que normalmente se encontram (ROSSI e ROA 1980). Para tais produtores, LACERDA FILHO (1986) afirma que os secadores de leito fixo são os mais acessíveis, pois, além de se tratar de um método de secagem relativamente simples, possui custo inicial de implantação relativamente baixo.

PIMENTA (2003) cita que as regiões com alta incidência de água relativa do ar nos períodos de pré-colheita, na colheita e secagem no terreiro, em geral observam-se bebidas de pior qualidade devido à ocorrência de deterioração, que é favorecida nestas condições climáticas e, conseqüentemente, maior presença de defeitos no café.

De acordo com ANDRADE et al. (2003) o terreiro de concreto apresentou a maior taxa de redução de água e menor tempo de secagem comparativamente aos terreiros de chão batido, lama asfáltica e leito suspenso, durante a secagem dos cafés cereja natural, cereja desmucilado e boia.

O terreiro de terra ainda é frequentemente encontrado na maioria das pequenas propriedades cafeeiras e em regiões menos desenvolvidas, e seu uso está relacionado ao baixo custo de construção, pois envolve, basicamente, a limpeza do terreno e a movimentação de terra.

Esse tipo de terreiro não é recomendado para a secagem do café, pois pode produzir com frequência cafés de baixa qualidade que não atendem às exigências relacionadas aos aspectos higiênico-sanitários que integram as boas práticas de processamento (BORÉM, 2008). A secagem deve ser realizada, preferencialmente, em terreiros de concreto, pois, em comparação com os terreiros de terra, favorecem a secagem mais rápida e a obtenção de cafés de melhor qualidade (REINATO, 2006), podendo, portanto ser considerado o melhor (VILELA, 1997).

3.4. O PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO

Por meio da conversão termoquímica de energia, a biomassa pode ser utilizada via três diferentes processos: gaseificação, pirólise e combustão direta, sendo a gaseificação um dos processos mais eficientes (PUROHIT, 2009).

A gaseificação é um processo termoquímico que converte um insumo sólido ou líquido em um gás com características basicamente combustíveis, por meio de sua oxidação parcial a temperaturas intermediárias, isto é, temperaturas acima das recomendadas nos processos de pirólise rápida e abaixo das recomendadas nos de combustão (LORA et al. 2009).

A pesquisa em gaseificação foi impulsionada pela existência de amplas reservas de carvão nos principais países consumidores de energia: Estados Unidos, China e ex-União Soviética. Associadas a novas tecnologias, estas devem ser suficientes para suprir energeticamente os consumidores por centenas de anos (DESCAMPS *et al.*, 2008).

A tecnologia da gaseificação de biomassas pode trazer benefícios como desenvolvimento econômico regional e social, se incorporada no processo de produção agrícola. Por se tratar de uma tecnologia de fácil aplicação e que utiliza biomassa, pode ser facilmente implantada no meio rural. Favorece ainda a independência energética, uma vez que por meio da gaseificação pode-se gerar energia elétrica e mecânica, proporcionando não dependência das unidades geradoras (LORA et al. 2009).

As reações da gaseificação da biomassa ocorrem no interior de reatores, divididos, geralmente, em quatro regiões: secagem, pirólise, oxidação (combustão) e redução; o gás produzido se constitui de CO, H₂, CH₄, (que são combustíveis), CO₂, e N₂. Na secagem a temperatura é inferior a 200°C, suficiente para a evaporação da água presente na matéria prima, mas não para que ocorra a sua decomposição (LORA et al. 2009).

Na região de pirólise, entre a de secagem e a de oxidação, inicia-se o processo de decomposição térmica da biomassa. As reações químicas são exotérmicas, sendo que a temperatura varia de 280°C a 450°C, provocando a decomposição dos carboidratos e a produção de alcatrão e ácidos leves (MARTIN, 2005).

Na região de oxidação, a temperatura varia de 800°C a 1.200°C, dependendo do tipo de combustível, resultado da reação exotérmica entre o carbono da matéria-prima e o O₂. O gás quente da zona de oxidação passa, em seguida, à zona de redução, acima ou abaixo, dependendo do tipo de gaseificador. Nessa região, deficiente em O₂, ocorre à formação dos componentes combustíveis do gás (MARTIN, 2005).

A eficiência da conversão termoquímica da biomassa depende do material utilizado, tamanho e forma das partículas, vazão do gás, tipos de reatores, entre outros fatores. Em linhas gerais, os gaseificadores podem ser classificados com base na direção do fluxo dos gases: concorrente, contracorrente, fluxo cruzado, e leito fluidizado (SHARMA, 2009).

A gaseificação apresenta uma série de vantagens em comparação com a combustão direta (LORA et al., 1997), destacando-se, entre elas:

- Queima dos gases produzidos gera energia limpa, relativamente livre de odores e fumaças, que não requer equipamentos controladores de poluição nem trocadores de calor;
- Geração de eletricidade em pequena escala pode ser realizada sem a necessidade de um ciclo a vapor, utilizando o gás produto da gaseificação num motor de combustão interna;
- Possibilidade de combustão do gás em fornos e fornalhas de geradores de vapor, projetados originalmente para combustíveis líquidos e gasosos derivados de petróleo, sem grandes modificações no equipamento;
- Diminuição da dependência de regiões e países das flutuações nos preços de combustíveis importados.

Porém, a gaseificação tem algumas desvantagens técnicas que devem ser levadas em consideração:

- A tecnologia é complexa que a queima direta e deve-se ter especial atenção com aspectos de segurança;
- Instalação dos gaseificadores deve ser feita em locais livres da presença de gás e que apresentem boa ventilação.
- Considerar a redução de eficiência do sistema de gaseificação, que ocorre devido à perda de calor e ao consumo de energia nos ventiladores;
- Instalações de pequena escala têm má reputação por apresentarem falhas frequentes. A maioria dos problemas ocorre no manuseio do combustível e na limpeza dos gases.

SILVA et al. (2000) acrescenta ainda as seguintes desvantagens:

- A biomassa deveser limpa, sem a presença de elementos que possam comprometer o processo de gaseificação;
- O tamanho da biomassa deveser adequado ao gaseificador, devendo ser cortada anteriormente;

- Existe o risco de vitrificação de cinzas que poderá alterar o desempenho do gaseificador quando se usa a biomassa com alto teor de cinzas, ou temperaturas inadequadas; e
- Se o processo de gaseificação não for bem conduzido, o alcatrão formado durante o processo de gaseificação poderá gerar monóxido de carbono (CO).

Vários projetos com o uso do processo de gaseificação estão sendo feitos e foram realizados anteriormente, dentre eles cita-se:

SILVA et al. (2000), Martin et al. (2006) e Vieira (2005) testaram gaseificadores de biomassa de fluxo concorrente, acoplados a um combustor do gás, com o objetivo de produzir ar para o aquecimento de produtos agrícolas e para outros fins.

SANTOS et al.(2010) elaboraram um sistema composto por um reator de gaseificação do tipo contracorrente e por uma câmara de combustão do gás produzido, ambos envolvidos em uma estrutura de alvenaria, cujo principal objetivo foi aproveitar o calor dissipado no reator e na câmara de combustão. Concluiu-se que o dispositivo atendeu as expectativas, pois disponibilizou ar quente limpo, com boa eficiência térmica, próprio para uso em secagem de produtos agrícolas, ou para outros fins, como o aquecimento de ambientes para criação de animais.

ZANATA (2011) desenvolveu e testou um gaseificador automatizado de biomassa, de fluxo contracorrente, acoplado a uma câmara de combustão dos gases produzidos, visando à geração de ar quente e limpo para o aquecimento de aviários e secagem de produtos agrícolas. O autor concluiu que o sistema desenvolvido atendeu aos objetivos pretendidos e que a concentração média de CO no ar quente de exaustão permite sua utilização em aplicações diretas, desde que sejam respeitados os limites máximos de concentração desse elemento na atividade a ser implementada.

3.5. AUTOMAÇÃO DO GASEIFICADOR UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA

Muitos sistemas são complexos para modelagem com precisão, até mesmo com equações matemáticas sofisticadas, mas os termos linguísticos da Lógica difusa (*FuzzyLogic*) oferecem uma metodologia útil para definir características operacionais desses sistemas. (WEBER & KLEIN, 2003)

Segundo REZENDE (2012), a escolha do Sistema de Lógica Difusa (*FuzzyLogic System*) se justifica pelo fato de ele se comportar como uma estratégia de controle que nasce da experiência de especialistas e de dados experimentais, sem a necessidade da tradicional modelagem matemática. O Sistema de Lógica Difusa (SLD) (Figura 1) é uma técnica utilizada para resolver problemas em diversas áreas do conhecimento,

apropria-se dos conceitos da lógica difusa (*fuzzylogic*) para modelar processos mediante os conhecimentos subjetivos de especialistas, o que conduz a uma abordagem diferente da dos métodos convencionais de controle de processos desenvolvidos pela modelagem matemática.

O SLD está estruturado em quatro componentes básicos: difusificador (*fuzzyfier*), regras, máquina de inferência e desdifusificador (*defuzzyfier*), conforme mostrado na Figura 1

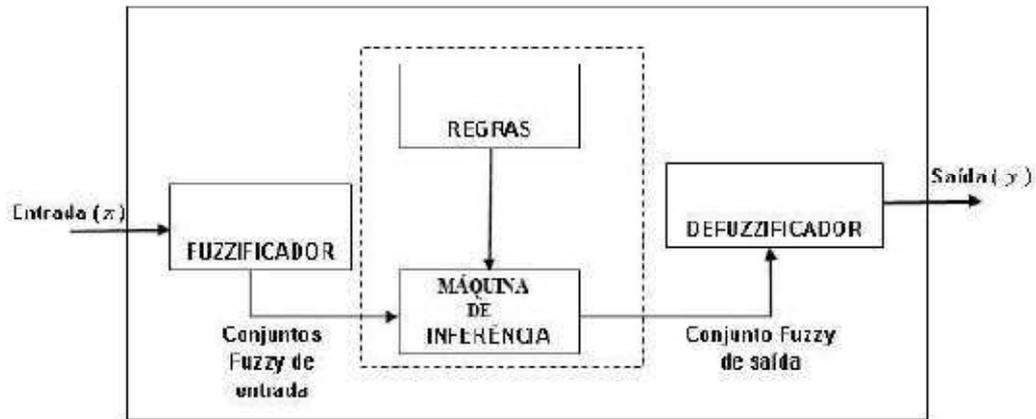


Figura 1 - Esquema do Sistema de Lógica Difusa.

O Sistema de Lógica Difusa pode ser interpretado como um mapeamento de entrada e saída representado pelo modelo matemático $y = f(x)$, em que o valor de y é obtido pela transformação de x , que é operado pela função f , ao percorrer as linhas cheias (Figura 1), sendo que x representa as variáveis lingüísticas de entrada, f é uma função constituída das operações executadas nos componentes básicos – difusificador (*fuzzyfier*), regras, máquina de inferência e desdifusificador (*defuzzyfier*) – e y são as variáveis numéricas de saída, que executam as ações demandadas pelo sistema (REZENDE, 2012).

De acordo com REZENDE (2012), resumidamente, cada um dos componentes do SLD é descrito a seguir.

a) Difusificador (Fuzzificador)

No fuzzificador as variáveis lingüísticas de entrada são associadas aos conjuntos fuzzy pertinentes com os respectivos domínios.

b) Regras

As regras são consideradas o “núcleo” do controlador fuzzy. Fornecidas por especialistas ou extraídas de dados numéricos, são expressas como uma coleção de sentenças lógicas do tipo Se Então.... Por exemplo, se a temperatura é alta, então aumente a velocidade do ventilador.

c) Máquina de inferência

A máquina de inferência é o componente em que ocorrem as operações com os conjuntos fuzzy, as relações e composições fuzzy. Há combinação dos antecedentes com os conseqüentes das regras para gerar o conjunto fuzzy de saída.

d) Desdifusificador (Defuzzificador)

O defuzzificador interpreta as informações geradas no conjunto fuzzy de saída, dando origem às ações demandadas pelo sistema, e permite representar um conjunto fuzzy por um valor numérico.

3.6. PROCESSAMENTO E QUALIDADE DO CAFÉ

3.6.1. Processamento do café

A colheita do café pode ser do tipo seletiva, colhendo-se apenas os frutos maduros, ou do tipo concentrada, derriçando-se todos os frutos. No Brasil, a colheita é feita predominantemente por derriça, ou seja, colhendo-se uma mistura de frutos de diferentes características com relação à maturação, cor, densidade e teor de água (MALTA, 2008). Assim, nesse tipo de colheita encontram-se misturados frutos verdes, verdes-amarelados, cerejas, passas e secos na planta. A presença de frutos verdes tem sido responsável por sérios prejuízos na qualidade do produto final (PIMENTA, 2003).

A colheita do tipo seletiva é um sistema pouco utilizado no Brasil, sendo predominante em outros países, principalmente, onde se utiliza o despulpamento, sendo o exemplo típico do que ocorrem na Colômbia, América Central, Etiópia e Quênia (MALTA, 2008). Tem sido intensivamente demonstrado que as melhores qualidades de bebidas de café são obtidas quando se processa o café cereja. Isso se explica pelo fato de ser esse estágio a fase correspondente ao ponto ideal de maturação dos frutos, no qual a casca, polpa e semente apresentam composição química adequada a proporcionar ao fruto seu máximo de qualidade (CARVALHO,1997).

A escolha do método de processamento do café é decisiva na rentabilidade da atividade cafeeira e depende de fatores como a relação custo/benefício, a necessidade de

atendimento à legislação ambiental e o padrão. Existem dois métodos de processamento para o café: a via seca e a via úmida. No processamento via seca os frutos são submetidos à secagem intactos, sem remoção do exocarpo. No processamento via úmida podem ser produzidos: os cafés cereja descascado, resultado da remoção mecânica da casca e, parcialmente, da mucilagem do fruto; os cafés cereja despulpados, originados de frutos descascados mecanicamente com a mucilagem remanescente removida por fermentação; e os cafés cereja desmucilados resultado da remoção mecânica tanto da casca quanto da mucilagem (BORÉM, 2008).

O processo via seca é o que menos afeta as condições naturais do café, pois os frutos são processados com todas as partes e origina o café em coco ou café natural. Além disso, é o processo que menos agride o meio ambiente porque produzem poucos resíduos sólidos e líquidos e utiliza menos água (BORÉM, 2008).

Na forma de processamento natural, o fruto é secado na sua forma integral (com casca e mucilagem). Ele poderá ir diretamente da lavoura para o terreiro, onde será submetido ao processo de secagem. No entanto, trata-se de uma forma de processamento com grandes riscos à qualidade, pois seus grãos são secados com diferentes estádios de maturação, diferentes teores de água, podendo ocorrer frutos com diversas anormalidades. A passagem desse café pelo lavador apresenta inúmeras vantagens. A separação hidráulica dos frutos por diferença de densidade permite a obtenção de duas parcelas de café: cereja e verde e a porção boia. A parcela de frutos cereja e verde constitui um material com potencial para a produção de café de melhor qualidade, devendo ser conduzida separadamente, até o beneficiamento e comercialização (GARRUTI et al., 1961; SOUZA, 2000; TEIXEIRA; GÓMEZ, 1970).

Nesse preparo, todo o café vindo da colheita na lavoura é lavado e então são separados os cafés boias dos cafés cereja e verde. Os grãos boias seguem para o processo de secagem em terreiro, enquanto os grãos cereja e verde seguem para um equipamento chamado descascador de cerejas, que consiste numa grade separadora rotatória, em que os grãos verdes não sofrem nenhuma alteração, sendo apenas separadas dos grãos cerejas; no mesmo processo, são retiradas as cascas e separados os grãos, que seguem por processos diferentes de secagem, beneficiamento e armazenamento (OLIVEIRA et al., 2011).

O processamento via úmida com despulpamento mecanizado e a retirada total ou parcial da mucilagem vem sendo utilizado no Brasil como forma de diversificação do produto final e alternativa para contornar alguns problemas climáticos e de infra-

estrutura das propriedades cafeeiras, além da busca ao atendimento de mercados específicos (SANTOS 2005). A utilização do processo por via úmida favorece a secagem, tendo em vista o menor volume processado, o menor tempo de secagem e a redução do consumo de energia (REINATO, 2003; BORÉM, 2004; CORADI, 2006).

3.6.2. Parâmetros qualitativos para avaliação da qualidade do café

Aprimorar e buscar constantemente técnicas que propiciem a manutenção da qualidade, em todas as etapas do processamento do café, é de fundamental importância, devido ao elevado valor agregado desse produto. Segundo EMBRAPA CAFÉ (2012) a atividade envolve meio bilhão de pessoas, da produção ao consumo final. Nesse mercado gigantesco estão centrados os interesses da cadeia produtiva do café brasileiro, que contribuiu com mais de 30% da produção mundial nas últimas safras, gerando mais de 8 milhões de empregos diretos e indiretos no país, sendo o setor do agronegócio brasileiro que mais emprega no Brasil.

