

CRISTIANE PIRES SAMPAIO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SECADOR COM REVERSÃO DO FLUXO
DE AR E COM SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO PNEUMÁTICA DE
GRÃOS**

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

**VIÇOSA
MINAS GERAIS- BRASIL
2004**

CRISTIANE PIRES SAMPAIO

DESENVOLVIMENTO DE UM SECADOR COM REVERSÃO DO FLUXO DE AR
E COM SISTEMA DE MOVIMENTAÇÃO PNEUMÁTICA DE GRÃOS

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

APROVADA: 31 de março de 2004.

Prof. Adílio Flauzino de Lacerda Filho
(Conselheiro)

Prof. José Helvécio Martins
(Conselheiro)

Prof. Roberto Precci Lopes
(UFRRJ)

Sérgio Maurício Lopes Donzeles
(EPAMIG)

Prof. Juarez de Sousa e Silva
(Orientador)

*De sua existência restam comigo o exemplo de humildade e o eterno agradecimento. Sinto neste momento seu peito pleno de orgulho e seus olhos banhados de pura emoção. Sinto sua presença, ouço seus aplausos. Poderia dizer-lhe tanta coisa, mas me calo. Só o silêncio pode dizer o que sinto: **um amor enorme e uma intensa saudade!***

*Ao meu pai **Daniel Souto Sampaio***

DEDICO

*À minha avó **Dona Matilde Souto Sampaio***

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela acolhida e oportunidade de realização deste trabalho.

Ao Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café (CBP&D-café) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

Ao Professor Juarez de Sousa e Silva, pela orientação, pelo estímulo, pela atenção, dedicação e amizade.

Aos Conselheiros Prof. Adílio Flauzino de Lacerda Filho e José Helvécio Martins, pelas valiosas sugestões e pela colaboração.

Ao Prof. Dudu e ao Sr. Edson pela colaboração e boa vontade no fornecimento da matéria-prima para a realização deste trabalho

À minha mãe, pela vida, pelo exemplo de coragem, pelo apoio e entusiasmo durante toda a minha vida.

Ao meu irmão, pelo carinho, pelo orgulho, pela admiração e confiança.

Ao meu noivo Agnaldo, pelo companheirismo e pela cumplicidade.

À minha estagiária Roberta Martins Nogueira, pelos momentos de ajuda e pela certeza da amizade sincera.

À minha amiga Marise Cota Machado, pelos incentivos, amizade sincera e profissionalismo.

Aos amigos e colegas de curso, Juan José, Catalunha, Éster, Stella, Ana Elisa, Alisson, Roberta, Willians, Júlio, Ivanildo pela companhia e ajuda em todos os momentos.

Aos funcionários e amigos Zé Baixinho, Ihame, Catitu, Edson, Silas, Juquita e Geraldinho, pela colaboração no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores do Departamento de Engenharia Agrícola, pela acolhida.

A todos que, de alguma forma, deram sua parcela de contribuição a este trabalho.

BIOGRAFIA

Cristiane Pires Sampaio, filha de Daniel Souto Sampaio e Maria Aparecida Pires Sampaio, nasceu em Guaxupé, sul de Minas Gerais, no dia 8 de julho de 1974.

Em março de 1993, iniciou o Curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, MG, colando grau em dezembro de 1997.

Em março de 1998, iniciou o Programa de Mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG na área de Armazenamento e Processamento de Produtos Vegetais, onde se submeteu à defesa de tese em fevereiro de 2000. Em março de 2000, iniciou o curso de Doutorado na Universidade Federal de Viçosa. Ainda durante esse período, foi bolsista do Consórcio Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento do Café (CBP&D-café), prestando serviços no projeto de difusão de tecnologia em cafeicultura. Para obtenção do título de ***Doctor Scientiae***, submeteu-se à defesa de tese em abril de 2004.

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE QUADROS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
RESUMO.....	xii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. O café.....	5
2.2. Preparo do café.....	7
2.3. Secagem.....	9
2.3.1. Secagem artificial em terreiro.....	12
2.3.2. Secagem em secadores mecânicos	14
2.3.3 Secagem a alta temperatura	15
2.3.4. Secagem em baixas temperaturas	19
2.4. Avaliação de secadores.....	21
2.5. Avaliação energética dos sistemas de secagem.....	22
2.6. Propriedades e características físicas dos frutos de café.....	24
2.7. Sistema pneumático.....	28
3. MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1. O secador	35
3.2. Funcionamento do secador.....	38
3.3. Matéria-prima.....	42
3.4. Pré-secagem.....	43
3.5. Planejamento experimental.....	44
3.6. Fornalha.....	46

3.7. Instrumentação do secador.....	46
3.8. Dados experimentais.....	50
3.8.1. Características do material transportado.....	50
3.8.2. Medidas de pressão.....	50
3.8.3. Sistema de ventilação.....	51
3.8.4. Determinação das características do sistema de transporte.....	51
3.8.5. Avaliação do desempenho do secador.....	53
3.8.6 Consumo de energia.....	53
3.8.7. Classificação do café.....	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	55
4.1. Características do sistema pneumático.....	55
4.2. Características dos grãos no processo experimental.....	56
4.3. Características do ar e dos grãos no processo experimental.....	58
4.4. Curvas de secagem.....	64
4.5. Consumo de energia.....	68
4.6. Qualidade.....	70
5. RESUMO E CONCLUSÕES	72
5.1. Sugestões.....	74
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
APÊNDICE.....	82

LISTA DE QUADROS

	Página
1. Posição das sondas termoeletricas no secador.....	47
2. Valores médios de peso, velocidade terminal (VT), massa específica real () e esfericidade () de frutos de café com diferentes teores de umidade (TU).....	50
3. Características do sistema pneumático.....	56
4. Massa inicial e final, peso hectolítrico, teor de umidade médio dos grãos e tempo de secagem.....	57
5. Temperaturas médias do ar de secagem, do ar de exaustão e do ambiente e umidades relativas médias do ar de secagem, exaustão e do ambiente.....	59
6. Temperaturas do ar no <i>plenum</i> , do ar* e da massa de café.....	60
7. Tempo de secagem, massa inicial e consumo de energia.....	68
8. Resultados da classificação de bebida dos lotes de café.....	70

LISTA DE FIGURAS

	Página
1. Fluxograma de pré-processamento do café (SOUZA e CARVALHO, 1997).....	9
2. Causas da fricção durante o transporte pneumático.....	30
3. Secador de café com sistema de transporte pneumático.....	36
4. Detalhe do formato da câmara de secagem e do registro do direcionamento do fluxo de ar para secagem ou movimentação (a); detalhe da câmara de secagem com café natural (b); café cereja descascado (c).....	38
5. Vista lateral do secador pneumático e do posicionamento dos registros para direcionamento do fluxo de ar para secagem ou movimentação dos grãos.....	39
6. Vista da câmara de descanso 2 e do registro para direcionamento do fluxo de grãos para câmara de secagem ou movimentação dos grãos....	39
7. Fluxo de ar e grãos no abastecimento do secador.....	41
8. Fluxo de ar durante a secagem	41
9. Fluxo de ar e movimentação dos grãos no abastecimento do secador....	42
10. Pré-secagem do café natural e do cereja descascado recém-saídos do lavador	43
11. Pré-secagem em terreiro-secador com monitoramento da temperatura da massa de café	44

12. Cronograma do planejamento experimental realizado.....	45
13. Vista geral e corte longitudinal da fornalha a carvão vegetal e do ciclone	46
14. Detalhes do posicionamento dos sensores de temperatura na massa de grãos (Temperatura na massa de grãos – superior 1 / superior 2 / superior 3 /superior 4)	47
15. Vista do secador para café com sistema pneumático e sistema de aquisição de dados (sondas termoeletricas).....	48
16. Sonda termoeletrica para medição da temperatura do ar de exaustão.....	48
17. Termohigrômetro digital para caracterizar as condições do ambiente	49
18. Microcomputador com o sistema de aquisição de dados <i>LR.COM</i>	49
19. Detalhe do ventilador acoplado à tubulação de transporte	51
20. Variações da temperatura para o teste 1 (café natural)	61
21. Variações da temperatura para o teste 2 (café natural).....	61
22. Variações da temperatura para o teste 3 (café natural).....	62
23. Variações da temperatura para o teste 4 (café descascado).....	62
24. Variações da temperatura para o teste 5 (café descascado).....	63
25. Variações da temperatura para o teste 6 (café descascado).....	63
26. Curva de secagem para o café natural com movimentação dos grãos a cada uma hora (teste 1).....	65
27. Curva de secagem para o café natural com movimentação dos grãos a cada uma hora (teste 2).....	65
28. Curva de secagem para o café natural com movimentação dos grãos a cada uma hora (teste 3).....	66
29. Curva de secagem para o café descascado com movimentação dos grãos a cada uma hora (teste 4).....	66
30. Curva de secagem para o café descascado com movimentação dos grãos a cada uma hora (teste 5).....	67
31. Curva de secagem para o café descascado com movimentação dos grãos a cada uma hora (teste 6).....	67
32. Consumo específico de energia elétrica e de combustível (carvão).....	69
33. Comparação do consumo específico de energia elétrica e de combustível (carvão), fazendo-se a movimentação do produto com ar aquecido e natural	70

34. Nova estrutura do secador com sistema pneumático para café.....	97
---	----

RESUMO

SAMPAIO, Cristiane Pires, D.S., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2004.
Desenvolvimento de um secador com reversão do fluxo de ar e com sistema de movimentação pneumática de grãos. Orientador: Juarez de Sousa e Silva. Conselheiros: Adílio Flauzino de Lacerda Filho e José Helvécio Martins.