Num ambiente de competitividade, a busca pela melhoria da qualidade neste setor se faz necessária para ampliar o consumo no mercado brasileiro bem como as exportações de café no âmbito internacional. Dados da Organização Internacional do Café (OIC) relatam que o consumo brasileiro de café subiu 49% em 10 anos (CARVALHO NEWS, 2010) e, apesar de ser o maior produtor de café e o segundo em consumo da bebida (ABIC, 2009), o Brasil não obtém a maior lucratividade com o produto, consequência da colheita não seletiva e da comercialização sem valor agregado. Mesmo que nas exportações o café beneficiado grão cru (produção primária) ainda corresponde ao percentual de 95% (MAPA, 2010).

De acordo com BORÉM (2004), para obter cafés com boa qualidade, vários fatores são importantes, tais como: composição química do grão, determinada por fatores genéticos e ambientais; o processamento e conservação do grão, no qual intervém a ação do teor de água e da temperatura, evitando infecções microbianas indesejáveis; a torração e preparo da infusão, que modificam a constituição química do grão e que resultam no sabor e aroma percebidos no momento da degustação (ALPIZAR; BERTRAND, 2004; BORÉM, 2008; CHAGAS; MALTA; PEREIRA, 2005; FARAH et al., 2006; LELOUP et al., 2004).

Para THOMAZIELLO et al. (1999) o café tem sua qualidade determinada por duas fases distintas: classificação por tipo ou defeito e a classificação por qualidade. A classificação do café quanto ao tipo consiste em determinar o número de grãos

imperfeitos ou a quantidade de impurezas contida em uma amostra de 300g (SILVA & BERBERT et al.,1999).

Os atuais procedimentos para avaliação do café comercial, isto é, o café depois de colhido, preparado, seco, beneficiado e ensacado, que recebe a denominação de “café verde”, baseia-se, principalmente, em uma série de apreciações subjetivas feitas por especialistas. As avaliações são baseadas nas características físicas como forma, tamanho, cor, uniformidade dos grãos e tipo de bebida. A cor, por estar diretamente relacionada com a bebida, tem grau de importância superior ao tamanho e é a característica que mais chama atenção durante a comercialização (MONTEIRO, 2002).

3.6.3. Cor

MAZZAFERA et al. (1984) afirmaram ser a descoloração dos grãos de café forte indicativo de que os processos oxidativos endógenos ocorreram ou estão ocorrendo em altas taxas, acompanhadas da queda de qualidade da bebida, provocada por alterações dos constituintes que contribuem para o aroma e sabor da mesma. Outros pesquisadores, também, observaram a existência de relação entre a perda de cor dos grãos e a redução da qualidade da bebida do café (MELO et al., 1980; OLIVEIRA, 1995; LEITE et al., 1998).

Estudos realizados por AMORIM (1978) atribuem à alteração de cor dos grãos de café à desestruturação das membranas celulares, que podem ser causadas por fatores externos, como temperatura, umidade relativa do ar e injúrias. A modificação das estruturas destas membranas gera a perda de seletividade e compartilhamento, fazendo com que os componentes separados por estas estruturas entrem em contato com enzimas hidrolíticas e oxidativas, podendo afetar a cor, a massa específica, a acidez dos grãos e a qualidade da bebida.

Segundo AMORIM et al. (1976), a coloração do grão de café, geralmente, está relacionada com a qualidade da bebida e é um fator importante na valorização do produto. Alterações na cor indicam processos oxidativos e transformações bioquímicas de natureza enzimática, que irão influenciar negativamente o sabor e aroma da bebida.

Considerando a cor como um atributo de qualidade do café, a multiplicidade de termos subjetivos e a diversidade de condições de iluminação sob as quais os grãos são classificados tornam-se necessárias à quantificação desse atributo em escalas conhecidas e aceitas internacionalmente, capazes de distinguir e determinar as diferentes cores e suas variações (BORÉM, 2008).

Várias escalas de cores foram desenvolvidas a partir de um sistema padrão para medida da cor estabelecida pela *Commission Internationale d'Eclairage* (CIE), todas matematicamente conversíveis e criadas para simular a resposta humana aos estímulos das cores. Para trabalhos de rotina, especialmente nas indústrias, os colorímetrostristímulos têm sido muito utilizados em função da rapidez de obtenção de resultados.

Hunter, citado por LOZANO (1978), desenvolveu um colorímetro composto por fotocélulas e filtros cuidadosamente selecionados, separados em três circuitos e que fornece parâmetros na escala L, a, b (Figura 2).

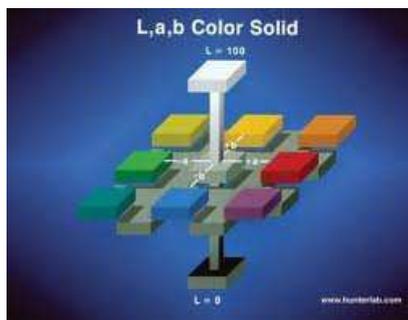


Figura 2 - Sólido de Hunter.

O termo L (luminosidade) está relacionado com a grandeza Y do sistema CIE e valor do sistema Munsell. O termo a se refere à tonalidade vermelha, se positivo, ou verde, se negativo. O termo b é mensurável em relação às tonalidades, amarela, se positivo e azul, se negativo. Juntos a e b apresentam resultados equivalentes aos 20 obtidos com matiz e saturação do sistema Munsell de cor (RIGUEIRA, 2005).

Segundo FRANCIS (1980), essas variáveis relacionadas à cor não são independentes e, portanto, dificilmente poderão ser interpretadas separadamente.

3.6.4. Condutividade Elétrica e Lixiviação de Potássio

Os testes de condutividade elétrica e lixiviação de potássio têm se apresentado como indicadores consistentes da integridade da membrana (AMORIM, 1978; PRETE, 1992). Estas análises têm tido uma correlação bastante positiva em relação à qualidade do café. A perda da seletividade da membrana celular está associada a diversos fatores, entre eles os danos sofridos pelo café durante as etapas de processamento e secagem. A lixiviação de potássio, na maioria das pesquisas tem demonstrado ser um teste

complementar ao da condutividade elétrica (AMORIM, 1978; BORÉM; REINATO; PEREIRA, 2003; PRETE, 1992; RIBEIRO et al., 2003).

A condutividade elétrica e a lixiviação de íons de potássio são parâmetros que servem como indicativo de qualidade do café e mostram uma estreita relação com a integridade da parede celular dos grãos (PIMENTA, 2003). O íon de potássio, presente na membrana do grão de café, quando lixiviado, influencia na medida da condutividade elétrica. Assim, quanto maior a injúria sofrida pelo grão, uma maior quantidade de íons de potássio é translocada para o meio líquido (CARVALHO JÚNIOR, 2002), indicando, assim, alterações nas membranas celulares com uma maior perda de potássio pelas células lesionadas (PIMENTA, 2003). Segundo PRETE (1992), esses parâmetros sofrem influência marcante dos defeitos grãos pretos, verdes, ardidos e brocados, que apresentam degradação das membranas celulares.

MALTA et al. (2005), analisando os fatores que afetam a determinação da condutividade elétrica e lixiviação de potássio na determinação da qualidade da bebida do café, concluíram que a presença de grão defeituosos influencia os valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio, podendo fornecer interpretações inadequadas quanto à qualidade do café analisado.

O teste de lixiviação de potássio, assim como o de condutividade elétrica, indica possíveis danos ao sistema de membranas celular (AMORIM, 1978; PRETE, 1992). MALTA et al. (2005) e REINATO et al. (2007) relatam que os maiores valores de lixiviação de potássio correspondem a uma menor integridade na membrana celular, ocasionada por processos deteriorativos ocorridos durante a secagem, causando alterações indesejáveis durante o armazenamento. A secagem do café, se mal conduzida, pode intensificar a degradação de membranas celulares, o que pode ser indicada com consistência pelos testes de lixiviação de potássio e condutividade elétrica (AMORIM, 1978; PRETE, 1992).

Os grãos com membranas mal estruturadas, desorganizadas e danificadas lixiviam maior quantidade de solutos, apresentando maiores valores de condutividade elétrica e lixiviação de potássio (KRZYZANOWSKY; FRANÇA NETO; HENNING, 1991), indicando perda da qualidade (PIMENTA; COSTA; CHAGAS, 2000; PRETE, 1992). BORÉM et al.(2008) e Marques et al. (2008) mostraram maiores danos no sistema de membranas celulares dos grãos com o aumento da temperatura de secagem.

3.6.5. Classificação da bebida

A análise sensorial apresenta algumas desvantagens, como a possível falha de precisão dos dados, causadas pela avaliação do homem. No entanto, existem formas de minimizar algumas dessas desvantagens a fim de se obter uma análise precisa e confiável do produto em questão (DELLA LUCIA, 2006). No Brasil, a classificação da bebida do café é definida sensorialmente, de acordo com o aroma e o sabor, através da prova de xícara, sendo realizada por provadores treinados que distinguem diferentes padrões sensoriais de bebida (BRASIL, 2003).

Entretanto, a *Brazil Specialty Coffee Association* (BSCA) propõe uma metodologia que avalia os atributos de bebida limpa, doçura, acidez, corpo, sabor, gosto remanescente, balanço e aspecto geral e atribui notas de 0 a 8, de acordo com a intensidade que essas características se apresentaram nas amostras, sendo, por esse motivo, considerada mais objetiva que a “prova de xícara” convencional. Cada amostra recebe uma pontuação pré-estabelecida de 36 pontos, aos quais são incorporadas as notas de cada atributo avaliado, sendo que a somatória das notas corresponde à classificação final da bebida. A amostra que apresenta pontuação superior a 80 é classificada como café especial (BSCA, 2008).

Para conhecer a qualidade da bebida do café, realiza-se a prova da xícara, pela qual o provador avalia os atributos sabor e aroma. A classificação da bebida tem dois objetivos fundamentais: conhecer a qualidade do café a ser comercializado e definir as ligas (ou *blends*) que valorizem determinados lotes de café. São influenciadas pela presença de grãos verdes, verdes pretos, pretos e, ou ardidos ou, ainda, pela ocorrência de fermentações nos grãos durante a fase de colheita ou preparo (BÁRTHOLO & GUIMARÃES, 1997).

No Quadro 2, está apresentada a classificação oficial do café (*Coffea arabica L.*) quanto à bebida.

Quadro 2- Classificação oficial do café (*Coffea arábica* L.) quanto à bebida.

Classificação	Características
Estritamente Mole	Café que apresenta, em conjunto, todos os requisitos de aroma e sabor "mole", porém mais acentuado.
Mole	Café que apresenta aroma e sabor agradável, brando e adocicado.
Apenas Mole	Café que apresenta sabor levemente doce e suave, mas sem adstringência ou aspereza de paladar.
Duro	Café que apresenta sabor acre, adstringente e áspero, porém não apresenta paladares estranhos.
Riado	Café que apresenta leve sabor típico de iodofórmio.
Rio	Café que apresenta sabor típico e acentuado de iodofórmio.
Rio Zona	Café que apresenta aroma e sabor muito acentuado, assemelhado ao iodofórmio ou ao ácido fênico, sendo repugnante ao paladar.

Fonte: MAPA, 2003.

A classificação da bebida para cafés especiais, definida pelo método da Associação Americana de Cafés Especiais (SCAA – *SpecialtyCoffeeAssociationofAmerica*), é baseada em dez atributos (LINGLE, 2001): fragrância e aroma, uniformidade, defeitos, doçura, sabor, acidez, corpo, finalização, equilíbrio e avaliação final. As notas são estabelecidas a partir de uma escala que representa níveis de qualidade, como descrito no Quadro 3 a seguir.

Quadro 3 - Escala de qualidade da metodologia SCAA.

Escala de Qualidade	
Nota	Descrição
6 a 6,75	Bom
7 a 7,75	Muito Bom
8 a 8,75	Excelente
9 a 9,75	Excepcional

Fonte: CACCER, 2005.

Quadro 4 - Classificação do café em relação aos pontos obtidos.

Pontuação	Descrição	Classificação
Total	Especial	
95 – 100	Exemplar	Super Prêmio de Especialidade
90 – 94	Excepcional	Prêmio de Especialidade
85 – 89	Excelente	Especialidade
80 – 84	Muito Bom	Especial
75 – 79	Bom	Qualidade Boa Normal
70 – 74	Fraco	Qualidade Média
60 – 70		Nota Exchange
50 – 60		Comercial
40 – 50		Nota Baixa
< 40		Sem Nota

3.6.6. Classificação quanto à peneira

O café, depois de colhido, processado e beneficiado, passa por avaliações baseadas nas características físicas de tamanho, formato, coloração e uniformidade dos grãos e qualidade de bebida, sendo classificado por peneira, bebida, coloração e tipo, para fins de comercialização (BRASIL, 2003). A classificação por peneira é determinada de acordo com o formato e o tamanho dos grãos de café. Conforme o formato, os grãos de café são classificados em chato e moca (BRASIL, 2003).

A classificação por peneiras objetiva avaliar a homogeneidade dos grãos com relação ao tamanho, pois a qualidade da torração depende, dentre outros fatores, dessa homogeneidade. A ocorrência de grãos de café de diferentes tamanhos num mesmo lote pode proporcionar uma torração rápida e desuniforme, principalmente, dos grãos de peneiras menores, os quais são rapidamente queimados, promovendo sabor e aroma desagradáveis à bebida do café (MATIELLO, 2004).

Assim, a separação dos grãos de café pelo tamanho proporciona melhor qualidade do produto final, permitindo maior uniformidade na torra (NASSER; CHALFOUN, 2000) e maior uniformidade dos grãos quanto à coloração e presença de defeitos (NASSER et al., 2001). Além disso, os cafés que apresentam maior peneira, associados a outros fatores de indicação de boa qualidade, geralmente apresentam maior valor de mercado (LAVIOLA, 2006).

3.6.7. Classificação quanto ao tipo e defeitos do café

A classificação do café quanto ao tipo consiste na determinação do número de grãos imperfeitos ou na quantidade de impurezas contidas em uma amostra de 300g. Esta classificação apresenta sete tipos de valores decrescentes, de dois a oito. A cada tipo corresponde o maior ou menor número de defeitos existentes no café, como grãos pretos, ardidos, verdes, preto-verdes, quebrados, brocados, conchas, chochos, cocos e marinheiros, e impurezas como cascas, paus, torrões e pedras (RIGUEIRA, 2005).

O tipo quatro é chamado tipo “base”, por ter sido, no passado o café mais frequentemente comercializado no Porto de Santos (SP), sendo, assim, considerado como padrão na fixação de preço. Na Instrução Normativa, consta na tabela de classificação, uma coluna de “pontos” onde é lida o número de pontos atribuídos aos tipos e aos intermediários.

Entre um tipo e outro há uma diferença de 50 pontos, subdivididos de cinco em cinco positivos e crescentes, do tipo quatro para o tipo dois e crescentes negativamente do tipo quatro para o tipo oito (TEIXEIRA, 1999). Por exemplo, um café 5-20: o número à esquerda corresponde ao tipo e à direita o valor que, somado a um valor “base”, diz respeito ao quanto o produto será depreciado comercialmente, tendo em vista a observação do número de defeitos contidos na tabela de classificação prevista pela Instrução Normativa (RIGUEIRA, 2005).

Segundo SILVA (2006), a quantidade de defeitos contribui significativamente para depreciar a qualidade da bebida. Grãos com defeitos representam cerca de 20% da produção brasileira de café e, normalmente, não são comercializados no mercado internacional, sendo, portanto, separados antes da comercialização (DELIZA, 2005). Apesar da importância desses defeitos na qualidade final da bebida, poucos estudos têm sido realizados correlacionando a presença dos referidos defeitos com as características físicas e químicas dos grãos (FRANCA, 2005).

No Quadro 5 a seguir, a classificação do café beneficiado cru.

Quadro 5 - Classificação do café beneficiado do grão cru em função do defeito/tipo.

Defeitos	Tipos	Pontos	Defeitos	Tipos	Pontos
4	2	+ 100	46	5	- 50
4	2 - 5	+ 95	49	5 - 5	- 55
5	2 - 10	+ 90	53	5 - 10	- 60
6	2 - 15	+ 85	57	5 - 15	- 65
7	2 - 20	+ 80	61	5 - 20	- 70
8	2 - 25	+ 75	64	5 - 25	- 75
9	2 - 30	+ 70	68	5 - 30	- 80
10	2 - 35	+ 65	71	5 - 35	- 85
11	2 - 40	+ 60	75	5 - 40	- 90
11	2 - 45	+ 55	79	5 - 45	- 95
12	3	+ 50	86	6	- 100
13	3 - 5	+ 45	93	6 - 5	- 105
15	3 - 10	+ 40	100	6 - 10	- 110
17	3 - 15	+ 35	108	6 - 15	- 115
18	3 - 20	+ 30	115	6 - 20	- 120
19	3 - 25	+ 25	123	6 - 25	- 125
20	3 - 30	+ 20	130	6 - 30	- 130
22	3 - 35	+15	138	6 - 35	- 135
23	3 - 40	+ 10	145	6 - 40	- 140
25	3 - 45	+ 5	153	6 - 45	- 145
26	4	Base	160	7	- 150
28	4 - 5	- 5	180	7 - 5	- 155
30	4 - 10	- 10	200	7 - 10	- 160
32	4 - 15	- 15	220	7 - 15	- 165
34	4 - 20	- 20	240	7 - 20	- 170
36	4 - 25	- 25	260	7 - 25	- 175
38	4 - 30	- 30	280	7 - 30	- 180
40	4 - 35	- 35	300	7 - 35	- 185
42	4 - 40	- 40	320	7 - 40	- 190
44	4 - 45	- 45	340	7 - 45	- 195
			360	8	- 200
			> 360	Fora de tipo	

Fonte: Adaptado de Brasil (2003)

4. METODOLGIA

O estudo foi conduzido na Área de Pré-processamento e Armazenamento de Produtos Vegetais do Departamento de Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa.