Um dos processos mais importantes relativos ao preparo dos grãos para a preservação de sua qualidade durante a armazenagem é a secagem. A utilização de secadores mecânicos apresenta diversas vantagens em relação ao terreiro. Os transportadores pneumáticos movem os grãos, empregando-se uma corrente de ar em alta velocidade, através de um sistema de tubulação hermético e podem transportar o produto em qualquer direção, incluindo trajetos curvos. Foram objetivos deste trabalho a elaboração, a construção e a avaliação de um novo modelo de secador para café. Por meio de um sistema pneumático, foi possível a otimização do processo utilizando um único ventilador para o abastecimento, a

secagem, a movimentação e a descarga do produto. Na avaliação foram conduzidos três testes para cada tipo de café. Nos testes realizados com café natural, a secagem teve duração de 11,5 horas para o teste 1, 10,3 horas para o teste 2 e 9,6 horas para o teste 3. A massa de café com umidade inicial de $24,6 \pm 1,8\%$ b.u. alcançou a umidade ideal para armazenamento de $11,9 \pm 1,3\%$ b.u. nos testes realizados. Em se tratando do café descascado, a secagem teve duração de 14,0 horas para o teste 4, 12,5 horas para o teste 5 e 12,2 horas para o teste 6. A massa de café com umidade inicial média de $33,9 \pm 2,1\%$ b.u. alcançou a umidade ideal para armazenamento com $12,0 \pm 1,5\%$ b.u. O consumo específico de energia real médio observado no secador estudado foi de $32.941 \text{ kJ.kg}^{-1}$ de água evaporada para café natural e $15.243 \text{ kJ.kg}^{-1}$ para café cereja descascado. Utilizando-se o novo sistema de secagem, foi obtido um café de boa qualidade. O café natural foi classificado como tipo 6, e o café cereja descascado, como tipo 4.

ABSTRACT

SAMPAIO, Cristiane Pires, D.S., Universidade Federal de Viçosa, April of 2004.
Development of a dryer with reversion of the flow of air and with system of pneumatic movement of grains. Adviser: Juarez de Sousa e Silva.
Committee members: Adílio Flauzino de Lacerda Filho e José Helvécio Martins.

One of the relative more important processes to the prepare of the grains for the preservation of your quality during the storage is the drying. The utilization of mechanical dryers introduces several advantages regarding terrace. The pneumatic transporter move the grains, employing itself a draft in high speed, through a system of hermetic piping and can transport the product in any direction, including curved courses. They were objective of this work the elaboration, the construction and the evaluation of a new dryer model for coffee. Through pneumatic system it was possible the optimization of the process using an only fan for the supply, the drying, the movement and the discharge of the product. In the evaluation were led three tests for each kind of coffee. In the tests accomplished with natural coffee, the drying had duration 11,5 hour for the test 1, 10,3 hours for the test 2 and 9,6 hours

for the test 3. The coffee mass with initial humidity of $24,6 \pm 1,8\%$ b.u. it reached the ideal humidity for storage of $11,9 \pm 1,3\%$ b.u. in the accomplished tests. In caring for treating itself peeled coffee, the drying had duration 14,0 hour for the test 4, 12,5 hours for the test 5 and 12,2 hours for the test 6. The coffee mass with average initial humidity of $33,9 \pm 2,1\%$ b.u. it reached the ideal humidity for storage with $12,0 \pm 1,5\%$ b.u. The specific consumption of average real energy observed in the studied dryer belonged to $32.941 \text{ kJ.kg}^{-1}$ of water evaporated for natural coffee and $15.243 \text{ kJ.kg}^{-1}$ to peeled cherry coffee. Using itself the new drying system, it was obtained a good quality coffee. The natural coffee was classified as type 6, and the peeled cherry coffee, as type 4.

1. INTRODUÇÃO

A cultura do café no Brasil destaca-se por sua grande área de cultivo e por se tratar de um produto de exportação, apresentando, portanto, grande importância econômica.

Segundo COSTA et al. (2003), nos últimos dez anos, o Brasil colheu, em média, cerca de 27 milhões de sacas de café por ano. Minas Gerais é o maior estado produtor, com cerca de 51% da população nacional, seguido por Espírito Santo, com 17%; São Paulo, com 16%; e Paraná, com 7%. Também têm merecido atenção Bahia e Rondônia, estados que vêm se destacando na produção nacional. Em média, o Brasil exporta um volume anual de café entre 70 e 79 milhões de sacas, contribuindo com uma participação de 23% no mercado mundial. Logo em seguida vem a Colômbia, com 14% desse mercado. Juntos, Brasil e Colômbia produzem 42% do café existente no mercado mundial.

A retração do mercado para cafés de baixa qualidade levou os produtores brasileiros a se especializar na produção de café de alta qualidade, como vêm

demonstrando os produtores da Zona da Mata de Minas Gerais, que estão mudando radicalmente a maneira de produzir café no Brasil.

Os processos de preparo, secagem e armazenagem apresentam contribuições expressivas para a qualidade final do produto, sendo, portanto, muito importantes na escolha correta da infra-estrutura para atender à fase final de produção. Um dos processos mais importantes relativos ao preparo dos grãos para a preservação de sua qualidade durante a armazenagem é a secagem.

De acordo com SILVA et al. (2001), a secagem do café é, comparativamente, mais difícil de ser executada que a de outros produtos, em virtude de seu elevado teor de água inicial, geralmente próximo de 60% b.u. Com isso, a possibilidade de ocorrer fermentações durante a primeira fase de secagem é maior, causando redução na qualidade do produto.

Além do alto teor de água, o café difere dos demais grãos cultivados por ser um produto que apresenta certas peculiaridades, como a desuniformidade na maturação dos frutos, necessitando de cuidados e métodos específicos para a secagem.

A utilização de secadores mecânicos apresenta diversas vantagens em relação ao terreiro. Entretanto, se não forem bem dimensionados e utilizados, podem danificar o produto. Portanto, a construção de secadores de menor custo inicial, corretamente dimensionados, energeticamente mais eficientes e que propiciem produto de qualidade comercialmente aceitável deve ser vista como um grande esforço tecnológico para reduzir custos de secagem e aumentar a competitividade do café do Brasil no mercado internacional.

Os secadores mais utilizados para café são: o vertical de fluxo cruzado, com câmara de descanso; o cilíndrico rotativo; e o de camada fixa.

Um dos problemas encontrados no processo de secagem de café reside no fato de a operação ser realizada em secadores projetados para outros grãos e adaptados para café, resultando em alto custo operacional e em baixa eficiência energética. Um dos fatores mais importantes é a dificuldade de escoamento que o café apresenta no início da secagem, inviabilizando a utilização de secadores dotados de dispositivos normais de movimentação dos grãos. Recomenda-se, neste caso, a pré-secagem em terreiros, em secadores mecânicos rotativos ou nos secadores de leito fixo (PINTO FILHO, 1994).

O secador de leito fixo, modelo muito utilizado para a pré-secagem ou secagem de café, não dispensa revolvimento para a homogeneização do produto durante a secagem. Feita manualmente, a operação de revolvimento requer grande esforço físico, principalmente no início da secagem, quando o produto se encontra ainda com alto teor de umidade. Durante o revolvimento manual do produto no secador existe uma perda de energia, que é liberada para o ambiente no momento do revolvimento, e ainda o aumento no tempo aparente de secagem, o que pode diminuir o ganho econômico do produtor.

Para os secadores com revolvimento mecânico dos grãos, o aumento da velocidade da massa na câmara de secagem, segundo DALPASQUALE et al. (1991), melhora, em geral, a qualidade final do produto. No entanto, haverá aumento no consumo específico de energia e diminuição da eficiência do processo de secagem, uma vez que os grãos que passam pelo secador com maior velocidade perdem menos umidade por unidade de tempo.