O sistema de secagem foi implementado com base no trabalho de Rezende (2012) e testado para secagem de café cereja da espécie *Coffea arabica* L., variedade Catuai Vermelho, com teor de água inicial de, aproximadamente, 60 % b.u., proveniente de uma fazenda localizada na região de Viçosa, altitude de 650 m.

O desenvolvimento e a implementação do sistema de secagem, seguiram as etapas apresentadas a seguir.

4.1. IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE SECAGEM

A seguir serão descritas as partes componentes do sistema de secagem, com base em um gaseificador de biomassa, para secagem de café.

4.1.1. O Reator de gaseificação

Para obtenção do ar de secagem utilizou-se um gaseificador de fluxo concorrente projetado por Rezende (2012), em que a alimentação da biomassa é feita pela parte superior do gaseificador. A entrada de ar ocorreu em fluxo descendente, sendo que esse ar passa pelas zonas de secagem, pirólise, oxidação (combustão) e redução. O equipamento foi construído em aço inoxidável refratário com 3 mm de espessura, na forma de dois troncos de cone acoplados a um cilindro. Na base do gaseificador foram acoplados dois dispositivos: um para a remoção das cinzas e outro para a saída do gás. O isolamento térmico do reator foi constituído de uma camada de lã de rocha, revestido por uma chapa de aço galvanizado com espessura de 2mm.

Foi construído no corpo do reator, aproximadamente na metade de sua altura, um anel externo com cinco aberturas para entradas de ar primário no interior da zona de oxidação do reator, através de um sistema de ventilação forçada positiva, a fim de facilitar o início do processo de combustão e, posteriormente, gaseificação do combustível. Pode ser observado na Figura 3, o diagrama esquemático do reator de gaseificação com suas dimensões, as entradas e saída do ar comburente e dos gases.

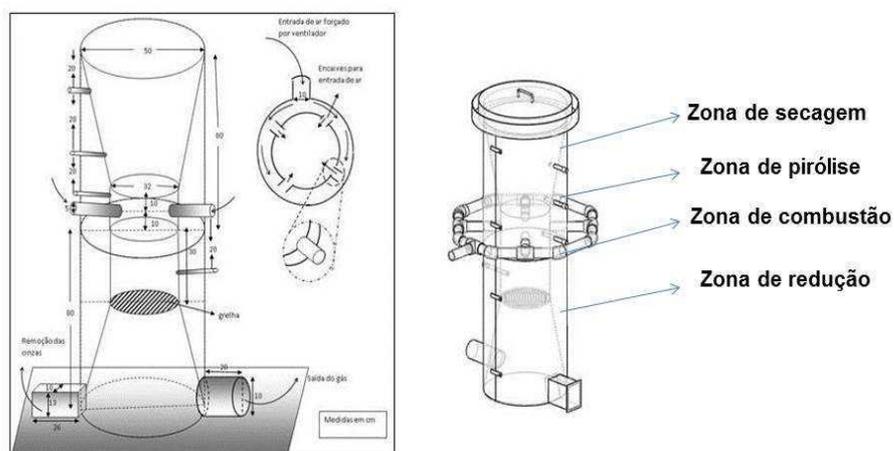


Figura 3 - Diagrama esquemático do reator do gaseificador e suas dimensões.

4.1.2. Sistema de ventilação no reator de gaseificação

O sistema de ventilação acoplado ao reator, na altura da zona de combustão, é composto por um ventilador centrífugo de pás retas, acoplado a um motor elétrico trifásico com potência nominal de 0,5 cv (368 W) utilizado para suprimento de ar na zona de combustão, através do anel do gaseificador. O acionamento desse motor era realizado utilizando inversor de frequência.

Na Figura 4 apresenta-se o reator construído com o anel envolvendo a zona de combustão e o detalhe do sistema de ventilação acoplado a esse anel.



Figura 4 - (a) Reator de gaseificação construído; (b) Sistema de ventilação acoplado a câmara de combustível dentro do reator do gaseificador.

4.1.3. O gaseificador

Logo após a saída dos gases do reator, foi construído um combustor de gases de alvenaria destinado a combustão imediata dos gases produzidos e, posteriormente, a produção de ar aquecido para utilização na secagem. O ar aquecido, proveniente da queima do gás foi direcionado para uma câmara de mistura, na qual se misturavam com o ar ambiente para obtenção do ar de secagem na temperatura adequada ao produto (café).

Na Figura 5 está a representação do reator juntamente com o combustor de gases adjacente constituindo o gaseificador concorrente utilizado neste trabalho.

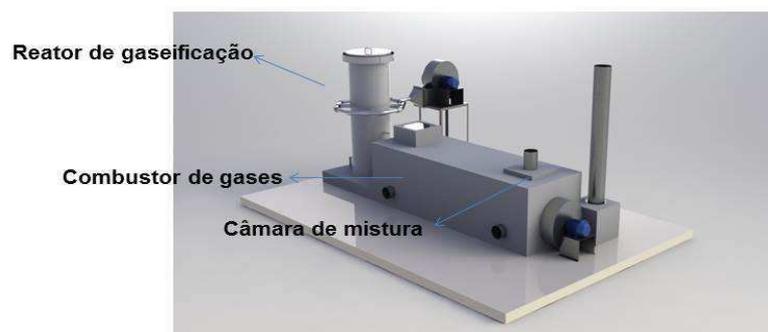


Figura 5 - Reator de gaseificação juntamente com o combustor de gases e câmara de mistura formando o gaseificador.

Um corte na Figura 5 permite visualizar os dutos de condução do ar quente, oriundo da queima do gás, até a entrada do ventilador (Figura 6).

Na Figura 7 apresenta-se o conjunto gaseificador já construído.

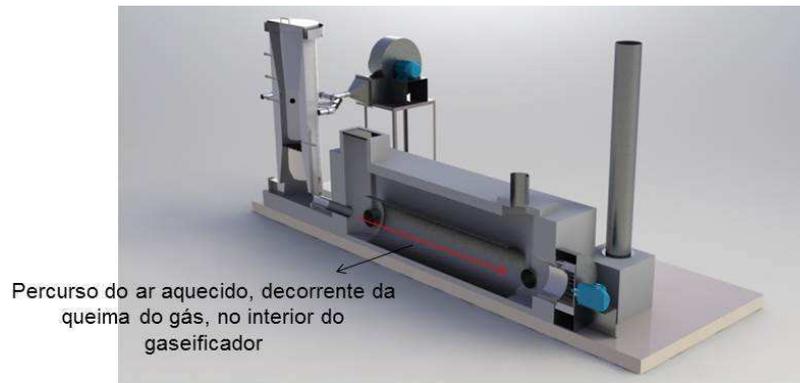


Figura 6 - Corte longitudinal do conjunto gaseificador.



Figura 7 - Gaseificador depois de construído.

4.1.4. O sistema de secagem

4.1.4.1. Silos secadores

A partir do gaseificador descrito no item anterior, foi construído o sistema de secagem em camada fixa (Figura 8), utilizando dois silos conectados ao gaseificador por meio de dutos de metal, construídos em chapa galvanizada. Uma bifurcação em Y foi construída para distribuição do ar aquecido para os dois silos (Figura 9). Esses dutos

foram confeccionados na oficina da área de armazenamento do Departamento de Engenharia Agrícola.



Figura 8 - Etapas de construção dos silos secadores e do acoplamento dos silos ao gaseificador.



Figura 9 - Bifurcação em Y para distribuição do ar nos silos secadores.

Os silos secadores (Figura 10) tinham as seguintes dimensões: diâmetro externo de 1,2 m; espessura da parede de 0,10 m; altura total igual a 1,10 m; altura efetiva igual a 0,80 m; altura do *plenum* igual a 0,30 m.



Figura 10 - Silos secadores de alvenaria.

Uma camada de café com 0,4 m de espessura foi colocada nos silos. A cada 0,10 m de altura na camada de café foram instalados termopares conectados a um sistema de aquisição de dados, a fim de realizar o monitoramento da temperatura na massa de grãos para mantê-la na faixa de $50 \pm 5^{\circ}\text{C}$. A pesagem do produto úmido foi realizada utilizando uma balança de plataforma, com resolução de 0,1 kg, antes de encher os dois silos com café. Quando o produto estava seco, foi ensacado e sua pesagem final realizada.

4.1.5. Os sistemas de ventilação para condução do ar de secagem para os silos

Para condução do ar aquecido até os silos foi utilizado um sistema de ventilação (Figura 11) localizado no final do gaseificador e consistiu de um ventilador acoplado a um motor trifásico com potência nominal de 2cv (1.472 W).



Figura 11 - Sistemas de ventilação para insuflação do ar de secagem nos silos secadores.

4.1.6. Os sistemas de aquisição de dados

Dois sistemas de aquisição de dados foram instalados para coletar informações sobre as variáveis do processo, com o objetivo de monitorar o sistema de secagem e controlar o sistema de ventilação. O primeiro (Figura 12) consistiu de termopares localizados nas diferentes zonas do reator de gaseificação (zona de secagem, pirólise, combustão e redução) e na saída dos gases do gaseificador. Os sistemas de ventilação eram controlados utilizando dois inversores de frequência conectados ao circuito elétrico de alimentação dos motores. Um dos inversores foi ligado ao ventilador dos silos e o outro no ventilador de alimentação de ar para o reator.

O primeiro sistema de aquisição de dados é baseado na Lógica Difusa (*FuzzyLogic*) e foi desenvolvido por Rezende (2012). Simplificadamente, este sistema consiste em inserir no computador, utilizando um programa computacional apropriado, a temperatura desejada no gaseificador no final do processo de gaseificação e, automaticamente, o ajuste é feito pelo sistema, que busca atingir a temperatura desejada, por meio da variação de frequência nos dois motores acoplados aos sistemas de ventilação.

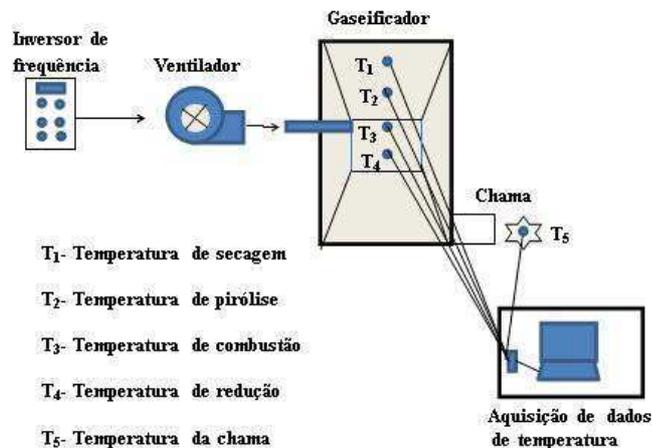


Figura 12 - Diagrama de operação do gaseificador e da coleta dos dados de temperatura nas zonas de secagem, pirólise, combustão, redução e na chama.

O segundo sistema de aquisição de dados (Figura 13) é baseado em módulos seriais e utilizado com a finalidade de coletar dados de temperatura da massa de grãos, presentes no interior dos silos e da temperatura do ar de secagem no plenum. O sistema foi programado para coletar dados de temperatura em intervalos de um minuto.



Figura 13 - Café cereja nos silos secadores e sistema de aquisição de dados.

. O sistema de secagem que consistiu de um gaseificador automatizado de biomassa acoplado com a 2 silos, depois de montado apresentou-se como indicado na Figura 14.



Figura 14 - Sistema gaseificador-silos construído para secagem de café.

4.2. TESTES E AVALIAÇÃO DO SISTEMA

O sistema de secagem foi testado e avaliado com a secagem de café (*Coffea arabica* L.) cereja. Paralelamente, para fins de comparação, terreiros suspenso e de concreto foram também utilizados para secagem do café cereja. O sistema foi avaliado como um todo. O café utilizado foi proveniente de um produtor particular da região da zona da mata mineira. A seguir são descritas de testes e avaliações.

4.2.1. Testes experimentais

Os testes experimentais foram realizados utilizando dois tratamentos, como descritos a seguir.

Tratamento 1:

O tratamento 1 consistiu de secagem do café durante um período de 8 horas com revolvimento manual em intervalos de 2 h. Foram realizados 4 testes de secagem usando carvão vegetal como combustível.

Tratamento 2:

Consistiu na secagem do café cereja em terreiro suspenso.

Tratamento 3:

Consistiu na secagem do café cereja em terreiro concreto. No total foram 8 terreiros, com 4 repetições para cada tipo de terreiro.

4.2.2. A secagem em terreiro

Uma parte do café cereja foi colocada em terreiros suspensos e em terreiros de concreto (Tratamento 3) a fim de comparar a secagem neste sistema com a realizada em silos, com a utilização do gaseificador (Figuras 15 e 16).



Figura 15 - (a) Secagem em terreiros de concreto; (b) Secagem em terreiros suspensos.



Figura 16 - Em primeiro plano terreiro de concreto e ao fundo à esquerda o conjunto de terreiros suspensos.

4.2.3. Características físicas, químicas e qualitativas do café.

Com a finalidade de avaliar a qualidade do café seco utilizando o sistema de secagem, as características físicas, químicas e qualitativas do café foram avaliadas neste trabalho, conforme descrito a seguir.

4.2.3.1. Características Físicas.

Características físicas do café foram avaliadas durante os testes de secagem, tais como impureza, teor de água e massa específica aparente dos grãos. Retiraram-se as amostras no início do processo de secagem, durante a secagem (em intervalos de 2 horas), sempre depois do revolvimento e no término da secagem.

Em cada amostragem, foram retiradas seis amostras da massa de grãos, sendo três de cada silo e a porcentagem de impureza foi determinada no final do processo de secagem.

O café que foi seco no terreiro de concreto e no terreiro suspenso também foi avaliado quanto ao teor de água, massa específica aparente e porcentagem de impureza. De cada terreiro, retiraram-se 3 amostras no início da secagem, ao final de cada dia de exposição à radiação solar e no término de todo o processo de secagem. Os valores médios observados foram considerados para fins de análise.

O teor de água para cada amostragem foi determinado pelo método padrão da estufa (BRASIL, 2009). Simultaneamente, devido ao longo tempo necessário para obtenção dos resultados através do método da estufa, o teor de água foi determinado utilizando um aparelho baseado no método indireto de capacitância elétrica, denominado de G800. Este procedimento se tornou necessário a fim de determinar o momento exato do fim do processo de secagem.

A massa específica aparente foi determinada utilizando uma balança de peso hectolítrico, com capacidade para um litro (BRASIL, 1992).

A porcentagem de impureza foi determinada por meio da separação das matérias estranhas presentes numa amostra de 100 gramas de café cereja. Esta amostra foi colocada em uma peneira de malha número 10 (com furos de 4 mm de diâmetro), comum fundo plano localizado abaixo dela. Posteriormente foi feita a agitação dessa amostra e procedeu-se a catação das matérias estranhas que foram reservadas separadamente, pesadas e consideradas como impureza.

4.2.3.2. Características Químicas

Dentre as características químicas analisadas, estão a lixiviação de potássio e a condutividade elétrica, sendo que foram seis amostras para o tratamento 1 (três de cada silo) e três amostras de cada terreiro, o suspenso (Tratamento 2) e o de concreto (Tratamento 3). Para as análises, foram considerados os valores médios obtidos para essas características químicas.

Para início das análises, as amostras foram preparadas para a medição da condutividade elétrica. Dessa forma, 50 grãos inteiros de café foram separados, pesados em uma balança digital, colocados em embebição em copos de plástico que continham 75 ml de água destilada (Figura 17). Esses copos permaneceram dessa maneira em um ambiente a 25°C durante 24h. Depois desse período, as leituras foram realizadas utilizando um condutivímetro.

Os resultados fornecidos pelo aparelho (unidade em $\mu \cdot S \cdot cm^{-1}$) foram divididos pela massa das amostras de café (grama), de forma que o resultado final fosse expresso em $\mu \cdot S \cdot cm^{-1} \cdot g^{-1}$.

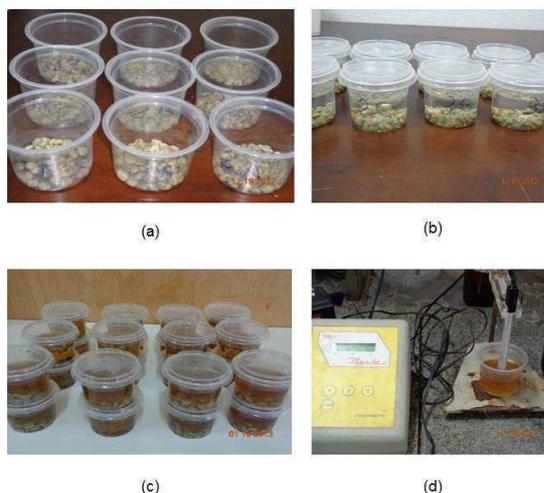


Figura 17 - (a) e (b) Preparação das amostras para leitura da condutividade elétrica; (c) amostras prontas para leitura de condutividade, após permanecerem 24h à 25 °C; (d) Condutivímetro utilizado nas análises.