Além dos aspectos anteriormente citados, os sistemas de movimentação dos grãos para carga, descarga e revolvimento dentro do secador podem dificultar a instalação do projeto, aumentar o trabalho e o custo de manutenção e encarecer desnecessariamente o secador.

Um sistema de transporte simples e de custo relativamente baixo é o transportador pneumático. Usado em unidades armazenadoras, esse tipo de transportador teve origem nos equipamentos de pressão utilizados para carga e descarga de navios graneleiros. Os transportadores pneumáticos movem os grãos, empregando-se uma corrente de ar em alta velocidade, através de um sistema de tubulação hermético e podem transportar o produto em qualquer direção, incluindo trajetos curvos. Outro aspecto interessante é seu uso como instalação fixa, a qual pode ser construída sem a necessidade de significativas mudanças estruturais.

Tendo em vista a vantagem do secador de camada fixa e a simplicidade do sistema de transporte pneumático, neste trabalho é proposto o desenvolvimento e a avaliação de um sistema de secagem para café que permita a movimentação do produto (carga, descarga e revolvimento) utilizando um único ventilador, que produzirá a movimentação dos grãos e a vazão do ar de secagem.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O café

O café é atualmente uma das mais importantes culturas de exportação do país. Por meio das divisas das exportações do café é que, no passado, foram constituídas as estradas de ferro, o setor de energia elétrica e os portos, ou seja, o impulso rumo à industrialização do Brasil pode ser atribuído ao café. Essas exportações chegaram a representar 80% do total mundial na década de 1920 e cerca de 70% na década de 1950. No entanto, essa participação foi sendo reduzida ao longo dos anos, estando atualmente em 32%, com 27,8 milhões de sacas exportadas no ano de 2002/03 (MATIELLI e RUGGIERO, 2003).

Da colheita ao armazenamento, os grãos de café passam por muitas operações; se mal executadas, elas podem influenciar negativamente algumas características desejáveis durante a fase de comercialização.

Para obtenção de café com qualidade comercial, aconselha-se que a colheita seja iniciada no momento em que a maioria dos frutos se encontrar no

estádio cereja. A quantidade aceitável de frutos verdes na planta é de 5%, sendo toleráveis quantidades de até 20%, com riscos de prejuízos para a qualidade (BARTHOLO e GUIMARÃES, 1997).

Segundo FREIRE e MIGUEL (1985), o café colhido precocemente, com grande percentual de frutos verdes, provoca prejuízo no tipo e na bebida, podendo também atingir um índice de 20% de perdas em relação ao rendimento final, além de prejudicar o aspecto, a torração e causar prejuízos, por demorar mais tempo no processo de secagem que os frutos maduros (cereja).

Respeitada a capacidade da infra-estrutura de processamento do café, a colheita deve ser realizada no menor intervalo de tempo possível, evitando que coincida com as floradas do novo ano agrícola.

De acordo com VILELA (1997), para a derriça do café no chão, é muito importante o manejo da operação, porque a deterioração ocorre em razão da temperatura, da umidade relativa e do tempo gasto na colheita. A alta concentração de açúcares, juntamente com o teor de água elevado da polpa e da mucilagem (70 a 90% b.u.), é condição apropriada para o desenvolvimento microbiológico e, conseqüentemente, das fermentações indesejáveis, com formação de sabores estranhos, que alteram a bebida.

A qualidade do café é um fator determinante do seu preço e imprescindível para a sua aceitação no comércio internacional. A explicação para se obter melhor qualidade de bebida do café, quando se processa o café cereja, está no fato de ser o estágio cereja a fase correspondente ao ponto ideal de maturação dos frutos, no qual a casca, a polpa e a semente

apresentam composição química adequada, proporcionando ao fruto o máximo de qualidade (CARVALHO e CHALFOUN, 1985).

Para VILELA (1997), um dos fatores importantes para a qualidade do café são os cuidados durante a pré e pós-colheita. Para obtenção de café de boa qualidade, é necessário cuidado especial no controle da temperatura da massa de grãos, principalmente a partir do momento em que o café passa a apresentar teor de umidade inferior a 35% b.u. No caso de teores de umidade inferiores a este valor, dependendo do sistema de secagem, há uma tendência de a temperatura da massa de grãos se igualar à temperatura do ar de secagem. Essa tendência é causada pela dificuldade de migração da umidade das camadas mais internas para a periferia dos grãos.

2.2. Preparo do café

Depois da separação de impurezas e lavagem, o café pode ser preparado via seca, que consiste na secagem do fruto integral em terreiro, em pré-secadores e em secadores mecânicos, ou, ainda, por via úmida, em que, antes da secagem, o café é descascado e pode ser submetido às operações de degomagem (parcial ou total) e lavagem. Quando o café descascado é seco com a mucilagem é denominado cereja descascado.

No preparo por via seca, obtém-se o café coco ou de terreiro. Dessa forma é processada, apesar de poucas exceções, a quase totalidade do café produzido no Brasil. Na lavagem ocorre a separação dos frutos de acordo com sua densidade, dependendo dos diferentes estádios de desenvolvimento ou dos diferentes teores de umidade. Os frutos verdes e cerejas (mais pesados) são separados dos frutos-bóia, que são leves. Por apresentarem tempo de

secagem diferente, essas duas frações devem ser secas separadamente, a fim de obter um produto final mais uniforme e de melhor qualidade.

O pré-processamento por via úmida dá origem aos cafés descascados e despulpados (lavados). Nos países conhecidos como produtores de cafés despulpados, o produto tem alcançado boas cotações no mercado, por ser, de maneira geral, de bebida suave. O processamento por via úmida é a forma indicada para regiões que apresentam problemas quanto à qualidade. (BARTHOLO e GUIMARÃES, 1997). Embora conhecido como produtor de café obtido por via seca, existem, no Brasil, condições ideais para a produção de cafés por via úmida, desde que haja abundância de água.

Segundo CHALFOUN e CARVALHO (1997), os cafés descascados e despulpados têm a vantagem de diminuir consideravelmente a área de terreiro e o tempo necessário para secagem. Para SILVA et al. (2001), o volume necessário de secadores, silos e tulhas também podem ser reduzido em até 60%. Essas vantagens devem-se à uniformidade e ao baixo teor de umidade, em torno de 50% b.u., em comparação com a secagem do fruto natural (coco). Uma maneira ideal de se trabalhar com o café pode ser determinada pelo fluxograma apresentado na Figura 1.

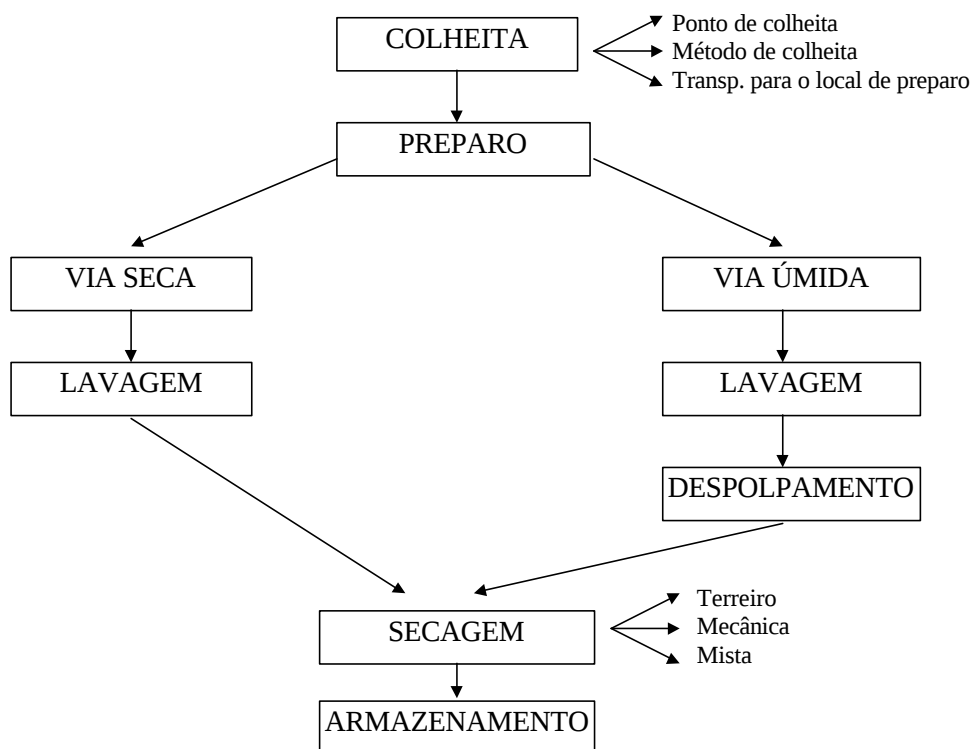


Figura 1 – Fluxograma de pré-processamento do café (SOUZA e CARVALHO, 1997).

2.3. Secagem

A secagem consiste na remoção da água livre contida nos grãos, depois do seu amadurecimento, até que estes atinjam um valor máximo de teor de umidade que possibilite o seu armazenamento sob condições de temperatura e umidade relativa ambiente, durante longo tempo, sem que ocorra sua deterioração. Admite-se que, em relação ao total de energia utilizada para a produção de café, a quantidade de energia gasta na operação de secagem possa ser superior a 60%.

TEIXEIRA e SANTINATO (1975) afirmam que, entre as operações de preparo de café, a secagem assume importância maior, uma vez que pode influenciar diretamente a qualidade da bebida e o aspecto final do produto.

Segundo SILVA et al. (2000), a secagem é um processo que envolve os fenômenos de transferência de calor e massa entre o produto e o ar que o

circunda, sendo a energia solar e a movimentação natural do ar entre os grãos responsáveis pela remoção de umidade do produto no campo.

De acordo com SILVA et al. (1992), para a escolha tecnicamente apropriada de uma unidade de secagem, é indispensável conhecer as características operacionais, a capacidade, a eficiência energética do sistema e a sua influência sobre a qualidade final do produto. Quando se consideram o alto custo da energia e o baixo preço dos produtos agrícolas, torna-se indispensável conhecer, pelo menos, o consumo específico de energia e a qualidade do produto depois da secagem. O custo inicial e a capacidade dinâmica não são suficientes para decidir sobre a aquisição de um sistema de secagem.

A racionalização do uso da energia necessária à operação de secagem de café poderá ser obtida por meio da utilização de equipamentos eficientes e tecnicamente apropriados ao sistema, empregando-se mão-de-obra especializada e conduzindo a operação de forma correta, para obtenção de um produto final de boa qualidade (LOPES et al., 2000).

No início da secagem, o café apresenta teor de umidade inicial bastante elevado, geralmente em torno de 60%. Com isso, a velocidade de deterioração em sua primeira fase de secagem é maior, causando redução na qualidade do produto. Deve-se, portanto, promover a sua secagem imediatamente depois da colheita e realizar o armazenamento em condições que permitam manter a qualidade do produto depois da secagem.

O processo de secagem pode ser classificado em natural e artificial. A secagem natural é caracterizada pela secagem do produto no campo, sem a interferência do homem. Já a secagem artificial é caracterizada pela utilização

de processos manuais ou mecânicos, com o uso de ventilação natural ou forçada. Como exemplo de secagem artificial com ventilação natural tem-se a secagem em terreiros, em secadores solares rotativos e outros. O processo de secagem com ventilação forçada é classificado, segundo DALPASQUALE (1983), de acordo com o aquecimento ou não do ar de secagem em:

1. secagem com ar natural não-aquecido;
2. secagem em baixa temperatura, na qual o ar é aquecido até 10 °C acima da temperatura ambiente;
3. secagem em alta temperatura, na qual o ar é aquecido a mais de 10°C acima da temperatura ambiente;
4. secagem com sistema combinado em que se utilizam dois métodos, ou seja, alta e baixa temperatura; e
5. seca-aeração.

Independentemente do método de secagem utilizado, devem ser ressaltados os seguintes aspectos para se obter êxito no processo pós-colheita do café:

1. Evitar fermentação indesejável durante o processo.
2. Evitar temperatura excessivamente elevada (o café tolera a temperatura do ar de secagem próximo a 40 °C por um ou dois dias, 50 °C por poucas horas e 60 °C por menos de uma hora sem se danificar).
3. Secar os grãos no menor tempo possível, até 18% b.u. de umidade.
4. Trabalhar com um produto que apresente uniformidade em coloração, tamanho e densidade.

2.3.1. Secagem artificial em terreiro

Este sistema de secagem artificial difere da secagem natural simplesmente pelo fato de o produto ser retirado da planta e depositado em locais próprios para esse tipo de secagem, denominado terreiro. A secagem em terreiro é uma operação que apresenta problemas causados pela variabilidade das condições climáticas. Mesmo assim, a grande maioria dos cafeicultores utiliza o terreiro como única etapa de secagem.

Segundo os levantamentos feitos pela FAEMG (1996), no Estado de Minas Gerais, menos de 17% dos cafeicultores possuem secadores em suas propriedades. A secagem de café utilizando energia solar em terreiros tem sido usada há vários anos e continuará sendo amplamente usada no país, não por ser a mais adequada ou econômica, mas por ser a técnica mais conhecida e exigir, aparentemente, pouco conhecimento técnico. No terreiro, o desenvolvimento de microrganismos na superfície dos frutos e o aumento da respiração e da temperatura do produto são fatores que aceleram o processo de fermentação; segundo SILVA et al. (2001), o uso exclusivo do terreiro deve-se à falta de informação tecnológica e, muitas vezes, à não-preocupação com as características qualitativas do produto depois da secagem, bem como ao baixo poder aquisitivo e ao baixo nível técnico da propriedade.

LACERDA FILHO (1986) avaliou terreiros com vários tipos de piso e mostrou que os diferentes materiais de construção podem exercer influência sobre a qualidade de bebida. O terreiro com piso de terra batida apresentou menor eficiência energética do que os terreiros construídos em concreto, tijolo e asfalto.

Algumas desvantagens podem ser consideradas na secagem em terreiro. Além de requerer tempo relativamente longo para completar a secagem, necessita de grande área para a sua construção, excessiva mão-de-obra e, muitas vezes, exposição do produto sob condições climáticas adversas, favorecendo o desenvolvimento de fungos e o processo de fermentação, que depreciam a qualidade (CAMPOS, 1998). Segundo BARTHOLO e GUIMARÃES (1997), os tempos médios para secagem completa em terreiro são de 15 dias para as condições do Sul de Minas, Alto Paranaíba e Triângulo Mineiro e de 25 dias para a Zona da Mata de Minas Gerais.

Visando contornar as dificuldades da secagem em terreiros convencionais, SILVA (2000) propôs uma adaptação no terreiro tradicional de cimento. Este sistema, estudado por DONZELES (2002) e chamado de terreiro híbrido ou terreiro-secador, nada mais é que um terreiro convencional, onde se adaptou um sistema de ventilação com ar aquecido por uma fornalha, para a secagem do café em leiras, na ausência de radiação solar direta ou em período chuvoso. O sistema proposto reduz o tempo de secagem de 20 para 5 dias (tempo médio de Viçosa - MG). No trabalho realizado por DONZELES (2002), o terreiro estudado, com 150 m², mostrou ser equivalente a um terreiro convencional de 600 m².

Uma prática recomendada é secar o café em terreiros ou pré-secadores até o estado de meia-seca (35 a 40%), sendo a secagem continuada em secador mecânico até o ponto de tulha ou, ainda, até que o teor de umidade caia para 22%, para que possa ser submetido a uma secagem complementar, em silos ventilados, durante o processo de armazenagem, até que atinja o teor de umidade ideal para comercialização (SILVA et al., 2003).

2.3.2. Secagem em secadores mecânicos

A secagem mecânica consiste em submeter o produto à ação de uma corrente de ar que atravessa a massa de grãos. De acordo com SILVA et al. (2001), a utilização de secadores mecânicos apresenta diversas vantagens em relação ao terreiro. O projeto e a construção de secadores energeticamente eficientes e que forneçam produto final de boa qualidade devem ser vistos como desenvolvimento tecnológico para reduzir o custo de secagem e aumentar a competitividade do café do Brasil no mercado internacional. De acordo com estes autores, a secagem mecânica do café pode ser executada sob altas ou baixas temperaturas ou de forma combinada. Em qualquer das opções, a secagem mecânica é reconhecidamente a mais viável para a obtenção de cafés de boa qualidade.

O café na forma “cereja” ou na forma “descascado ou lavado” apresenta dificuldade de escoamento no interior da maioria dos secadores mecânicos, principalmente quando se encontra muito úmido ou em virtude da presença da mucilagem.

SILVA et al. (2000) descrevem cinco tipos básicos de secadores, que são classificados quanto ao sentido de movimentação do ar e dos grãos: secadores de fluxos cruzados, secadores de fluxos concorrentes, secadores de fluxos contracorrentes, secadores de fluxos mistos (tipo cascata) e secadores de camada fixa.

Para BROOKER et al. (1992), os sistemas de secagem de grãos utilizados desde 1950 são mais evolutivos que revolucionários. Nesse sentido, esforços têm sido feitos para adaptar esses tipos de secadores à realidade socioeconômica dos produtores de café do Brasil (CORDEIRO, 1982;

OSÓRIO, 1982; SILVA e LACERDA FILHO, 1984; SABIONE, 1986; SILVA, 1991, 2000).