Posteriormente à determinação da condutividade elétrica, as amostras foram reservadas para a realização de análises quanto à lixiviação de potássio (Figura 18). Para isso, foi removida uma pequena quantidade da solução presente nos copos e colocada em outros recipientes de plástico, conforme PRETE (1992). A solução retirada

das amostras preparadas para leitura de condutividade elétrica foi diluída 50 vezes, devido a questões técnicas referentes à limitação do fotômetro de chama.

Os resultados obtidos no fotômetro de chama foram expressos em miligramas por litro ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1} = \text{ppm}$), os quais foram divididos pelo valor da massa de grãos inicialmente colocados nos copos de plástico, sendo os resultados expressos em $\text{ppm}\cdot\text{g}^{-1}$.

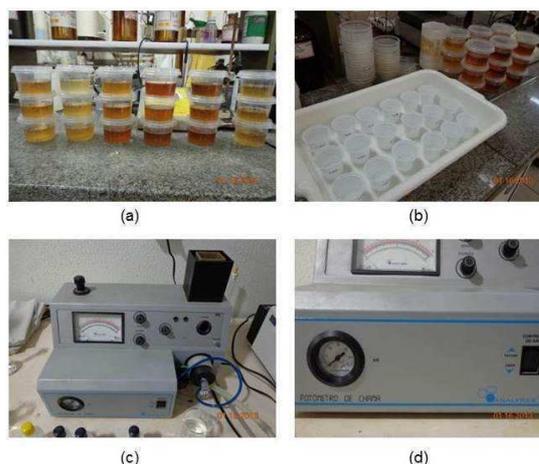


Figura 18 - (a) e (b) Preparação das amostras para medir a lixiviação de potássio; (c) e (d) Fotômetro de chama utilizado nas análises.

4.2.3.3. Características Qualitativas

A classificação oficial da qualidade do café vigente no Brasil está baseada na Instrução Normativa nº 16, de 24 de maio de 2010, a qual estabelece o Regulamento Técnico para Café Torrado em grão e Café Torrado e Moído (BRASIL, 2010). As amostras foram encaminhadas a três classificadores credenciados da Corretora de Café Três Irmãos, localizada em Viçosa, que fizeram a análise da prova de xícara.

A classificação da bebida foi definida em função da nota atribuída à bebida, de acordo com os limites definidos a seguir:

- Notas iguais ou maiores que 86 equivalem à bebida estritamente mole;
- Nota entre 80 e 85 refere-se à bebida mole;
- Nota entre 75 e 79 refere-se à bebida apenas mole;
- Notas iguais ou menores que 74 referem-se à bebida dura.

A determinação do tipo de café foi realizada com base na determinação dos defeitos das amostras e da utilização da Tabela de Classificação do Café Beneficiado -

Grão Cru, em função do defeito/tipo, conforme Instrução Normativa Número 8, de 11 de junho de 2003 (BRASIL, 2003).

A classificação por peneiras foi realizada conforme a Instrução Normativa Número 8, de 11 de junho de 2003, que estabelece que uma amostra de 100 g, preparada previamente, passe pela seguinte série de peneiras, dispostas na seguinte ordem (Quadro 6).

Quadro 6 - Classificação por peneiras, de acordo com a Instrução Normativa número 8.

Classificação	
19 = chato	15 = chato
13 = moca	9 = moca
18 = chato	14 = chato
12 = moca	13 = chato
17 = chato	8 = moca
11 = moca	10 = chato
16 = chato	Fundo Plano
10 = moca	

Dessa forma, a classificação de peneiras foi realizada com a série de peneiras (Figura 19) existente no laboratório de café, localizado na área de armazenamento do departamento de Engenharia Agrícola. As peneiras foram dispostas de acordo com a ordem estabelecida pela Instrução Normativa Número 8.

Posteriormente, determinou-se a porcentagem de grãos classificados como “bica corrida” que consiste no somatório das porcentagens do café retido acima da peneira chato 13. Determinou-se, também, a porcentagem de quebra que é o somatório da porcentagem do café retido no fundo plano juntamente com a catação.



Figura 19 - Amostra de 100 g de café utilizada e conjunto de peneiras utilizadas na classificação por peneiras.

A massa de mil grãos foi determinada de acordo com metodologia descrita em BRASIL (1992). As amostras foram divididas em oito repetições de 100 grãos (Figura 20) que foram contados manualmente e aleatoriamente. O pergaminho das amostras foi retirado utilizando um descascador do departamento de Engenharia Agrícola da UFV. Posteriormente, cada uma das oito repetições foi pesada em uma balança digital.



Figura 20 - Preparo das oito repetições para análise da massa de mil grãos.

Depois do cálculo e informações sobre os resultados, determinou-se a variância, o desvio-padrão e o coeficiente de variação dos valores obtidos nas pesagens, conforme as Equações 1, 2 e 3, respectivamente.

$$S^2 = \frac{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}{n(n-1)} \quad (1)$$

$$S = \sqrt{S^2} \quad (2)$$

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (3)$$

em que

- n - Número de repetições;
- x - Massa de cada repetição, g;
- S^2 - Variância, g^2 ;
- S - Desvio padrão, g;
- CV - Coeficiente de variação, %;
- \bar{x} - Massa média de 100 grãos, g.

O resultado da determinação da massa de mil grãos pode ser calculado multiplicando-se por 10 a massa média obtida das repetições de 100 grãos, sob a condição do coeficiente de variação não exceder a 4%.

Por meio de um colorímetro, modelo Color Quest XE, da marca Konica Minolta, a quantificação da cor dos grãos foi determinada. As amostras separadas foram depositadas no recipiente de vidro que faz parte do colorímetro e as características de cor foram lidas diretamente por reflectância (Figura 21), tendo como base a escala CIELAB, de coordenadas L^* , a^* e b^* .



Figura 21 - Leitura dos parâmetros de cor.

Posteriormente, foram calculados os valores de C (croma ou índice de saturação da cor) e h (ângulo de matiz ou tonalidade da cor), conforme Equações 4 e 5 (LITTLE, 1975; FRANCIS, 1975; McGUIRE, 1999).

$$C = (a^2 + b^2)^{1/2} \quad (4)$$

$$h = \tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \quad (5)$$

em que

- C - Croma ou índice de saturação da cor, adimensional;
- a, b - Coordenadas, m;
- h - Ângulo de matiz ou tonalidade da cor, grau.

4.3. TESTE DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE SECAGEM

Depois de completar os dois silos secadores com café cereja até formar uma camada de 40 cm, iniciou-se o processo de secagem. Amostras de café foram coletadas a cada 2h, depois do revolvimento e estabilização das variáveis medidas, a fim de acompanhar a secagem.

Depois dos silos cheios, procedeu-se ao acendimento do gaseificador a fim de iniciar a produção de gás e, conseqüentemente, ar aquecido para a secagem do café. O registro de passagem de ar de secagem nos tubos de condução (Figura 22) foi aberto somente depois de o sistema atingir o regime permanente e do sistema de aquisição de dados indicarem as condições adequadas de temperatura.

Depois de 10 minutos do acendimento do gaseificador ocorria produção de chama (Figura 23). A partir desse ponto, foi acionado o sistema de aquisição de dados e estabelecida à temperatura desejada, que atingia um valor estável e permanecia constante após 10 minutos. Portanto, depois de 20 minutos do acendimento do gaseificador o ar aquecido para secagem foi colocado em contato com o café para início do processo de secagem.



Figura 22 - Registro no tubo de condução de ar aquecido para os silos secadores.



Figura 23 - Início da produção de chama pelo gaseificador, visualizada através da aberturas laterais presentes no combustor de gases.

Depois dos 20 minutos iniciais de funcionamento do sistema de secagem, as seguintes coletas de dados foram realizadas: medição da tensão e de corrente de alimentação dos motores utilizados; medição da pressão estática do ar se secagem, através de um manômetro, medição da umidade relativa do ar ambiente; medição da

umidade relativa e da velocidade do ar de exaustão no sistema de secagem, através de um anemômetro de fio quente. No duto de condução do ar aquecido, foi feito um orifício imediatamente antes da entrada do plenum para medição da pressão estática, por meio do manômetro.

Esse processo realizado após os 20 minutos iniciais foi repetido a cada intervalo de 2 horas e também depois do período de repouso e ao final da secagem. Quando a secagem era finalizada, os silos eram descarregados por meio da saída construída para esta finalidade (Figura 24).



Figura 24 - Local de descarga do café seco nos silos.

4.4. DETERMINAÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA E DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SECAGEM

Para realização do estudo de eficiência energética foram determinados os parâmetros descritos a seguir.

- **Parâmetros relativos aos grãos** – Teor de água inicial e final (% b.u.); temperatura inicial e final (°C); massa específica aparente inicial e final (kg m^{-3}); quantidade de massa de produto úmido (kg); quantidade de massa de água evaporada (kg); porcentagem de impureza final (%).
- **Parâmetros relativos ao ar ambiente** – Temperatura do ar ambiente (°C); umidade relativa do ar ambiente e de exaustão (%); temperatura do ar de secagem e temperatura no plenum (°C). O monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar ambiente, durante a fase experimental, foi realizado por meio de um termohigrógrafo instalado em um abrigo meteorológico, localizado na área de pré-processamento e armazenamento de produtos vegetais.
- **Parâmetros relativos ao secador** - Volume total do secador (m^3); volume da camada de secagem (m^3); pressão estática no plenum (mmca); tempo de

carregamento (min); tempo de descarregamento (min); tempo de operação do ventilador (h).

- **Parâmetros relativos à energia utilizada para realizar secagem** – Consumo de combustível utilizado em cada teste do tratamento 1 (kg); poder calorífico inferior do combustível úmido (kJ kg^{-1}); consumo de energia do ventilador (kJ).
- **Parâmetros relativos ao desempenho do sistema** – Tempo total de secagem (h); tempo efetivo de secagem (h); quantidade de água removida na secagem (% b.u.); consumo de energia por quilograma de água evaporada no processo de secagem, com e sem energia elétrica (kJ kg^{-1}), ou consumo específico de energia.

O consumo de energia pelos motores elétricos utilizados foi calculado através das curvas características desses motores, para as condições de operação, em função dos valores eficazes da tensão aplicada e da corrente resultante, considerando-se o tempo de funcionamento de cada um dos motores.

Os dados de temperatura do ar de secagem no plenum foram coletados utilizando um sistema de aquisição de dados baseado em módulos seriais. Os dados de temperatura, umidade relativa do ar de exaustão e umidade relativa do ar ambiente foram coletados no momento da amostragem, após o revolvimento e estabilização da massa de café, utilizando um termohigrômetro digital (Figura 25 b). Um manômetro digital (Figura 25 a) foi utilizado para medir a pressão estática na entrada dos silos.

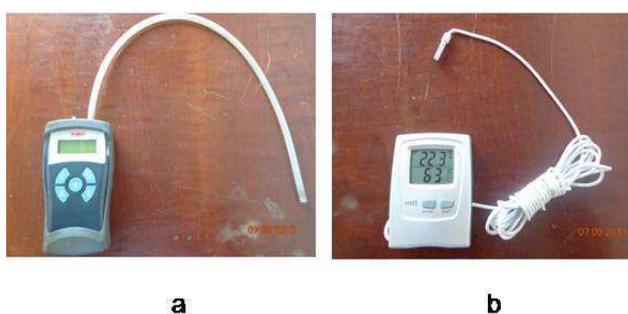


Figura 25 - (a) Manômetro utilizado para medir a pressão estática na entrada dos silos; (b) Termo higrômetro utilizado para medir a temperatura e umidade de exaustão.

A quantidade de carvão consumido nos testes de secagem foi determinada por meio de uma balança com capacidade para 200 kg. As amostras de carvão foram retiradas e encaminhadas ao Laboratório de Energia da Madeira, no Departamento de

Engenharia Florestal da UFV para determinação do poder calorífico superior, P_{cs} , do carvão e do seu teor de água.

O poder calorífico inferior do combustível seco (poder calorífico inferior), P_{ci} , foi determinado a partir da Equação 6 (BAZZO, 1995). Foi considerada a composição elementar do carvão citada por LOPES (2002), cujos valores, para a temperatura de carbonização de 900°C , são para o Carbono, Hidrogênio e Oxigênio, respectivamente: 96,1%; 0,7% e 3,2% (base seca).

$$P_{cs} = P_{ci} - h_v (9 \cdot H_2) \quad (6)$$

em que

P_{ci} - Poder calorífico inferior do combustível seco, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;

P_{cs} - Poder calorífico superior do combustível, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;

h_v - Entalpia de vaporização da água na temperatura de referência de 25°C (equivalente a $2 \cdot 440 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;

$9 \cdot H_2$ - Parcelada massa de vapor de água quilograma de combustível seco, formada pela combustão do hidrogênio, em que H_2 representa a fração de hidrogênio do combustível, $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

A quantidade de massa de água removida durante o processo de secagem foi determinada utilizando-se a Equação 7.

$$M_a = M_i \left(\frac{U_i - U_f}{100 - U_f} \right) \quad (7)$$

em que

M_a - Quantidade de massa de água evaporada na secagem, kg ;

M_i - Quantidade de massa inicial de produto, kg ;

U_i - Teor de água inicial do produto, % b.u.;

U_f - Teor de água final do produto, % b.u.

Quando o combustível (carvão) no interior do reator tiver passado pela zona de secagem, tem que passar ainda pela zona de redução até se encontrar na zona de oxidação. Por isso, para este caso, no cálculo do consumo específico de energia foi considerado o poder calorífico inferior, P_{ci} , ao invés do poder calorífico inferior úmido,

P_{ciu} . O cálculo do consumo específico de energia considerando a energia elétrica foi realizado utilizando a Equação 8.

$$\varepsilon = \frac{[(C_{cb} \cdot P_{ci}) + C_e]}{M_a} \quad (8)$$

em que

ε - Consumo de energia por quilograma de água evaporada, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;

C_{cb} - Consumo de combustível na secagem, kg ;

C_e - Consumo de energia elétrica ($1 \text{ kWh} = 3 \cdot 600 \text{ kJ}$), kJ ;

P_{ci} - Poder calorífico inferior do combustível úmido, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

A eficiência energética da secagem também foi determinada segundo a Equação 9, apresentada por Dios (1996).

$$\eta_{es} = \left(\frac{M_a \cdot L_{va}}{M_{cb} \cdot P_c} \right) \cdot 100 \quad (9)$$

em que

η_{es} - Eficiência energética de secagem, %;

L_{va} - Calor latente de vaporização da água do produto, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;

M_{cb} - Quantidade de massa de combustível usado na secagem, kg ;

P_c - Poder calorífico do combustível, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

A quantidade de energia proveniente do combustível utilizado para o aquecimento do ar de secagem foi determinada utilizando a Equação 10.

$$E_{cb} = M_{cb} \cdot P_{ci} \quad (10)$$

em que

E_{cb} é a quantidade de energia proveniente do combustível, kJ .

A potência elétrica do motor trifásico é calculada utilizando a Equação 12.

$$P_m = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot F_p \quad (11)$$

em que

- P_m - Potência elétrica do motor, W ;
- U - Tensão de linha aplicada ao motor, V ;
- I - Corrente de linha do motor (medida), A ;
- F_p - Fator de potência do motor, adimensional.

A quantidade de energia consumida pelo motor do ventilador é, portanto, calculada de acordo com a Equação 12.

$$E_m = P_m \cdot t \cdot \left(736 \frac{W}{cv}\right) \cdot \left(3600 \frac{s}{h}\right) \cdot \left(\frac{1}{1000} \frac{kJ}{J}\right) \quad (12)$$

em que

- E_m - Quantidade de energia elétrica consumida pelo motor, kJ ;
- P_m - Potência elétrica do motor, cv ;
- t - Tempo de funcionamento do motor, h .

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. SISTEMA DE SECAGEM

O sistema de secagem foi implementado de acordo com a metodologia proposta. Testes de funcionamento do sistema comprovaram o seu funcionamento adequado, tornando-se disponível e apto para a execução dos experimentos delineados. A Figura 26 mostra o sistema completo.

O café recebido foi pré selecionado a fim de realizar a limpeza manual, visto que o café ainda se encontrava com galhos e folhas. Além disso, a pré seleção foi necessária para separar a quantidade exata para cada silo, visto que a quantidade recebida de café foi superior à capacidade de secagem dos silos.



Figura 26 - Sistema de secagem completo.

5.2. AVALIAÇÃO DO SISTEMA

5.2.1. TEMPERATURAS DA MASSA DE GRÃOS, DO AR E UMIDADE RELATIVA DO AR

5.2.1.1. Temperatura e umidade relativa do ar ambiente:

Para o tratamento 1, foi selecionado o teste 2 para representar graficamente (Figuras 27 e 28) os dados de temperatura e umidade relativa do ar ambiente. Nas figuras a seguir, está representado o horário do dia em que foi realizada a secagem durante os 3 dias consecutivos, sendo de 9h às 17h.