2.3.3. Secagem em alta temperatura

O processo de secagem em alta temperatura baseia-se na propriedade segundo a qual, aumentando-se a temperatura do ar úmido, a sua umidade relativa diminui e, conseqüentemente, sua capacidade de absorver umidade aumenta. Geralmente o ar é forçado a circular através do secador por meio de um ventilador. Depois de ter permanecido em contato com o produto, o ar sai do secador com temperatura mais baixa e com umidade relativa elevada.

Segundo SILVA et al. (2001), a temperatura máxima do ar que o café pode suportar, em um secador convencional de fluxo cruzado, é de 70 °C. Temperaturas mais elevadas são prejudiciais ao produto, uma vez que muitos grãos que não fluem adequadamente dentro do secador ficam supersecos, transformando a torrefação em um processo de difícil controle.

Em grandes propriedades, SILVA et al. (1992) afirmam que a secagem artificial com temperaturas elevadas é uma opção que tem dado bons resultados. Entretanto, o uso desses secadores tem ficado restrito às regiões de maior desenvolvimento agrícola, visto que o investimento inicial nesses equipamentos é inviável para os pequenos produtores rurais.

No passado, para a escolha de um sistema de secagem, o consumo de energia e a capacidade de secagem de um secador eram os parâmetros aos quais se dava maior ênfase na escolha do sistema. Atualmente, muitos trabalhos têm sido realizados visando a conservação e a racionalização do uso de energia, para reduzir os efeitos negativos dos secadores e dos métodos de

secagem sobre a qualidade final do café (CORDEIRO, 1982). Conforme SILVA et al. (1992), os parâmetros que afetam a taxa de secagem e o desempenho de secadores são: a temperatura e umidade relativa do ar ambiente; a temperatura e vazão do ar de secagem; as propriedades físicas do produto; os teores de umidade inicial e final do produto; o tipo e a fonte de energia; a velocidade dos grãos no secador; os sistemas de carga/descarga; e o tipo de ventilador.

CASTRO (1991) afirma que a temperatura e o tempo de secagem, o fluxo de ar e o preço do combustível influenciam diretamente o custo da energia na secagem. Ao estudar o efeito do despulpamento, em secador de leito fixo, no consumo de energia e na qualidade do café, esse autor concluiu que o intervalo de revolvimento não influi significativamente no consumo específico de energia. À mesma conclusão chegou DE GRANDI (1999), testando um secador vertical de camada fixa com diferentes intervalos de revolvimento mecânico. No secador de leito fixo, o ar de secagem movimentar-se da camada inferior para a superfície da massa de grãos. A troca de umidade entre o ar e o grão ocorre numa região denominada zona de secagem. Durante a secagem, desenvolvem-se dois gradientes: um de umidade e outro de temperatura, estabelecidos entre as camadas inferior e superior da massa de grãos (BROOKER et al., 1974).

LACERDA FILHO (1986), trabalhando com secagem de café em secador de leito fixo e utilizando temperatura do ar de secagem de 55 °C, concluiu que não houve comprometimento da bebida, sendo esta superior à dos produtos secos em terreiro com qualquer tipo de piso.

CAMPOS (1998) desenvolveu e analisou um protótipo de secador de leito fixo composto de quatro câmaras com sistema de revolvimento mecânico, para secagem de café. O autor trabalhou com café despulpado com teores de umidade inicial de 43,0% b.u. e final de 13,0% b.u. e temperatura de secagem de 43°C e obteve consumo específico de energia igual a 16.784 kJ por kg de água evaporada.

DE GRANDI (1999), ao avaliar a uniformidade da temperatura na massa de grãos e a uniformidade do teor de água dos grãos de café no secador desenvolvido por CAMPOS (1998), concluiu que a operação de revolvimento mostrou-se eficaz, reduzindo os gradientes de umidade e de temperatura da massa de café, e que o carvão vegetal utilizado como combustível para aquecimento do ar de secagem não afetou o “tipo” e “bebida” do café.

Nos secadores de fluxo cruzado, o ar de secagem atravessa a camada de grãos perpendicularmente ao sentido de seu deslocamento. PINTO FILHO (1994) desenvolveu e avaliou um protótipo de secador de fluxos cruzados com reversão do fluxo de ar e reaproveitamento do ar de resfriamento, para a secagem do café em coco, com teores de umidade inicial de 26,2% e final de 14,7% b.u. O autor obteve consumos de energia de 17.171, 10.656 e 9.197 kJ por kg de água evaporada para as temperaturas do ar de secagem de 60, 70 e 90 °C, respectivamente.

SABIONI (1986) relata que Converse projetou o primeiro secador comercial de fluxos cruzados, com reversão do fluxo de ar no meio da coluna de secagem e com recirculação do ar. Posteriormente, outros pesquisadores que utilizaram o mesmo sistema relataram uma redução no índice de

suscetibilidade a quebras e uma melhoria na eficiência de secagem do modelo, quando comparado com secadores originais.

Estudando a secagem intermitente de café, em secadores de fluxos cruzados e em secador experimental de camada fixa, VIEIRA (1994) observou menor tempo de secagem neste último, em relação aos secadores comerciais de fluxos cruzados.

Nos secadores de fluxos contracorrentes, o fluxo de ar atravessa a camada de grãos em sentido contrário ao do fluxo de grãos. Nos Estados Unidos, a secagem em fluxos contracorrentes é realizada em silos secadores e, nesse sistema, à medida que ocorre a secagem, o produto seco é conduzido para o centro do silo por um transportador helicoidal, que varre toda a seção transversal do silo (SILVA et al., 2000). Nos silos secadores de fluxos contracorrentes, à medida que a massa de grãos vai descendo, a sua temperatura é aumentada, atingindo valores muito próximos aos da temperatura do ar de secagem. As temperaturas de secagem, nesse tipo de secador, não devem ultrapassar 70 °C (BAKKER-ARKEMA et al., 1980).

Os secadores de fluxos contracorrentes, segundo Evans, citado por SILVA (1980), são os menos eficientes no uso da energia do ar de secagem, pois parte da energia é utilizada no aquecimento dos grãos, reduzindo-se a disponibilidade de energia para a realização da secagem. Entretanto, conforme BROOKER et al. (1978), se a espessura da camada de grãos for suficiente para absorver o potencial de secagem do ar, o consumo de energia, nesses secadores, torna-se relativamente baixo, podendo ficar entre 3.500 e 4.600 kJ por kg de água evaporada.

SILVA (1991), com o objetivo de promover a adaptação da tecnologia de secagem em fluxos contracorrentes à realidade brasileira, propôs um modelo de secador para a secagem de café. Na avaliação do modelo, o autor utilizou temperaturas de secagem de 60, 80 e 100 °C, tendo obtido consumo específico de energia de 8.300, 7.547 e 6.442 kJ por kg de água evaporada, respectivamente. Nesse trabalho, verificou-se que não houve efeito da temperatura sobre a qualidade da bebida, quando comparado à testemunha com secagem ao sol.

Nos secadores de fluxos concorrentes, o ar aquecido encontra o grão frio e úmido e fluem ambos na mesma direção e sentido, através da câmara de secagem. Segundo HAWK et al. (1978), todos os grãos são submetidos ao mesmo tipo de tratamento nesse tipo de secador. As trocas intensas e simultâneas de energia e massa, na entrada do secador, entre o ar e o produto causam rápida redução da temperatura inicial do ar, assim como no teor de umidade do produto. Em razão disso, a temperatura do produto permanece consideravelmente abaixo da temperatura do ar (SILVA et al., 2000).

A temperatura máxima do ar quente, em secadores de fluxos concorrentes, depende, em primeiro lugar, do fluxo de grãos através do secador e, em menor grau, do tipo de grão e do teor de umidade inicial (BAKKER-ARKEMA et al., 1981).

2.3.4.Secagem em baixas temperaturas

A secagem que utiliza o ar na temperatura ambiente (ou aquecido de 3 a 5 °C) forçado por um ventilador é energeticamente eficiente, sendo o produto final de boa qualidade. Os sistemas de secagem em baixas temperaturas

podem ser empregados para pequenas ou grandes produções e têm como pontos limitantes as condições ambientais e a velocidade de colheita do produto (DALPASQUALE, 1984). Para MEYER et al. (1978), a secagem com ar natural ou levemente aquecido é um dos sistemas mais utilizados, em virtude do baixo custo de investimento, do baixo custo operacional e da alta qualidade final do produto.

BAKKER-ARKEMA (1984) afirma que o processo de secagem em baixa temperatura é normalmente realizado em silo com fundo perfurado, no qual o produto é seco e armazenado ao mesmo tempo. O fluxo de ar mínimo recomendado e a profundidade máxima da camada de grãos no silo dependem do teor de umidade inicial do produto e das condições ambientais. É um processo lento que, se não for bem projetado e operado de forma correta, possibilita o desenvolvimento de fungos antes de o produto atingir o teor de umidade final desejado.