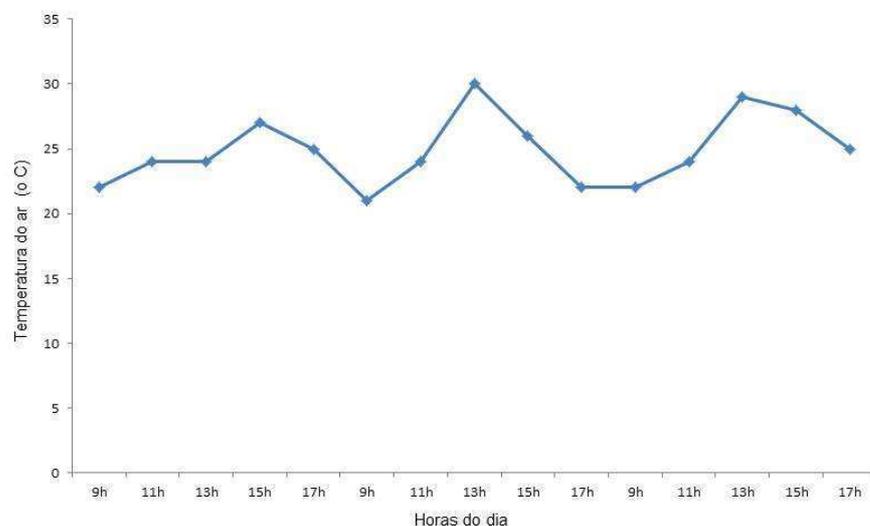


Figura 27 - Variação da temperatura do ar ambiente durante a secagem do café, um função do tempo, durante o teste 2, referente ao tratamento 1.

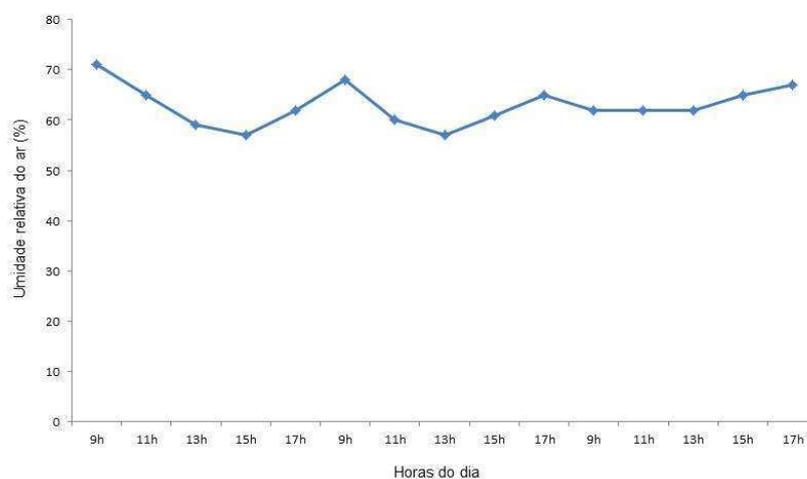


Figura 28 - Variação da umidade relativa do ar ambiente durante a secagem do café, em função do tempo, durante o teste 2, referente ao tratamento 1.

Os valores médios da temperatura e umidade relativa do ar ambiente foram 24,6 °C e 62,4 %, respectivamente.

Nas Figuras 29 e 30, estão representadas as temperaturas médias no plenum dos silos e na massa de grãos, referentes ao teste 1 e 3 do tratamento 1, durante as 24 horas de secagem necessárias para realizar a secagem completa (8 horas diárias). Observa-se que a temperatura na massa de grãos não ultrapassou o limite máximo recomendado pela literatura que é de 45 °C.

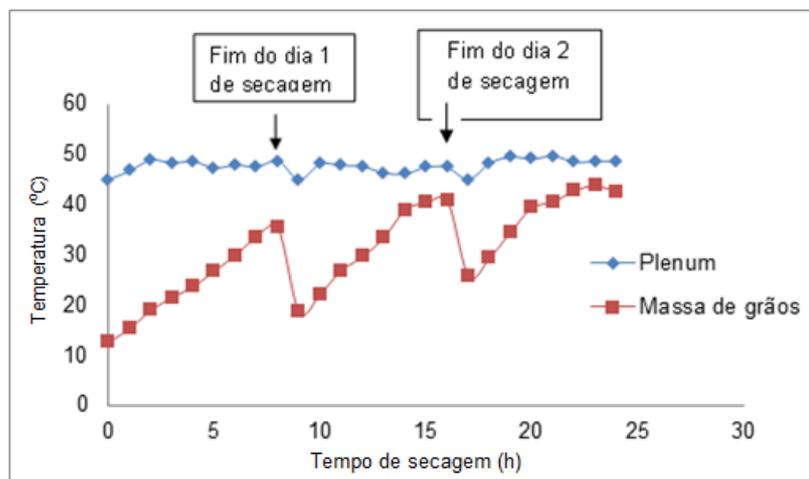


Figura 29 - Variações entre as temperaturas médias na massa de grãos e no de secagem no plenum, durante a secagem de café referente ao teste 1 (tratamento 1) no sistema de secagem.

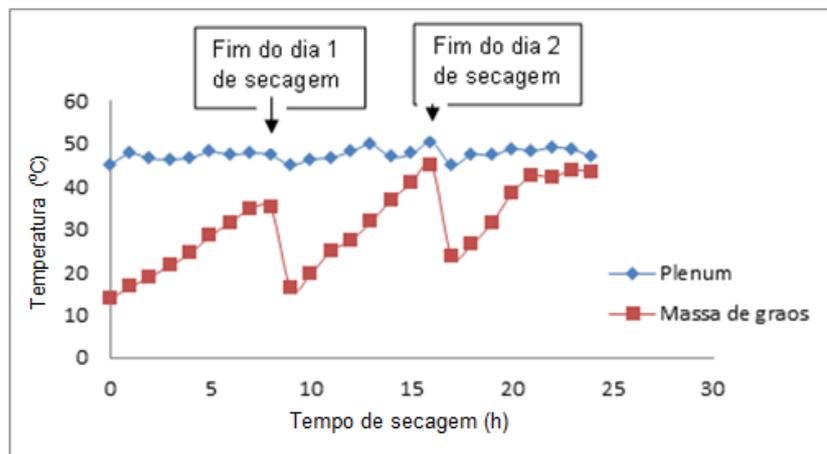


Figura 30 - Variações entre as temperaturas médias na massa de grãos e no ar de secagem no plenum durante a secagem de café referente ao teste 3 (tratamento 1) no sistema de secagem.

Observa-se que a temperatura do ar de secagem no interior do plenum foi mantida dentro da faixa previamente estabelecida de $50 \pm 5^\circ\text{C}$, do início ao fim do processo de secagem. No início de cada teste de secagem, a contagem do tempo foi iniciada no momento em que a temperatura no plenum atingia 45°C . Esta temperatura foi mantida durante todo o processo de secagem. Isto significa que o ponto logo após o fim do primeiro dia de secagem (Figura 29) representa o início do segundo dia de secagem a partir da temperatura de 45°C no plenum, conforme está indicado. O comportamento “dente de serra” verificado para a temperatura da massa de grãos se deve ao fato de que ao iniciar o processo novamente a partir do segundo dia de secagem, a temperatura da massa de grãos era inferior em relação àquela registrada no término do primeiro dia de secagem.

De acordo com Vilela (1997), o valor máximo tolerado para a temperatura da massa de café, sem prejudicar sua qualidade, é de 45°C . O excelente controle da temperatura do ar de secagem durante um longo período de tempo se deve ao sistema de automação do gaseificador, que propiciou condições adequadas do ar de secagem, com variações muito pequenas.

Nas Figuras 31 e 32 estão representadas, graficamente, a temperatura e a umidade relativa do ar de exaustão do sistema de secagem. A umidade e temperatura de exaustão foram medidas através de um termohigrometro.

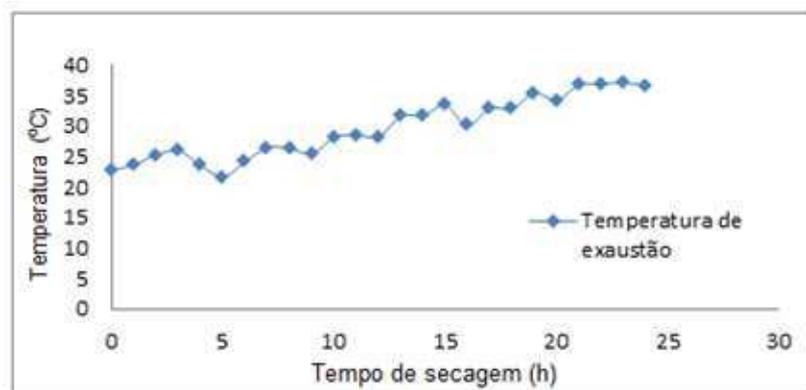


Figura 31 - Variação da temperatura de exaustão do ar durante a secagem de café no sistema de secagem.

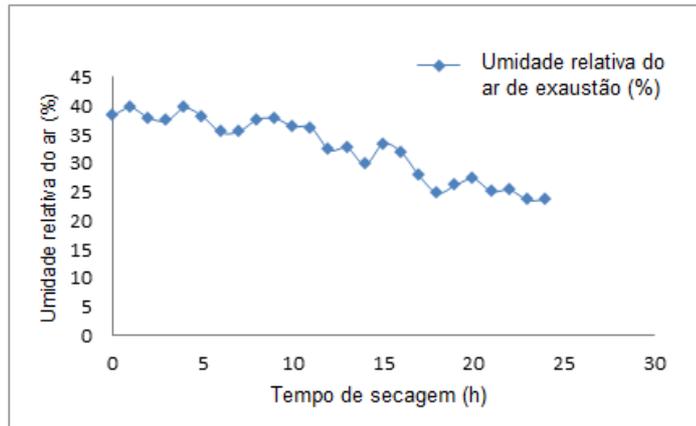


Figura 32 - Variação da umidade relativa do ar de exaustão durante a secagem de café no sistema proposto.

De acordo com os gráficos, observa-se que a umidade relativa do ar de exaustão foi diminuindo no decorrer do processo de secagem, enquanto a temperatura do ar de exaustão foi aumentando, o que está de acordo com o esperado para o processo de secagem.

5.2.1.2. Teor de água da massa de grãos

Para representação da perda de água do café ao longo do processo de secagem utilizando o sistema, foram escolhidos os testes 2 e 4 do tratamento 1, haja vista que, para este tratamento, os outros dois testes, 1 e 3, apresentaram comportamento semelhante a estes, conforme apresentado na Figura 33.

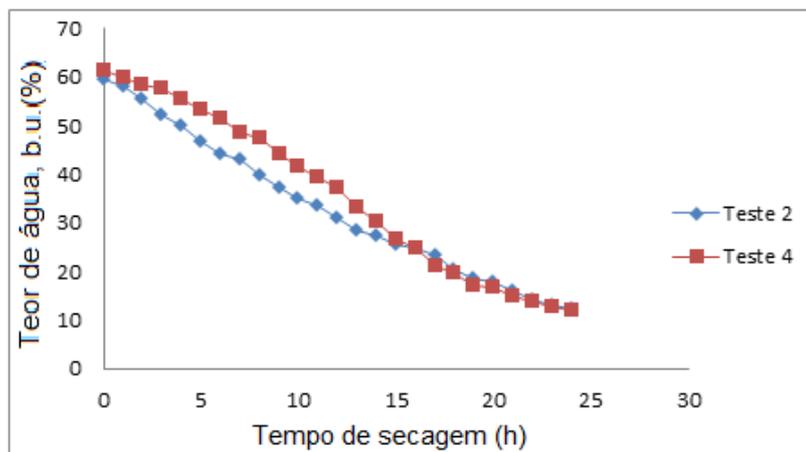


Figura 33 - Curva de secagem do café para os testes 2 e 4 do tratamento 1.

O término da secagem ocorreu com 24h de secagem, quando o produto atingiu o teor de água estabelecido como adequado para o armazenamento (12% b.u.).

A variação do teor de água da massa dos frutos de café durante o processo de secagem nos terreiros suspensos e no de concreto está representada na Figura 34 e 35, respectivamente. Apenas duas repetições para cada tipo de terreiro foram escolhidas para representação gráfica, uma vez que não ocorreram grandes variações entre as quatro repetições realizadas.

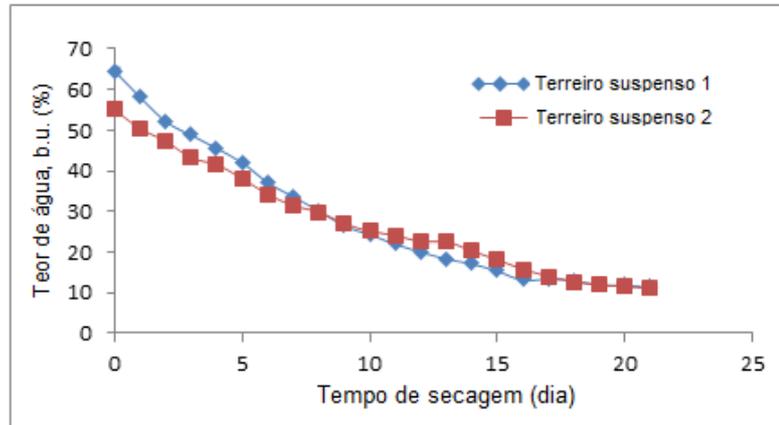


Figura 34 - Curvas de secagem do café secado nos terreiros suspenso 1 e 2.

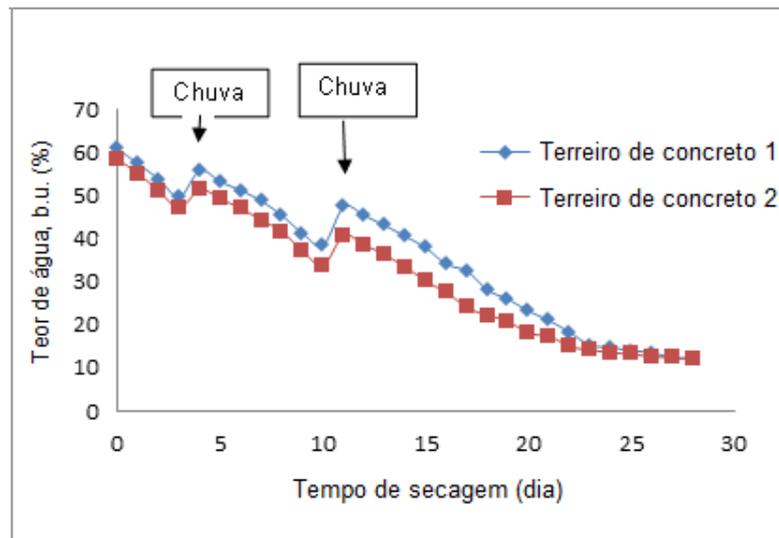


Figura 35 - Curvas de secagem do café secado nos terreiros de concreto 1 e 2.

O café presente no terreiro de concreto, embora protegido com cobertura de filmes de plástico, teve contato com o piso molhado, decorrente de chuvas que ocorreram ao longo do período de secagem, o que ocasionou um aumento do teor de água dos frutos de café, representado pelos picos observados na Figura 34. O mesmo

não ocorreu com o café presente nos terreiros suspensos, uma vez que a tela suspensa impediu esse contato com o piso molhado e proporcionou condições adequadas para manter a qualidade do café neste tipo de terreiro.

Devido a isso, a secagem nos terreiros de concreto foi mais lenta em relação ao terreiro suspenso, tendo duração de 28 dias, enquanto que no terreiro suspenso a secagem completa ocorreu em 22 dias. Já a secagem nos silos foi mais rápida em comparação aos terreiros, sendo a secagem finalizada com 24h, devido à temperatura controlada e ao fato do café não permanecerem exposto às condições climáticas. Em todos os 3 tratamentos a secagem foi finalizada quando o teor de água (b.u.) do café atingiu 12%.

5.2.2. QUANTIDADE DE IMPUREZAS

Os resultados do cálculo do teor de impureza na massa de café para o tratamento 1 e os tratamentos 2 e 3 estão apresentados nos Quadros 7 e 8, respectivamente.

Quadro 7 - Teor de impureza para os tratamentos.

Tratamento	Teste	Teor de impureza (%)
1	1	0,84
	2	1,11
	3	1,25
	4	0,98
Média		1,05
Desvio Padrão		0,18

Quadro 8 - Teor de impureza na massa de frutos de café encontrado nos testes referentes à secagem nos terreiros suspensos e nos de concreto (Testemunhas).

Tipo de terreiro	Teste	Teor de impureza (%)	Tipo de terreiro	Teste	Teor de impureza (%)
Terreiro de Concreto	1	2,33	Terreiro Suspenso	1	1,19
	2	2,17		2	1,38
	3	1,85		3	1,22
	4	1,91		4	1,12
Média		2,07	Média		1,23
Desvio Padrão		0,22	Desvio Padrão		0,11

Esses dados foram analisados no programa estatístico SAEG, conforme Quadro abaixo. Foi aplicado o teste de média Tukey, significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Quadro 9 - Teste de média aplicado para os valores de porcentagem de impureza (PI) entre os tratamentos.

TRAT	Dados	Médias	Comparações
1	4	1.0450	A
2	4	1.2275	A
3	4	2.0650	A

Observou-se que não houve diferença significativa entre os tratamentos. De acordo com os resultados obtidos, observaram-se menores valores de teor de impureza para o tratamento 1e para o café secado no terreiro suspenso. Este fato pode ser explicado porque o café presente nos silos estavam em contato com uma base perfurada e submetido ao fluxo de ar de secagem, o que retirou parte das impurezas, no caso do tratamento 1. No caso dos terreiros suspensos, esse menor valor pode ser também devido ao contato do café com a tela suspensa, a qual propiciou a retirada de parte das impurezas da massa de grãos.

5.2.3. MASSA ESPECÍFICA APARENTE

Os valores médios da massa específica aparente do café, decorrentes do processo de secagem e sua relação com o teor de água da massa do produto, para os tratamentos 1 e 2, estão apresentados nos Quadros 10 e 11.

Os resultados obtidos estão de acordo com Afonso (1994) que investigou a variação da pressão estática ao longo de uma coluna de café em coco, em função da densidade do fluxo de ar, do teor de água, da massa específica aparente e da profundidade da camada do produto. O autor concluiu que a massa específica aparente do café em coco é maior quando este estiver com um teor de água mais elevado e, neste caso, a resistência oferecida pelo produto à passagem do fluxo de ar é menor.

Quadro 10 - Resultados médios da massa específica aparente do café secado utilizando o sistema (tratamento 1).

TESTE 2		TESTE 4	
Teor de água, b.u.	Massa específica	Teor de água,	Massa específica
(%)	(kg·m⁻³)	b.u.	(kg·m⁻³)
		(%)	
37,8	400,60	36,9	406,49
35,9	398,42	33,2	402,89
32,2	405,6	30,8	400,09
29,3	394,38	27,0	395,66
26,7	393,14	24,7	399,87
23,6	394,46	21,8	386,08
20,1	389,96	19,3	385,03
17,3	392,26	17,1	375,33
15,4	377,80	14,9	381,41
13,8	379,00	13,2	370,29
12,6	382,76	12,4	373,87

Quadro 11 - Resultados médios da massa específica aparente do café secado nos terreiros de concreto e suspenso.

TERREIRO DE CONCRETO		TERREIRO SUSPENSO	
Teor de água, b.u.	Massa específica	Teor de água,	Massa específica
(%)	(kg·m⁻³)	b.u.	(kg·m⁻³)
		(%)	
37,8	415,66	36,9	432,81
35,9	409,28	33,2	410,70
32,2	402,50	30,8	422,74
29,3	389,36	27,0	399,80

26,7	382,08	24,7	376,96
23,6	391,59	21,8	374,65
20,1	376,51	19,3	370,16
17,3	392,26	17,1	368,39
15,4	378,97	14,9	364,67
13,8	365,83	13,2	359,07
12,6	358,95	12,4	350,48

Esses dados foram analisados no programa estatístico SAEG, conforme Quadro abaixo. Foi aplicado o teste de média Tukey, significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Quadro 12 - Teste de média aplicado para os valores de massa específica (ME) entre os tratamentos.

TRAT	Dados	Médias	Comparações
1	44	390.3748	A
2	44	388.7211	A
3	44	382.7271	A

Conforme se observou, não houve diferença significativa entre os tratamentos, ao nível de 5% de significância.

Segundo DANILÓ et al. (2006), a massa específica real e aparente é função linear do teor de água para o café despolpado e função quadrática do teor de água para o café coco (passa). Os valores de massa específica real e aparente do café coco, para os mesmos teores de água, são inferiores aos do café despolpado, já os valores de porosidade do café coco são superiores àqueles para o café despolpado.

Este fato está de acordo com o observado neste trabalho, pois quando se compara os valores obtidos para massa específica aparente do café em coco seco no sistema proposto com os valores obtidos por MARTÍN (2008), observa-se que, para café despolpado, com teores de água de 38,9 % e 36,4 % b.u., este autor obteve os

valores de 492,3 kg·m⁻³ e 537, 2 kg·m⁻³, respectivamente, para a massa específica aparente.

5.2.4. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS

5.2.4.1. Condutividade Elétrica

Os valores médios referentes à análise de condutividade elétrica de café seco utilizando o sistema (tratamento 1), no terreiro suspenso e no terreiro de concreto (tratamentos 2 e 3) encontram-se nos Quadros 13 e 14.

Quadro 13 - Resultados médios da análise de condutividade elétrica de café seco utilizando o sistema (tratamento 1).

Tratamento	Teste	Condutividade elétrica ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)
1	1	155,39
	2	134,73
	3	143,13
	4	154,18
Média		146,86
Desvio Padrão		9,79

Quadro 14 - Resultados médios da análise de condutividade elétrica de café seco no terreiro suspenso e no de concreto (Tratamento 2 e 3).

Tipo de terreiro	Teste	Condutividade elétrica ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)	Tipo de terreiro	Teste	Condutividade elétrica ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$)
Terreiro de Concreto	1	138,64	Terreiro Suspenso	1	135,17
	2	125,55		2	118,39
	3	134,30		3	124,59
	4	148,55		4	146,61
Média		136,76	Média		131,19
Desvio Padrão		9,56	Desvio Padrão		12,40

Esses dados foram analisados no programa estatístico SAEG, conforme Quadro abaixo. Foi aplicado o teste de média Tukey, significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Quadro 15 - Teste de média aplicado para os valores de condutividade elétrica (CE) entre os tratamentos.

TRAT	Dados	Médias	Comparações
1	4	146.8575	A
2	4	131.1900	B
3	4	136.7600	B

A média dos resultados de condutividade elétrica utilizando o sistema (tratamento 1) foi maior em comparação com os resultados observados nos testes de secagem nos terreiros suspensos (tratamento 2) e de concreto (tratamento 3). Observa-se, também, que estatisticamente o tratamento 1 é diferente dos demais tratamentos.

Conclui-se, portanto, que a secagem realizada no sistema proposto causou maiores danos à massa de café, em comparação com as testemunhas, o que pode ser explicado devido à temperatura do ar de secagem com valor maior, além dos danos mecânicos ocorridos com o revolvimento manual em intervalos de 2h durante 24h de secagem. Porém, esses valores mais elevados de condutividade elétrica para o café seco no sistema (tratamento 1) não foram suficientes para comprometer a qualidade da bebida do café seco utilizando este sistema.

Para o café seco no terreiro suspenso e no de concreto (Tratamentos 2 e 3, respectivamente), observa-se que a média da condutividade elétrica do café seco no terreiro suspenso foi menor em comparação como valor obtido para o terreiro de concreto, o que implica em maiores danos na massa de grãos presentes no terreiro de concreto, devido aos maiores danos ocasionados pelo revolvimento com auxílio de uma pá, ao longo dos 28 dias de secagem.

5.2.4.2. Lixiviação de potássio

Os valores médios da análise de lixiviação de potássio para o café secado utilizando o sistema (tratamentos 1) e nos terreiros, suspenso e de concreto (tratamentos 2 e 3), estão apresentados nos Quadros 16 e 17.

Quadro 16 - Valores médios da análise de lixiviação de potássio para o café seco utilizando o sistema (tratamento 1).

Tratamento	Teste	Lixiviação de potássio (LK) (ppm · g⁻¹)
1	1	27,90
	2	33,06
	3	31,22
	4	43,98
Média		34,04
Desvio Padrão		6,96

Quadro 17 - Valores médios da análise de lixiviação de potássio para o café seco no terreiro suspenso e no de concreto (Tratamentos 2 e 3).

Tipo de terreiro	Teste	Lixiviação de potássio (LK) (ppm · g⁻¹)	Tipo de terreiro	Teste	Lixiviação de potássio (LK) (ppm · g⁻¹)
Terreiro de Concreto	1	31,17	Terreiro Suspenso	1	20,11
	2	29,88		2	24,87
	3	30,81		3	23,77
	4	27,66		4	19,08
Média		29,88	Média		21,96
Desvio Padrão		1,58	Desvio Padrão		2,80

De acordo com os valores obtidos na análise de lixiviação de potássio, observa-se o mesmo comportamento apresentado nos resultados da condutividade elétrica, descrito anteriormente.

Esses dados foram analisados no programa estatístico SAEG, conforme Quadro abaixo. Foi aplicado o teste de média Tukey, significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Quadro 18 - Valores médios da análise de lixiviação de potássio para o café seco no terreiro suspenso e no de concreto (Tratamentos 2 e 3).

TRAT	Dados	Médias	Comparações
1	4	34.0400	A
2	4	21.9575	AB
3	4	29.8800	B

Observa-se que houve diferença estatística entre os tratamentos 1 e 2 e entre os tratamentos 2 e 3. Ocorreu maior dano na estrutura dos grãos quando a massa de café foi submetida à secagem no sistema, em relação às testemunhas. Já entre as testemunhas, da mesma forma que ocorreu nas análises de condutividade elétrica, observa-se que, para os terreiros de concreto, os valores de lixiviação de potássio foram maiores em comparação com os terreiros suspensos. Entretanto, estes resultados não podem ser considerados comprometedores em comparação com aqueles obtidos por BORÉMet al. (2008), que observaram maiores valores para os resultados de condutividade elétrica e lixiviação de potássio para café, tanto natural quanto despulpado, secado em secador de camada fixa em comparação com a secagem em terreiro.

5.2.5. AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS QUALITATIVAS

5.2.5.1. Análise sensorial (prova de xícara)

Os valores da nota obtida na análise sensorial do café que foi submetido à secagem no sistema de secagem bem como nos terreiros, encontram-se nos Quadros 19 e 20. A análise sensorial da prova de xícara foi realizada na Corretora de café 3 irmãos, localizada em Viçosa-MG.

Quadro 19 - Classificação do tipo de bebida de café seco utilizando o sistema (Tratamento 1), de acordo com a nota recebida para o tipo de bebida.

Tratamento	Teste	Nota	Tipo de Bebida
1	1	79	Apenas mole
	2	79	Apenas mole
	3	79	Apenas mole
	4	79	Apenas mole
Média		79	Apenas mole
Desvio Padrão		0,0	

Quadro 20 - Classificação do tipo de bebida de café seco nos terreiros suspensos e de concreto (Tratamentos 2 e 3), de acordo com a nota recebida para o tipo de bebida.

Tipo de terreiro	Teste	Nota	Bebida	Tipo de terreiro	Teste	Nota	Bebida
Terreiro de Concreto	1	71	Dura	Terreiro Suspenso	1	79	Apenas mole
	2	71	Dura		2	77	Apenas mole
	3	73	Dura		3	78	Apenas mole
	4	74	Dura		4	78	Apenas mole
Média		72		Média		78	Apenas mole
Desvio Padrão		1,5		Desvio Padrão		0,8	

Analisando os resultados contidos nos Quadros 19 e 20, observa-se que a qualidade da bebida do café secado utilizando o sistema (tratamento 1) não foi comprometida, o que viabiliza o uso do gaseificador automatizado de biomassa para secagem de café.

De acordo com os resultados observados nas notas de bebida para o café seco em terreiros de concreto e no suspenso, observa-se que o café seco no terreiro de concreto, apresentou qualidade de bebida inferior, diferindo do terreiro suspenso que proporcionou bebida de boa qualidade e apresentou a mesma classificação do café seco no sistema proposto.

Isso pode ser explicado, principalmente, pela ocorrência de chuvas que durante o período de secagem no terreiro de concreto. Apesar de ser protegido com lonas durante

as chuvas, o chão molhado teve influência direta nesse resultado, o que não ocorreu no terreiro suspenso, já que esse contato com o chão foi evitado. Além disso, temperaturas mais baixas implicaram em maior tempo em que o café ficou no terreiro de concreto, totalizando 28 dias, sujeito à ocorrência de chuva e submetido a revolvimento mecânico diário utilizando pás. Enquanto que o café seco por meio do terreiro suspenso permaneceu 22 dias nesse terreiro e durante esse período o revolvimento foi manual.

5.2.5.2. Determinação do tipo

Os valores médios referentes aos defeitos e ao tipo de bebida estão apresentados nos Quadros 21 e 22.

Quadro 21 - Valores médios para o tipo de café secado utilizando o sistema de secagem (Tratamento 1) e o número de defeitos encontrados.

Tratamento	Teste	Defeitos	Tipo de café
1	1	32	4-20
	2	29	4-10
	3	24	3-45
	4	27	4-35
Média		28	
Desvio Padrão		3,4	

Quadro 22 - Valores médios para o tipo de café secado em terreiros, suspenso e de concreto, e o número de defeitos encontrados.

Tipo de terreiro	Teste	Defeitos	Tipo de café	Tipo de terreiro	Teste	Defeitos	Tipo de café
Terreiro de Concreto	1	28	4-40	Terreiro Suspenso	1	28	4
	2	29	4-35		2	30	4-05
	3	33	4-25		3	31	4
	4	31	4		4	26	4-15
Média		30	---	Média		29	---
Desvio Padrão		2,2	---	Desvio Padrão		2,2	---

Os valores obtidos para defeito foram analisados no programa estatístico SAEG, conforme Quadro abaixo. Foi aplicado o teste de média Tukey, significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Quadro 23 - Teste de média aplicado para os valores de defeito entre os tratamentos.

TRAT	Dados	Médias	Comparações
1	4	28.0000	A
2	4	28.7500	A
3	4	30.2500	A

Comparando-se os resultados obtidos entre os tratamentos, observa-se que não houve grande diferença de média entre eles e que a menor média de defeitos obtida o café secado utilizando o sistema (tratamento 1) indica um melhor padrão de tipo, em relação aos terreiros suspenso e de concreto. Os três tratamentos pouco afetaram o número de defeitos e, conseqüentemente, o tipo de café.

5.2.5.3. Classificação por peneiras:

Nos Quadros 24, 25 e 26 estão apresentados os dados resultantes da classificação por peneiras, para o café secado utilizando o sistema de secagem (tratamento 1), e nos terreiros suspenso e de concreto (tratamentos 2 e 3, respectivamente).

Observando-se os resultados da classificação por peneiras, considerando bica corrida e peneira 17 acima (P17 acima), observam-se valores maiores para o terreiro suspenso do tratamento 2, em relação aos obtidos para a secagem nos terreiros de concreto e também no sistema (tratamento 1), o que pode contribuir para uma lucratividade maior do cafeicultor no momento da comercialização, devido a essa classificação superior das peneiras.

Quadro 24 - Resultado da classificação por peneiras para o café secado utilizando o sistema (Tratamento 1).

Classificação	Sistema de Secagem (Tratamento 1)				
	Valores obtidos (%)				
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Média
Chato 19	----	----	----	----	----
Moca 13	4,1	5,8	3,4	4,4	4,4
Chato 18	21,5	19,7	20,6	18,1	20,0
Moca 12	9,2	9,8	11,5	9,1	9,9
Chato 17	25,6	22,4	24,8	29,2	25,5
Moca 11	----	----	----	----	----
Chato 16	18,4	17,3	19,7	15,8	17,8
Moca 10	3,1	3,3	4,2	4,8	3,9
Chato 15	----	----	----	----	----
Moca 9	4,5	3,0	4,3	5,0	4,2
Chato 14	----	----	----	----	----
Chato 13	----	----	----	----	----
Moca 8	----	----	----	----	----
Chato 10	----	----	----	----	----
Fundo	13,6	18,7	11,5	13,6	14,4
Catação	4,5	3,8	4,2	5,3	4,5
Bica Corrida	86,4	81,3	88,5	86,4	85,7
P17 acima	60,4	57,7	60,3	60,8	59,8
Quebra	18,1	22,5	15,7	18,9	18,8

Quadro 25 - Resultado da classificação por peneiras para o café secado em terreiro de concreto (Tratamento 3).

Classificação	Terreiro de concreto (Tratamento 3)				
	Valores obtidos (%)				
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Média
Chato 19	----	----	----	----	----
Moca 13	3,9	4,9	4,6	5,1	4,6
Chato 18	20,3	22,4	19,4	23,1	21,3
Moca 12	8,3	7,9	9,9	8,8	8,7
Chato 17	23,6	20,1	22,7	25,3	22,9
Moca 11	----	----	----	----	----

Chato 16	17,5	16,4	17,9	15,3	16,8
Moca 10	5,4	5,3	4,7	5,9	5,3
Chato 15	----	----	----	----	----
Moca 9	4,0	3,7	4,9	3,9	4,1
Chato 14	----	----	----	----	----
Chato 13	----	----	----	----	----
Moca 8	----	----	----	----	----
Chato 10	----	----	----	----	----
Fundo	17,0	19,3	15,9	12,6	16,2
Catação	5,0	4,5	5,9	5,7	5,3
Bica Corrida	83,0	80,7	84,1	87,4	83,8
P17 acima	56,1	55,3	56,6	62,3	57,6
Quebra	22,0	23,8	21,8	18,3	21,5

Quadro 26 - Resultado da classificação por peneiras para o café secado em terreiro suspenso (Tratamento 2).