Sob condições climáticas semelhantes às de Viçosa-MG, é técnica e economicamente viável secar café cereja descascado ou despulpado com teor de umidade inicial de até 25% b.u. A maior vantagem da secagem com ar natural ou em baixa temperatura é que, além da economia substancial de energia e do aumento na capacidade de secagem dos secadores, o produto final apresenta coloração e teor de umidade bastante uniformes, propiciando boa torração (SILVA et al., 2000). Segundo SILVA et al. (2001), para solucionar possíveis problemas em decorrência das condições climáticas desfavoráveis e do elevado teor de umidade inicial, foram realizados alguns estudos empregando a técnica da secagem em combinação (alta temperatura na primeira fase e baixa na segunda) para a secagem de café. GUIMARÃES

(1995), adotando a secagem combinada, utilizou um secador em altas temperaturas para secagem do produto na faixa de teor de umidade em que ele foi mais eficiente e completou a secagem, no silo, com ar natural. Com isso, obteve redução no consumo de energia e segurança do processo de secagem. Entretanto, a utilização de secadores que possuem equipamentos tradicionais de transporte de grãos e que necessitam de certa fluidez do produto não é recomendada para o café quando este apresenta teor de umidade acima de 40 % b.u. Portanto, para a utilização do sistema de secagem combinada de café, é necessário, ainda, fazer uma pré-secagem em terreiro ou em secador de camada fixa antes de utilizar um secador mecânico, tradicional, para café (LACERDA FILHO, 1986).

2.4. Avaliação de secadores

Segundo SILVA et al. (1992), o desempenho de secadores varia de acordo com uma série de fatores, como: teor de umidade inicial e final do produto, propriedades físicas do produto, temperatura de secagem, resistência oferecida ao fluxo de ar, condições ambientais, tipo de fonte de energia, sistema de carga e tipo de ventilador.

NELLIST e BRUCE (1995) afirmam que o progresso da secagem em um secador com ar aquecido é afetado pelas interações entre diversas variáveis, algumas das quais sujeitas a consideráveis variações, que são incontroláveis. Condições ambientais, por exemplo, sofrem mudanças continuamente e contribuem, em parte, para as flutuações na temperatura do ar aquecido.

2.5. Avaliação energética dos sistemas de secagem

Segundo LACERDA FILHO (1998), em um cenário de alto custo de energia e baixos preços dos produtos agrícolas, torna-se indispensável considerar as relações entre o consumo de energia e as qualidades inerentes ao produto, antes e depois do processamento.

Até recentemente, o consumo de energia e a capacidade de secagem de um secador eram parâmetros a que se dava maior ênfase na escolha do sistema. Dessa forma, muitos trabalhos foram feitos com os objetivos únicos de conservação e racionalização do uso de energia (CORDEIRO, 1982). Atualmente, além dessa preocupação, os danos mecânicos causados ao produto pelos secadores e métodos de secagem, no que se refere à qualidade, têm sido assunto de importância entre pesquisadores, processadores e fabricantes de equipamentos.

Hall, citado por LACERDA FILHO (1998), definiu três expressões para a eficiência de energia nos processos de secagem: eficiência de combustível, eficiência térmica e eficiência de secagem. A eficiência de combustível é a razão entre a energia utilizada na evaporação da água e a energia fornecida ao sistema. A energia total corresponde à soma de energia para aquecer o ar, operar o secador, resfriar e movimentar o produto, a partir de determinadas condições iniciais. A eficiência térmica é a razão entre o calor utilizado na secagem e o calor fornecido, relacionando-se apenas o processo térmico.

SILVA (1991) trabalhou com secador de fluxos contracorrentes na secagem de café e utilizou temperatura do ar de secagem de 60, 80 e 100 °C, obtendo consumos específicos de energia de 8.300, 7.547 e 6.442 kJ.kg⁻¹ de água evaporada, respectivamente.

DE GRANDI (1999) avaliou um protótipo de secador de camada fixa para café despulpado com sistema de revolvimento mecânico, para diferentes intervalos de revolvimento e condições de secagem. Nos testes realizados com intervalos de revolvimento de 2, 3, 4, 5 e 6 horas, constatou-se que o secador apresentou consumo específico de energia de 27.645, 30.864, 29.510, 29.300 e 31.373 kJ.kg⁻¹ de água evaporada, respectivamente. Em todos os testes, a temperatura do ar de secagem na massa de café foi mantida próxima a 40 °C.

OSÓRIO (1982) e SILVA (1991) adaptaram a metodologia proposta por BAKKER-ARKEMA et al. (1978) para a avaliação do desempenho de secadores de café. Os autores tiveram dificuldades em fixar alguns parâmetros para a padronização dos testes, principalmente teor de umidade inicial e homogeneização de maturação dos produtos relacionados.

Em trabalhos realizados por PINTO (1993) com um secador intermitente de fluxos contracorrente/concorrente em temperaturas de 80, 100 e 120 °C, com café em coco, foram obtidos valores no consumo específico médio de energia de 6.068, 5.657 e 5.685 kJ.kg⁻¹ de água evaporada, respectivamente.

CARDOSO SOBRINHO (2001), avaliando um secador rotativo com capacidade de 15 m³ e temperatura do ar de secagem de 60 °C, utilizando café em coco, obteve valores do consumo específico de energia médio de 14.817, 16.211 e 19.946 kJ.kg⁻¹ de água evaporada para redução do teor de água de 39,0 para 11,0; 41,0 para 11,0; e 34,0 para 12,0% b.u., respectivamente.

Segundo avaliação feita por LACERDA FILHO (1986), nos sistemas de secagem de café em terreiros, em secador de leito fixo, em combinação entre secagem em terreiros e secagem em leito fixo, em combinação entre a secagem em terreiro e secagem em fluxos concorrentes e em combinação

entre secagem em leito fixo e secagem em fluxos concorrentes, o melhor desempenho foi obtido no último sistema.

Segundo BAKKER-ARKEMA et al. (1978), a eficiência energética de um secador de grãos ou de um processo de secagem deve ser expressa em termos de energia requerida para remover uma unidade de massa de umidade do grão, em kJ por kg de água evaporada. Esses mesmos autores propuseram uma metodologia para avaliação do desempenho de secadores, a qual se baseia em um número reduzido de testes de campo sob condições padronizadas. Vários autores têm-se baseado nesta metodologia para a avaliação de protótipos de secadores (OSÓRIO, 1982; SABIONE, 1986; SILVA, 1991; PINTO, 1993; PINTO FILHO, 1993).

2.6. Propriedades e características físicas dos frutos de café

SILVA e LUCENA (1995) afirmam que as operações de transporte, secagem e armazenagem dos frutos de café dependem do conhecimento das suas propriedades físicas.

De acordo com SHIVASTAVA et al. (1996), o tamanho e a massa do fruto são os parâmetros mais importantes no transporte pneumático do produto, sendo o fluxo de ar grandemente influenciado pela massa de grãos. Para o desenvolvimento de equipamentos para transporte, limpeza, secagem e armazenagem de qualquer produto agrícola, é importante conhecer as características aerodinâmicas, como velocidade terminal e coeficiente de arrasto.

Em se tratando do recolhimento e transporte dos frutos de café, segundo MAGALHÃES (2003), é fundamental que se conheça a sua velocidade

terminal. Segundo MOHSENIN (1978), uma partícula em queda livre, em um fluxo de ar ascendente, atingirá sua velocidade terminal quando a força gravitacional (F_g), em que F_g = peso – força de empuxo, se igualar à força de resistência de arraste (F_r). A velocidade terminal pode ser calculada por meio da Equação 1.

$$m_f \times g \times \left[\left(\frac{r_f - r}{r_f} \right) \right] = \frac{1}{2} \times C \times A_p \times r \times v_t^2 \quad (1)$$

ou

$$v_t = \sqrt{\frac{2w_f \times (r_f - r)}{r_f \times r \times A_p \times C}} \quad (2)$$

em que

v_t = velocidade terminal ($m.s^{-1}$);

m_f = massa do fruto de café (kg);

g = aceleração gravitacional ($m.s^{-2}$);

w_f = peso do fruto de café (N);

r_f = massa específica do fruto de café ($kg.m^{-3}$);

r = massa específica do ar ($kg.m^{-3}$);

C = coeficiente de arrasto (adimensional); e

A_p = área projetada do fruto de café (m^2).

Segundo DE BAERDEMAEKER e SEGERLIND (1974), a velocidade terminal de um produto pode ser determinada experimentalmente, colocando-se os materiais (frutos de café) para flutuar em uma corrente ascendente de ar. A velocidade dos frutos de café para o transporte e a movimentação dentro do sistema tem que ser maior do que a velocidade terminal do produto.