Classificação	Terreiro suspenso (Tratamento 2)				
	Valores obtidos (%)				
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Média
Chato 19	----	----	----	----	----
Moca 13	6,2	6,3	5,7	5,5	5,9
Chato 18	19,8	18,4	21,0	20,7	20,0
Moca 12	7,9	7,0	9,4	10,2	8,6
Chato 17	24,0	23,8	23,1	27,4	24,6
Moca 11	----	----	----	----	----
Chato 16	19,3	18,5	18,6	16,7	18,3
Moca 10	3,9	4,4	5,7	4,1	4,5
Chato 15	----	----	----	----	----
Moca 9	3,3	4,6	5,4	5,2	4,6
Chato 14	----	----	----	----	----
Chato 13	----	----	----	----	----
Moca 8	----	----	----	----	----
Chato 10	----	----	----	----	----
Fundo	15,6	17,0	11,1	10,2	13,5
Catação	8,3	7,4	9,2	9,0	8,5
Bica Corrida	84,4	83,0	88,9	89,8	86,5

P17 acima	57,9	55,5	59,2	63,8	59,1
Quebra	23,9	24,4	20,3	19,2	22,0

5.2.5.4. Massa de mil grãos

Os valores médios para a análise da massa de mil grãos para os testes de secagem com o sistema (tratamento 1) e nos terreiros, suspenso e de concreto (tratamento 2 e 3, respectivamente), são apresentados nos Quadros 27 e 28.

Observa-se nos Quadros 27 e 28 que os valores médios da massa de mil grãos não diferem substancialmente, apresentando valores de 160,90 g, 159,55 g e 161,93, para o café secado no sistema e nos terreiros de concreto e no suspenso, respectivamente. Portanto, do ponto de vista prático, não parece haver diferença significativa entre os três métodos utilizados, em relação a este parâmetro.

Quadro 27 - Valores médios da massa de mil grãos do café secado utilizando o sistema de secagem (Tratamento 1).

Tratamento	Teste	Massa de mil grãos (g)
1	1	159,2
	2	162,4
	3	163,2
	4	158,8
Média		160,90
Desvio Padrão		2,22

Quadro 28 - Valores médios da massa de mil grãos do café secado nos terreiros suspensos e de concreto (Tratamentos 2 e 3).

Tipo de terreiro	Teste	Massa de mil grãos (g)	Tipo de terreiro	Teste	Massa de mil grãos (g)
Terreiro de Concreto	1	163,7	Terreiro Suspenso	1	160,2
	2	160,8		2	165,4
	3	156,7		3	159,8
	4	157,0		4	162,3
Média		159,55	Média		161,93

Desvio Padrão	3,34	Desvio Padrão	2,56
----------------------	------	----------------------	------

O parâmetro massa de mil grãos é qualitativo e se refere à perda de massa do grão. Observou-se que a média da massa de mil grãos foi maior para o terreiro suspenso, em comparação com os outros métodos de secagem, portanto, o café presente nesse terreiro perdeu menos matéria seca em relação aos demais, o que pode ser explicado pelo não contato com o piso de concreto, uma vez que estava suspenso em tela e por um manejo mais suave, já que o revolvimento nos terreiros suspenso foi manual.

5.2.5.5. Análise de cor

Os valores médios dos parâmetros para as análises de cor referentes à secagem do café no sistema (tratamento 1) e nos terreiros suspenso e de concreto (tratamentos 2 e 3) encontram-se nos Quadros 29, 30 e 31, respectivamente.

Observa-se que os valores médios de tonalidade de cor obtidos para o café secado no sistema (tratamento 1) e no terreiro de concreto foram maiores em relação ao obtido para o terreiro suspenso.

AFONSO JÚNIOR (2001) verificou que as temperaturas do ar de secagem de 30°C e 40°C associadas à armazenagem em ambiente com temperatura de 15°C, mantiveram a coloração inicial do produto por maior período de tempo, independentemente da forma de preparo utilizada. As temperaturas de 50°C e 60°C influenciaram negativamente na coloração dos grãos beneficiados de café, sendo que, seus efeitos sobre as coordenadas L*, a* e b*, tornaram-se mais acentuados durante o armazenamento do produto.

Quadro 29 - Valores médios dos parâmetros para análises de cor referentes à secagem do café no sistema (Tratamento 1).

Tratamento	Teste	Índice de luminosidade (L*)	Coordenadas		Índice de saturação (C*)	Tonalidade da cor (h*)
			(a*)	(b*)		
1	1	48,6	0,4	10,2	10,2	87,7
	2	48,4	0,5	9,8	9,8	87,4
	3	48,4	0,6	10,5	10,5	87,0
	4	48,3	1,0	10,5	10,6	84,3
Média		48,4	0,6	10,3	10,3	86,6

Desvio Padrão	0,1	0,3	0,3	0,3	1,5
----------------------	------------	------------	------------	------------	------------

Quadro 30 - Valores médios dos parâmetros para as análises de cor referentes à secagem do café no terreiro de concreto (Tratamento 3).

Tratamento	Teste	Índice de luminosidade (L*)	Coordenadas		Índice de saturação (C*)	Tonalidade da cor (h*)
			(a*)	(b*)		
Terreiro de Concreto	1	42,70	1,60	10,4	10,5	81,4
	2	40,62	0,73	10,2	10,2	85,9
	3	41,08	0,70	10,4	10,4	86,1
	4	40,70	0,62	10,0	10,0	86,5
Média		41,30	0,90	10,3	10,3	85,0
Desvio Padrão		1,00	0,40	0,2	0,2	2,4

Quadro 31 - Valores médios dos parâmetros para as análises de cor referentes à secagem do café no terreiro suspenso (Tratamento 2).

Tratamento	Teste	Índice de luminosidade (L*)	Coordenadas		Índice de saturação (C*)	Tonalidade da cor (h*)
			(a*)	(b*)		
Terreiro de Suspenso	1	39,21	1,34	10,22	10,3	82,5
	2	38,53	1,28	10,25	10,3	82,9
	3	37,92	1,37	10,36	10,5	82,5
	4	41,89	1,22	9,90	10,0	83,0
Média		39,40	1,30	10,20	10,3	82,7
Desvio Padrão		1,70	0,10	0,20	0,2	0,3

Observa-se que a cor para os três tratamentos apresentou valores muito semelhantes de saturação, no entanto, os maiores valores observados para o índice de luminosidade para o tratamento 1 indica que o café seco nesse sistema, visualmente, tinha uma cor mais clara.

5.3. DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA

5.3.1. AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

5.3.1.1 Sistema de Secagem (Tratamento 1):

Os resultados da análise de eficiência energética do sistema de secagem proposto são apresentados no Quadro 32.

Quadro 32 - Resultados da análise de eficiência energética da secagem do café no sistema (Tratamento 1).

Parâmetros Relativos aos Grãos	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Teor de água inicial, % b.u.	58,11	59,43	58,37	61,32
Teor de água final, % b.u.	11,98	12,15	12,03	12,39
Temperatura inicial, °C	11,56	12,5	13,4	13,8
Temperatura final, °C	41,9	42,6	42,7	43,2
Massa específica aparente inicial, kg·m ⁻³	411,75	400,60	398,61	406,49
Massa específica aparente final, kg·m ⁻³	397,55	382,76	375,11	373,87
Massa de produto úmido, kg	800,9	818,1	804	826,9
Massa de água evaporada, kg	419,67	440,29	423,52	461,82
Porcentagem de impureza final, (%)	0,84	1,11	1,25	0,98
Parâmetros Relativos aos ao Ar	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Temperatura média do ar ambiente, °C	24,62	25,11	28,71	26,32
Umidade relativa média do ar ambiente, %	62,38	65,14	63,75	65,83
Temperatura média do ar de secagem no plenum, °C	48,5	47,7	46,3	47,4
Parâmetros Relativos aos ao Secador	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Volume total do secador, m ³	0,90	0,90	0,90	0,90
Volume referente à camada de 40 cm de produto, m ³	0,45	0,45	0,45	0,45
Eficiência do secador (%)	51,23	52,30	50,66	52,01
Pressão estática no plenum, mmca	9,0	9,1	9,2	9,0
Tempo de carregamento, min	5	6	5	5
Tempo de descarregamento, min	10	10	11	11
Tempo de operação-ventilador do gaseificador, h	24	24	24	24
Tempo de operação-ventilador da zona oxidação, h	24	24	24	24
Parâmetros Relativos aos à Energia	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Consumo de combustível, kg	62,4	64,3	63,8	63,3
Poder calorífico inferior, kJ·kg ⁻¹	29.990,0	29.990,0	29.990,0	29.990,0
Consumo energia dois ventiladores, kJ	176.256	176.256	176256	176256
Parâmetros Relativos ao Desempenho	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4

Tempo efetivo de secagem, h	24	24	24	24
Quant. de água removida (pontos percentuais), %b.u.	46,13	47,28	46,34	48,93
Consumo específico de energia (quilojoule por quilograma de água evaporada), $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$:				
a) sem energia elétrica	4.459,20	4.379,78	4.517,80	4.110,66
b) com energia elétrica	4.879,19	4.780,10	4.933,97	4.492,31

Os valores da quantidade de massa inicial para secagem em cada teste foram similares, uma vez que o café úmido foi pesado antes de ser colocado nos silos, a fim de obter quantidades de produto úmido semelhantes nos dois silos. O processo de secagem foi finalizado no momento em que o teor de água do café seco atingiu um valor em torno de 12% b.u. Observa-se, também, que o teor de água inicial do produto nos quatro testes pouco diferiu entre eles. A pressão estática foi medida no duto de condução do ar quente, antes da entrada nos silos e o valor permaneceu em torno de 9mmca, apresentando poucas variações.

O tempo de carregamento foi menor em relação ao tempo de descarregamento do produto nos silos, uma vez que o café foi colocado nos silos diretamente a partir das sacarias. Já no descarregamento, o processo foi mais lento, pois o café seco estava espalhado, sendo necessário remanejá-lo manualmente para dentro das sacarias, através da abertura de descarga.

O tempo de operação dos dois ventiladores acoplados ao gaseificador foi o mesmo, visto que o processo de gaseificação não ocorre caso um deles seja desligado, necessitando, portanto, de um funcionamento simultâneo dos dois motores ao longo das 24 horas de secagem. Este tempo de secagem se refere a três dias consecutivos, sendo 8 horas em cada um deles.

Em todos os dias de testes, a secagem do café iniciou-se por volta das 9 horas, sendo finalizada às 17 horas. A secagem durante o período noturno, neste caso entre as 17 horas e 9 horas do dia seguinte, é inviável técnica e economicamente, porque a umidade relativa do ar ambiente se torna muito elevada e o processo de secagem se torna ineficiente e pouco viável em termos de eficiência energética, pois uma grande quantidade de energia do combustível será destinada para retirar umidade do ar ambiente, ao invés de ser utilizada para secagem do produto.

O café permaneceu nos silos durante a noite, considerado um período de repouso importante para o processo de secagem, uma vez que esse intervalo propicia

uma migração do teor de água nos grãos, o que facilita a remoção da água posteriormente.

A quantidade de produto úmido em cada teste se refere à soma da quantidade (massa) de café úmido presente nos dois silos. Em relação ao consumo de combustível, observa-se diferença insignificante de quantidade de carvão utilizado nos quatro testes. O reator do gaseificador na sua carga máxima de combustível possibilita colocar em torno de 20 kg de carvão em seu interior. Essa quantidade dá autonomia ao sistema para 5 horas sem necessidade de reabastecimento, no que se refere ao suprimento de ar aquecido para secagem.

Durantes os três dias de secagem ao longo das oito horas diárias, foram realizados dois reabastecimentos de combustível no reator de gaseificação. Estes reabastecimentos ocorreram 2 horas depois do início da secagem, em torno das 11 horas da manhã e o segundo reabastecimento ocorreu em torno das 13 horas e a partir de então, não foram feitos mais reabastecimentos, levando em consideração que a autonomia do gaseificador era em torno de 5 horas e também com a finalidade de esgotar todo o combustível dentro do reator.

Esse intervalo de tempo entre os reabastecimentos foi determinado em testes preliminares, nos quais se observou que 2 horas era o período necessário para esgotar o combustível apenas na zona de secagem. Esgotar o combustível em zonas posteriores como da pirólise e da oxidação poderia comprometer a estabilidade do sistema, correndo o risco de o processo de gaseificação não iniciar novamente. Observou-se que, durante o reabastecimento, a chama do gaseificador permaneceu apagada, voltando novamente depois de 5 minutos do fechamento do reator, não apresentando maiores problemas na continuação da secagem.

O reabastecimento foi feito manualmente da seguinte forma: interrompeu-se o contato dos grãos com o ar de secagem, através do registro presente nos dutos de condução, a fim de evitar um possível contato com fumaça produzida na interrupção da gaseificação, embora essa fumaça não tenha sido observada nos testes com carvão. Em seguida, desligou-se o ventilador localizado no final do gaseificador para impedir que continuasse a succionar o ar e dificultar a abertura da tampa do reator. O ventilador que fornecia ar diretamente na zona de oxidação permaneceu ligado para não permitir que a chama nessa zona apagasse por completo. Observou-se em testes preliminares, que manter o ventilador da zona de oxidação funcionando durante o reabastecimento foi de

fundamental importância para o rápido retorno da produção de gás pelo sistema, depois do fechamento da tampa do reator.

O reabastecimento em si, teve duração de 5 minutos, aproximadamente, e considerando que a produção de chama novamente ocorreu depois de 5 minutos, observou-se que os abastecimentos implicaram em 10 minutos de interrupção no processo de secagem em duas oportunidades durante cada dia. Enquanto o reabastecimento era realizado, os silos foram revolvidos e amostras foram coletadas.

Em relação ao consumo específico de energia, observou-se um ótimo resultado em comparação com valores de consumo obtidos para as fornalhas, tradicionalmente usadas para secagem de café. Martín (2008) desenvolveu um secador de fluxos concorrentes e contracorrentes no qual, para a maior redução de teor de água observada, que foi de 27,84 % (pontos percentuais), houve um consumo específico de energia de $11.704,7 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, considerando o consumo de energia elétrica.

O baixo consumo específico de energia se deve, principalmente, ao baixo consumo de combustível pelo gaseificador e a prolongada autonomia (5 horas) com cerca de 20 kg de carvão vegetal. Além disso, contribuiu para esse resultado, as características do gaseificador que foi muito constante ao longo dos testes, sem a ocorrência de grandes variações e ao isolamento térmico presente no reator e combustor de alvenaria, devido ao uso de alvenaria refratária.

Para os quatro testes realizados com o sistema de secagem, observou-se um consumo específico de energia médio de $4.771,39 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ e a eficiência de secagem apresentou média de 53,58%. Este valor de eficiência pode ser explicado pela perda de calor que ocorreu para o ambiente e pelo consumo de energia dos dois ventiladores funcionando durante 24 horas. Essa eficiência indica um potencial para otimização do sistema.

5.3.1.2. Terreiro de concreto (Tratamento 3) e terreiro suspenso (Tratamento 2)

Um resumo dos resultados da análise de eficiência energética para os terreiros de concreto e suspenso encontra-se nos Quadros 33 e 34.

Quadro 33 - Resumo dos resultados da análise de eficiência energética para a secagem de café nos terreiros de concreto.

Parâmetros	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Teor de água inicial, % b.u.	60,92	58,47	57,25	58,11
Teor de água final, % b.u.	12,17	12,09	12,83	12,36
Massa específica aparente inicial, kg·m ⁻³	415,66	442,3	423,17	428,74
Massa específica aparente final, kg·m ⁻³	358,95	376,51	365,19	371,24
Massa de produto úmido, kg	415	423	418	436
Massa de água evaporada, kg	230,34	223,17	213	227,60
Porcentagem de impureza final, (%)	2,33	2,17	1,85	1,91
Quant. de água removida (pontos percentuais), %	48,75	46,38	44,42	45,75

Quadro 34 - Resumo dos resultados da análise de eficiência energética para a secagem de café no terreiro suspenso.

Parâmetros	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
Teor de água inicial, % b.u.	64,65	55,09	54,70	57,90
Teor de água final, % b.u.	11,44	11,04	11,12	11,02
Massa específica aparente inicial, kg·m ⁻³	432,81	417,65	459,54	429,81
Massa específica aparente final, kg·m ⁻³	350,48	339,52	382,31	355,20
Massa de produto úmido, kg	360	387	364	368
Massa de água evaporada, kg	216,30	191,62	178,48	193,88
Porcentagem de impureza final, (%)	1,19	1,38	1,22	1,12
Quant. de água removida (pontos percentuais), %	53,21	44,05	43,58	46,88

6. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, para as condições experimentais em que foi realizado este estudo, pode-se concluir:

6.1. SISTEMA DE SECAGEM

O sistema proposto possibilitou condições adequadas de temperatura e vazão de ar para que a secagem do café fosse completada satisfatoriamente.

A automação do gaseificador possibilitou um ótimo controle da temperatura, não apresentando variações bruscas e se mantendo dentro da faixa estabelecida desde o início até o fim da secagem, o que foi fundamental para a manutenção da qualidade do

café. O comportamento constante apresentado ao longo dos testes de secagem e o baixo consumo de combustível tiveram grande influência no consumo de energia.

A temperatura da massa de grãos não excedeu os limites estabelecidos para o café, de acordo com a literatura consultada.

6.2. QUALIDADE DO CAFÉ

A secagem realizada utilizando o sistema de secagem se mostrou viável quanto à qualidade da bebida do café, uma vez que o café seco apresentou bons resultados referente à massa específica, condutividade elétrica, lixiviação de potássio, cor, dentre outros parâmetros, indicando que não houve comprometimento da qualidade final da bebida.

Observaram-se maiores valores para condutividade elétrica e lixiviação de potássio para o café seco utilizando o sistema proposto e nos terreiros de concreto, em comparação com o café seco nos terreiros suspensos. Todavia, esses valores mais elevados não comprometeram a qualidade do café quanto à classificação da bebida.

Observou-se que a classificação quanto à bebida do café seco no sistema de secagem e no terreiro suspenso foi superior à obtida pelo café seco no terreiro de concreto, indicando uma perda de qualidade do café seco nesse tipo de terreiro, devido ao contato com o piso molhado, decorrente das chuvas durante o período de secagem.

6.3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética do sistema de secagem foi semelhante à das fornalhas tradicionalmente utilizadas para secagem de café. No entanto, o consumo específico de energia devido ao uso do gaseificador para secagem do café foi muito menor, ou seja, com a secagem no sistema observou-se que é necessário fornecer menos energia para remover um quilograma de água em comparação com outros sistemas.

A eficiência energética média global do sistema foi de 53,58%, apontando para necessidade de otimização do sistema.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para trabalhos futuros, observa-se a necessidade de pesquisas no sentido de tornar a alimentação de combustível no reator de gaseificação automática, o que reduziria consideravelmente a necessidade de mão-de-obra. Expandir a aplicação desse

sistema automatizado para outras finalidades também é possível como, por exemplo, para desumidificação de aviários, em substituição às fornalhas tradicionais.

Apesar de ter sido feito um bom isolamento do sistema quanto à perda de calor, observa-se que ainda é grande a perda de calor para o ambiente, indicando a necessidade de estudos posteriores para aperfeiçoar o isolamento térmico. O sistema de secagem proposto pode ser utilizado para secagem de outros tipos de grãos, apresentando grande versatilidade.

O sistema de secagem utilizando a automação do gaseificador propiciaria condições favoráveis para secagem de maior quantidade de produto úmido, desde que se aumente o tamanho do reator de gaseificação e se faça os devidos ajustes na automação.

O sistema de secagem desenvolvido através deste trabalho se mostrou viável quanto à secagem de café, uma vez que o café seco neste sistema teve sua qualidade mantida, o que resultou em boa classificação quanto à bebida. Portanto, torna-se mais uma opção para pequenos e médios produtores de café da região da Zona da Mata Mineira no momento de escolher o método mais adequado para secagem, de acordo com sua necessidade.

Sugere-se o uso e adequação do sistema para outros tipos de biomassas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 8293: **Determinação de umidade.** Rio de Janeiro, 1983. 6p.

AMORIM, H.V.; LEGENDRE, M.G.; AMORIM, V.L.; ANGELO, A.J.S.; ORY, R.L. **Chemistry of Brazilian green coffee and the quality of the beverage: VII., total carbonyls, activity of polyphenol oxidase, and hydroperoxides.** Turrialba, San José, v.26, n.2, p.193-195, 1976.

AMORIM, H.V. **Aspectos bioquímicos e histoquímicos do grão de café verde relacionados com a deterioração de qualidade.** Piracicaba: ESALQ, 1978. 85p. (Dissertação de LivreDocência).

BAKKER-ARKEMA, F.W., LEREW, L.E., BROOK, R.C., BROOKER, D.B. **Energy and capacity performance evaluation of grain dryers.** St. Joseph, Michigan, ASAE, 1978. 13p. (ASAE Paper, 78-3523).

BOLDUC, F. **Development of a natural convection drier for on-farm use in developing countries.** Manhattan: Kansas State University, 1978. 99 f. (M.S. Thesis) – Kansas State University, Manhattan.

BORÉM, F. M.; REINATO, C. H. R.; CANDIANO, C. A.; FARIA, L. F.; SILVA, P. J. **Processamento do café verde descascado I; aspectos técnicos e econômicos.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 30., 2004, São Lourenço. Anais... São Lourenço: MAPA/PROCAFÉ, 2004. v.1, CD-ROM.

BORÉM, F. M. **Pós colheita do café.** Lavras: UFLA, 2008. 630p.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. **Regras para análise de sementes.** Brasília, 2009. 398 p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 8, de 11 de junho de 2003.** Regulamento técnico de identidade e de qualidade para a classificação do café beneficiado grão cru. 2003. 11p.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 16, de 24 de maio de 2010.** Regulamento técnico para Café Torrado em grão e Café Torrado e Moído. 2010. 10 p.

BRASIL. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.** Informe estatístico do café. Brasília: DCAF. 2009. Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br> >. Acesso em: 24 de abril de 2012.

BROOKER, D.B.; BARKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Dryng cereal grains.** Conneceticut, the AVI Publishing, 1979. 269p.

CACCER. **Protocolos para análise sensorial de café, metodologia SCAA.** Fev. 2005. Disponível em: www.cafedocerrado.org. Acesso em 04/set./2009.

CAMARGO, C.A. (Coord). **Conservação de energia na indústria de açúcar e do álcool.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990. (Publicação IPT, 1817).

CAMPOS, A.T. **Desenvolvimento e análise de um protótipo de secador de camada fixa para café (Coffeearabica L.), com sistema de revolvimento mecânico.** Viçosa-MG: UFV, 1998. 61 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1998.

CARVALHO, V. D.; CHAGAS, S. J. R.; SOUZA, S. M. C. **Fatores que afetam a qualidade do café.** Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 18, n. 187, p. 5-20, 1997.

CORADI, P.C. **Alterações na qualidade do café cereja natural e despulpado submetidos a diferentes condições de secagem e armazenamento.** Lavras, 2006. 75p. (Dissertação de Mestrado) Universidade Federal de Lavras.

CORRÊA, P. C. et al. **Efeito da temperatura de secagem na cor dos grãos de café pré-processado por “via seca” e “via úmida”**. Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, n. 5, p. 22-27, 2002. Edição Especial Café.

DE GRANDI, A.M.; **Avaliação da eficiência de secagem de café (Coffea arabica L.), em secador de camada fixa vertical com revolvimento mecânico**. Viçosa, MG. 1999. 73 p. (Dissertação Mestrado). Universidade Federal de Viçosa.

DELLA LUCIA, S. M. et al. **Expectativa gerada pela embalagem sobre a aceitabilidade de iogurte sabor morango**. In: Congresso Nacional de Laticínios, 23, 2006, Juiz de Fora-MG. Anais... Juiz de Fora – MG

DIOS, C.A. **Secado de granos y secadoras**. Santiago, Chile: Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, 1996. 314p.

DESCAMPS, C.; BOUALLOU, C.; KANNICHE, M.; **Efficiency of an Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) power plant including CO₂ removal**. Energy, volume 33, pg. 874 – 88. Elsevier, 2008.

DONZELES, S.M.L. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema híbrido, solar e biomassa, para secagem de café (Coffea arabica L.)**. Viçosa-MG: UFV, 2002. 134 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2002.

EMBRAPA CAFÉ. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária**. Disponível em: <http://www.sapc.embrapa.br/>. Acesso em 20 de junho 2012.

FRANCIS, F.J. **Color quality evaluation of horticultural crops**. Hort science, v. 15, n. 1, p. 58-59, 1975.

GARRUTI, R.; TEIXEIRA, C. G.; SCHMIDT, N. S.; JORGE, J. P. N. **Influência da colheita e preparo do café sobre a qualidade da bebida**. Bragantia, Campinas, v. 20, n. 25, p. 653-657, 1961.

GUIDA, V.F.A.A.; VILELA, E.R. **Influência do fluxo de ar e do período de descanso na secagem do café (Coffeearabica L.) despulpado em secador experimental de camada fixa.** Ciênc.eAgrotec., Lavras,v.20, n.2, p.232-237, Jun, 1996.

HALL, C.W. **Drying and storage of agricultural crops.** Westport: The AVI Publishing Company, 1980. 382 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DO CAFÉ - IBC. **Cultura de café no Brasil: manual de recomendações.**5.ed. Rio de Janeiro, Gráfica IBC - GERCA, 1985. 580p.

ISQUIERDO, E. P. **Secagem e qualidade do café cereja desmucilado submetido a diferentes períodos de repouso.** 2008. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2008.

ISQUIERDO, E.P.; BORÉM, F.M.; OLIVEIRA, P.D.;TAVEIRA, J.H.S.; DIAS, E.C. **Taxa de redução de água e tempo de secagem do café cereja desmucilado submetido ao parcelamento da secagem.** Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, Especial Café, n.11, p.37-44, 2009.

KRZYZANOWSKI, F.C.; FRANÇA NETO, J.B.; HENNING, A.A. **Relato dos testes de vigor para as grandes culturas.** Informativo ABRATES, v.1, n.2, p.15-50, 1991.

LACERDA FILHO, A.F. **Avaliação de diferentes sistemas de secagem e suas influências na qualidade do café (CoffeearabicaL).** Viçosa, MG, UFV, Imprensa Universitária, 1986. 136p. (MS).

LASSERAN, J.C. **Combustíveis e geradores de ar quente.** Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, v. 4, n. 2, p. 75-88, 1979.

LINGLE, T. R. **The coffee cupper's handbook: systematic guide to the sensory evaluation of coffee's flavor.** 3. ed. Long Beach – California, EUA: Specialty Coffee Association of America, 2001. 71 p.

LITTLE, A.C. **Off on a tangent.**Journal of Food Science, v. 40, p. 410-411.1975.

LORA, E.E.S. et al. Gaseificação. In: CORTEZ, L.A. B; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. 2. ed. Campinas- SP: Editora da Unicamp, 1997. Cap. 9 p. 241-332.

LORA. E. S., ANDRADE, R. V. **Biomass as energy source em Brazil**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, n.13.p.180-191, 2009.

LOZANO, R. D. **El color y sumedición**. Buenos Aires: Américalee, 1978. 640 p.

MAGALHÃES, EDNEY A. **Desenvolvimento e análise de uma fornalha para aquecimento direto e indireto de ar utilizando biomassa polidispersa**. Viçosa, MG, UFV, 2007. 213p. (Tese DS).

MARTIN, S.; SILVA, J. N.; TINOCO, I. F. F.; VIEIRA, A. C.; ZANATTA, F. L.; Melo, L. D. **Projeto e construção de um gasificador de biomassa de fluxo concorrente**. Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, v.14, n.4, 238- 249 Out./Dez, 2006.

MAZZAFERA, P.; GUERREIRO, F. O.; CARVALHO, A. Estudo de coloração verde do grão de café: **Determinação de flavonóides e clorofilas**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 11., 1984, Londrina. Anais... Rio de Janeiro: MIC/IBC, 1984. p. 178-181.

MELO, M.; FAZUOLI, L. C.; TEIXEIRA, A. A.; AMORIM, H. V. **Alterações físicas, químicas e organolépticas em grãos de café armazenados**. Ciência e Cultura, v.32, n.4, p.468-471, 1980.

McGUIRE, R.B. **Reporting of objective color measurements**. Hortscience, v. 27, n. 12, p. 1254-1255. 1992.

MONTEIRO, M. A. M. D. S. **Caracterização sensorial da bebida de café (Coffea arabica L.): análise descritiva quantitativa, análise tempo-intensidade e testes afetivos**. Viçosa, 2002. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal de Viçosa.

NELLIST, M.E., BRUCE, D.M. **Grain dryer testing-procedure, calculation and adjustment of results, and effect of errors.**Journal of Agricultural Engineering Research, Silso e Research Institute, v.52, n.1, p.35-51, 1992.

NOBRE, G.W. **Alterações qualitativas do café cereja descascado durante o armazenamento.** 2005. 124p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.

OCTAVIANI, J. C. **Secagem de café cereja descascado desmucilado com utilização de gás liquefeito de petróleo.** 2000. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

OLIVEIRA, G.A.; VILELA, E. R.; BORÉM, F. M.; PEREIRA, R. G. F. A.; ANDRADE, E. T. **Efeito de diferentes graus de maturação do café (Coffea arábica L.) e diferentes temperaturas de secagem na qualidade.** In: SIMPÓSIO DE PESQUISAS DOS CAFÉS DO BRASIL, 2., 2001, Vitória, ES. Anais... Vitória, ES: IBC, 2001, p. 864-871.

OLIVEIRA, M.D. M; VEIGA FILHO, A.A.; VEGRO, C.L.R.; MATTOSINHO, P.S.V. **Análise de custos, rentabilidade e de investimentos na produção de café cereja descascado: estudo de caso.** XLIII Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural – SOBER. Ribeirão Preto/ SP, 2011.

OSÓRIO, A.G.S. **Projeto e construção de um secador intermitente de fluxo concorrente e sua avaliação na secagem de café.** Viçosa, Universidade Federal de Viçosa. 1982. 57p. (Tese MS).

PARIKH L, CHANNIWALA S. A., GHOSAL G. K. 2005. **A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels.** Fuel, V.84, p. 487-494.

PARIKH L, CHANNIWALA S. A., GHOSAL G. K. 2007. **A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials.** Fuel, V.86, p. 1710-1719.

PAYNE, V. W. E; DONALD, J. O. **Poultrywaste management and environmental protection manual**. Alabama: AuburnUniversity, CooperativeExtensive Service, 1991. 50p.

PIMENTA, C.J; VILELA, E.R. **Composição microbiana e ocratoxina a no café (coffeaarabica L.) Submetido a diferentes tempos de espera antes da secagem**. Revista Ciênc. Agrotec. v. 27,n.6, p.1315-1320, 2003.

PUROHIT P. 2009. **Economic potential of biomass gasification projects under clean development mechanism in India**. JournalofCleanerProduction, v.17, p.181-193.

REINATO, C.H.R.; BORÉM, F.M.; CARVALHO, F.M.; PEREIRA, R.G.F.A. **Avaliação técnica, econômica e qualitativa do uso da lenha e do GLP na secagem do café**. Revista Brasileira de Armazenamento, Viçosa, Especial Café, n.7, p.3-9, 2003a.

REZENDE, O. L. T. **O uso da lógica Fuzzy no controle das temperaturas na zona de combustão do gaseificador e do ar quente de exaustão do conjunto gaseificador/combustor de biomassas**. Viçosa, MG, UFV, 2012. 145p. (Tese DS).

ROSSI, S.J.; ROA, G. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural**. São Paulo: Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 1980. 295 p.

SANTOS, R.R. **Modificação e avaliação de um secador rotativo horizontal, com distribuição radial do fluxo de ar, para secagem de café**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 62p. 2002.

SANTOS, W. R. **Controle e avaliação de um conjunto gaseificador-combsutor de fluxo concorrente, utilizando como combustível a biomassa da lenha de eucalipto**. Viçosa: UFV, 2008, 67p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa.

SHARMA A. K. 2009. **Experimental study on 75 kWth downdraft (biomass) gasifier system.** Renewable Energy, v.34, p.1726-1733.

SILVA, J.S., AFONSO, A.D.L., LACERDA FILHO, A.F. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. In: SILVA, J.S., Pré-processamento de produtos agrícolas,** Juiz de fora - MG, Instituto Maria, p.395 - 461, 1997.

SILVA, J.S., LACERDA FILHO, A.F. **Construção e operação de secador de grãos.** Viçosa: Imprensa Universitária, 1999. 28p. (Boletim de Extensão, 34).

SILVA J. N., CARDOSO SOBRINHO J., SAIKI E. T. **Utilização de biomassa na secagem de produtos agrícolas via gaseificação com combustão adjacente dos gases produzidos.** Engenharia Agrícola, v.24, n.2, 2000. doi: 10.1590/S0100-69162004000200020 .

SIQUEIRA, H. S.; ABREU, C. M. P. **Composição físico-química e qualidade do café submetido a dois tipos de torração e com diferentes formas de processamento.** Ciência e Agrotecnologia, Lavras-MG, v. 30, n. 1, p. 112-117, 2006.

SOBRINHO, J. C.; SILVA, J. N.; LACERDA FILHO, A. F. **Secadores rotativos horizontais e vertical de fluxos cruzados na secagem de café: Análises energética e de qualidade.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.23, n.2, p.388-397, 2003.

TOLEDO, F.F.; MARCOS FILHO, J. **Manual de sementes: tecnologia de produção.** São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1977. 224 p.

THOMAZIELLO, R.A.; OLIVEIRA, E.D.; TOLEDO FILHO, J.A.; COSTA, T.E. **Cultura do Café.** Boletim Técnico CATI, Campinas, n.193, p.52-55. 1999.

VIEIRA, A.C. **Gaseificação de briquetes de casca de eucalipto.** 2005. p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

VILELA, E.R. **Secagem e qualidade do café.** Informe Agropecuário, Belo Horizonte, v. 18, n.187, p.55-67, 1997.

WEBER, L.; KLEIN, P. A. T. **Aplicação da Lógica Fuzzy em Software e Hardware.** Canoas: Ed. ULBRA, 2003.

ZANATTA F. L., SILVA J. N., TINÔCO I. F. F., OLIVEIRA FILHO D., MARTIN S. 2011. **Avaliação do conforto térmico em aviário aquecido com gaseificador de biomassa.** Engenharia na Agricultura, v. 16, p.270-284.