MAGALHÃES (1999) observou experimentalmente que, quando os frutos de café começam a girar, dá-se início ao movimento de subida, sendo eles impulsionados para uma região de menor velocidade, isto é, a rotação causa maior arraste e menor velocidade terminal.

O arrasto de fricção, também conhecido como resistência superficial, é dominante em corpos cuja área superficial, paralela à direção do escoamento, é grande em comparação à normal (COUTO et al., 2000).

Estudos com esferas, discos e cilindros mostraram uma relação distinta entre o coeficiente de arrasto C da Equação 2 e o número de Reynolds (Equação 3), que variam com as formas geométricas das partículas.

$$N_r = \frac{v_t \times d_e \times r}{h} \quad (3)$$

em que

N_r = número de Reynolds (adimensional);

d_e = diâmetro equivalente dos frutos de café (m); e

η = viscosidade absoluta do ar (N.s.m^{-2}).

Para um corpo arredondado, essa combinação entre o coeficiente de arrasto e o número de Reynolds pode ser determinada por meio da Equação 4.

$$C \times N_r = \frac{8w_f \times r^2 \times (r_f - r)}{p \times h^2 \times r_f} \quad (4)$$

Moysey, citado por COUTO et al. (2000), sugeriu que a esfericidade, o enrugamento da superfície e o tamanho da partícula contribuem para as variações na taxa de escoamento de materiais granulares. O grau de esfericidade de um corpo, usado para descrever sua forma, pode ser estimado

pela razão entre o diâmetro de uma esfera, com o mesmo volume do corpo, e o diâmetro da menor esfera circunscrita no corpo, ou, em geral, a maior dimensão do objeto (MOHSENIN, 1978). O mesmo autor determinou o grau de esfericidade por meio da média geométrica dos três eixos mutuamente perpendiculares do sólido pelo maior eixo, como visto na Equação 5.

$$f = \frac{\sqrt[3]{a.b.c}}{a} \quad (5)$$

em que

= esfericidade (adimensional);

a= eixo maior (m);

b= eixo médio (m); e

c= eixo menor (m).

Os fatores que afetam os valores da velocidade terminal de frutos de café não são, ainda, bem conhecidos e podem ser diferentes daqueles que influenciam outros tipos de grãos. Ressalta-se, por exemplo, que o comportamento da rugosidade da superfície de frutos de café difere visivelmente deste para outros grãos agrícolas. À medida que o teor de água deste produto é reduzido, a rugosidade superficial aumenta (COUTO et al., 2000).

Na determinação da massa específica aparente utiliza-se, geralmente, uma balança de peso hectolítrico ou um picnômetro. A massa específica real dos frutos de café pode ser determinada pelo método de deslocamento de líquido ou do ar entre os frutos de café. De acordo com COUTO et al. (1999), a metodologia de complementação de volume (ou deslocamento de líquido) tem

a vantagem de requerer equipamentos comuns de laboratório (balão volumétrico, balança, etc.).

2.7.Sistema pneumático

Para que a eficiência do sistema pneumático não fique comprometida, o conhecimento de características do ventilador, como eficiência, pressão total, potência requerida e rotação, são de suma importância para a sua correta escolha.

Segundo SEGLER (1951), a pressão exercida e a quantidade de ar fornecida pelo ventilador são determinadas, em qualquer sistema de transporte pneumático, em função das características da linha de transporte e dependem de vários fatores, como: velocidade do ar, diâmetro, comprimento e natureza da tubulação, fluxo e natureza dos grãos a serem transportados, bem como da queda de pressão ocorrida quando os grãos são alimentados no transportador. Outros fatores, como tipo de alimentação, tipo de descarga e mudança de direção, também influenciam o sistema.

No sistema pneumático, uma importante característica a ser estudada é a perda de carga que acontece ao longo da tubulação do sistema. A movimentação forçada de ar através de uma tubulação ocasiona queda de pressão, devido à demanda de energia ocasionada pela fricção do ar entre as paredes da tubulação e suas próprias moléculas. Valores altos de velocidade do ar podem aumentar os danos mecânicos causados aos grãos, além de exigirem alta potência do sistema. Por outro lado, velocidades muito baixas podem levar ao bloqueamento da linha de transporte. A perda de carga pode

ser estimada pela Equação 6, assumindo o ar como incompressível (SEGLER, 1951).

$$H_s = \frac{f_a \times L \times v^2 \times \tilde{n}_a}{2 \times D \times g} \quad (6)$$

em que

H_s = perda de carga, mmca;

L = comprimento total equivalente da tubulação, m;

f_a = coeficiente de resistência, adimensional;

v = velocidade do ar, $m\ s^{-1}$;

D = diâmetro da tubulação, m;

g = aceleração da gravidade, $m\ s^{-2}$; e

ρ_a = massa específica do ar, $kg\ m^{-3}$.

O valor de f_a é função da velocidade do ar, da natureza da superfície e do diâmetro da linha de transporte. Para tubos polidos internamente os valores de f_a podem ser aproximados pela seguinte equação:

$$f_a = \frac{1}{13,8 \times Q^{0,148}} \quad (7)$$

em que

Q = vazão mássica de ar, kg/h; e

Para ar e grãos, várias fontes de perda de carga podem ser identificadas. Essas fontes são apresentadas, esquematicamente, na Figura 2, onde se demonstra que a fricção total é igual à soma da fricção entre o ar e os

grãos, entre o ar e a parede do tubo, entre os próprios grãos e entre os grãos e a parede do tubo, podendo ser estimada por meio da Equação 8.

$$F_t = F_{at} + F_{gg} + F_{gt} + F_{ag} \quad (8)$$

em que

F_t = coeficiente de resistência total, adimensional;

F_{at} = coeficiente de resistência entre o ar e o tubo, adimensional;

F_{gg} = coeficiente de resistência entre os grãos, adimensional;

F_{gt} = coeficiente de resistência entre os grãos e as paredes do tubo, adimensional; e

F_{ag} = coeficiente de resistência entre o ar e os grãos, adimensional.

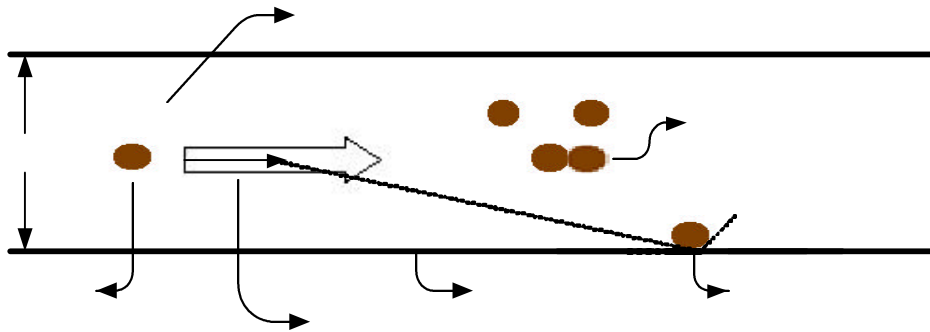


Figura 2- Causas da fricção durante o transporte pneumático.

O coeficiente de resistência entre o ar e os grãos é dependente da velocidade relativa entre eles, diretamente proporcional ao fluxo de grãos e inversamente proporcional à velocidade do ar e ao diâmetro da tubulação, o que pode ser verificado pela Equação 9 (SEGLER, 1951).

$$F_{ag} = \frac{4 \times q}{\pi \times D \times V_{ar}} \times \frac{(1-E)^3}{A_g \times E} \quad (9)$$

em que

q = vazão mássica de grãos, kg.s^{-1} ;

D = diâmetro da tubulação, m;

V_{ar} = velocidade do ar, m.s^{-1} ;

A_g = parâmetro relativo às características aerodinâmicas de um grão; e

E = razão entre a velocidade dos grãos e a velocidade do ar, adimensional.

Na Equação 8, A_g e E são constantes para cada produto, estando relacionados às características aerodinâmicas da trajetória de um grão em fluxo de ar.

Crane e Carleton, citados por HUBNER (1986), estudando a estimativa da perda de carga durante o transporte pneumático de grãos, apresentaram a Equação 10, que é estendida a tubos retos e inclinados de 0 a 90°.

$$H_s = k \times \frac{F_{\text{ag}} \times v_g \times L \times G_s}{2 \times D \times g \times \rho_{\text{ag}}} + k \times \frac{G_s \times L}{v_g \times \rho_{\text{ag}}} \times \text{sen}(\varphi) + k \times \frac{F_{\text{ar}} \times L \times v_{\text{ar}}^2 \times \rho_{\text{ar}}}{2 \times D \times g \times \rho_{\text{ag}}} \quad (10)$$

em que

H_s = pressão estática, m.c.a;

v_g = velocidade dos grãos, m.s^{-1} ;

G_s = fluxo de grãos, $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}$;

g = aceleração da gravidade, m.s^{-2} ;

ρ_{ar} = massa específica do ar, kg.m^{-3} ;

ρ_{ag} = massa específica da água, kg.m^{-3} ;

F_{ar} = coeficiente de resistência do ar, adimensional;

φ = ângulo de inclinação do tubo; e

K= constante de transformação de unidades =0,305.

Quando alimentados na linha de transporte, os grãos têm pequena ou nenhuma velocidade na direção do fluxo de ar. Então, para atingirem a velocidade de transporte, são acelerados até esse limite. A pressão estática adicional necessária para provocar essa aceleração foi apresentada por HENDERSON e PERRY (1976) e pode ser estimada pela Equação 11.

$$P_{ac} = \frac{R \times v_g^2}{2 \times g} \quad (11)$$

em que

P_{ac} = pressão para acelerar os grãos, m.c.a;

R= massa de grãos em relação à massa de ar, kg k.g⁻¹; e

g= aceleração da gravidade, m.s⁻²

A Equação 12, proposta por Gasterstadt, citado por HENDERSON (1976), avalia a perda de carga durante o transporte.

$$P_{ac} = 2,25 \times R \times p \quad (12)$$

em que p é a pressão dinâmica do ar em mm.c.a.

A mudança de direção da tubulação necessita de cuidado especial quanto ao raio das curvaturas dos cotovelos. Maiores raios ocasionam maior número de choques dos grãos com as paredes do tubo, o que, por sua vez, reduz a velocidade do fluxo de grãos que novamente precisarão ser

acelerados, ocasionando novas fontes de perda de carga. Pequenas curvaturas, pela sua própria natureza geométrica, geram altas perdas de carga.

De acordo com Gibson, citado por SEGLER (1951), a perda de carga causada pela mudança de direção é aproximadamente a metade daquela provocada pela aceleração dos grãos após o alimentador. Assim, o autor apresentou, ainda, a Equação 13 para estimar o valor do raio ótimo dessa curvatura, que é função do diâmetro da tubulação e do número de ressaltos na curvatura, se esta for construída com segmentos retos.

$$R = \frac{D}{2 \times \left(\frac{1}{\cos(\delta)} - 1 \right)} \quad (13)$$

em que

R= raio de curvatura;

$\delta = 90/(n+1)$;

n= número de ressaltos; e

D= diâmetro da tubulação, m.

Gasterstadt, citado por HENDERSON e PERRY (1976), indicou a Equação 14 para estimar a perda de carga em trajetos verticais e inclinados.

$$P_m = p_{ar} \times (1 + 0,32 \times R) \quad (14)$$

em que

P_m = perda de carga para ar e grãos, m.c.a;

p_{ar} = perda de carga para ar, mm.c.a; e

R = massa de grãos em relação à massa de ar, $kg.kg^{-1}$.

Estudos comprovaram que grande fluxo de grãos exige maior velocidade do ar e maior potência. A quantidade transportada depende, basicamente, do tipo de alimentação, que, por sua vez, determina a perda de carga. De modo geral, a potência necessária para o transporte de grãos aumenta com o diâmetro, com a velocidade do ar, com o comprimento e altura da linha de transporte e com o fluxo de grãos (SEGLER, 1951).

A descarga também ocasiona perda de carga. Essa queda de pressão depende das dimensões da linha de transporte (comprimento e diâmetro), da vazão mássica de grãos e da velocidade do ar.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido no Núcleo de Pesquisa e Treinamento em Pós Colheita - NUPETRE, localizado na área de Armazenamento e Pré-Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

3.1. O Secador

Os objetivos principais propostos no presente trabalho foram projetar, construir e avaliar um novo sistema de secagem de café, utilizando-se de um sistema pneumático para carga, movimentação e descarga do café. O sistema de secagem proposto foi construído utilizando-se chapas metálicas e alvenaria de tijolos, conforme ilustrado na Figura 3, sendo constituído das seguintes partes:

- *Câmara de descanso 1*: é um compartimento cilíndrico, montado sobre um fundo cônico, cuja função é abastecer o secador durante o processo de

secagem. O corpo cilíndrico foi construído com altura de 1,09 m e diâmetro de 0,6 m. O cone, de paredes com inclinação de 35° , tem altura de 0,13 m e diâmetro de 0,6 m, cujo volume é de $0,32 \text{ m}^3$. Seu volume mínimo deve ser, pelo menos, 40% superior ao volume da câmara de secagem.

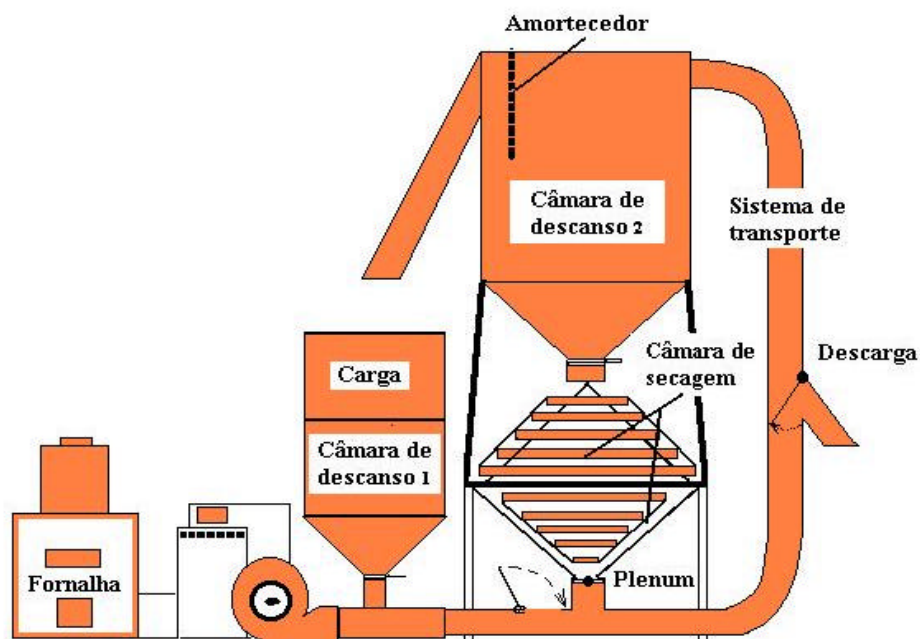


Figura 3 - Secador de café com sistema de transporte pneumático.

- *Sistema de movimentação*: é constituído de uma tubulação metálica por onde o café foi movimentado até a câmara de descanso 2, impulsionado pelo próprio ar de secagem. O controle da secagem, do revolvimento e da descarga do secador foi por atuação mecânica e controle manual dos registros localizados ao longo da tubulação. O sistema para movimentação, construído com seção quadrada, possui comprimento igual a 6,7 m, área da sessão transversal igual a $0,01 \text{ m}^2$ e volume igual a $0,067 \text{ m}^3$.

- *Câmara de descanso 2*: além da função de receber o café recém-saído da secagem parcial, a câmara de descanso 2 é utilizada também para distribuí-lo uniformemente na câmara de secagem. Para o descanso, o café, ainda quente,

permanecerá na câmara durante um tempo predeterminado e retornará, posteriormente, para câmara de secagem. A câmara de descanso 2 deve ser provida de um amortecedor de borracha para amortização do impacto dos grãos e de uma passagem para câmara de descanso 1. No secador em questão, a câmara de descanso 2 tem um volume igual a 0,30 m³.

- *Câmara de secagem*: é constituída de estruturas especiais, compostas por duas pirâmides unidas pelas bases, formando quatro losangos de chapas perfuradas. A estrutura permitiu que o fluxo de ar entrasse em contato direto com o café, secando-o como se fosse em fluxos reversos. Na câmara de secagem, o fluxo de ar passa através da camada de grãos, quando em movimento em fluxos cruzados. Com 1,10 m² de base e 0,48 m de altura, as pirâmides podem comportar 0,12 m³ de grãos.

- *Descarga*: a descarga do secador é feita pelo bloqueio do fluxo de grãos para a câmara de descanso 2. O sistema permite bloquear e redirecionar o fluxo para uma das duas passagens. Acionado manualmente, o sistema pode exercer as funções de recirculação do café, durante a secagem, ou de descarga ao término desta.

Para manter o café uniformemente distribuído na câmara de secagem, foram montados dois dispositivos especiais para sustentação de grãos. Com forma piramidal, os dispositivos de sustentação foram colocados na parte externa da pirâmide superior e, internamente, na pirâmide inferior. Os dispositivos de sustentação de grãos podem ser identificados pelas barras paralelas (Figura 4 a, b, c).

Além de permitir uma boa distribuição do produto nas pirâmides construídas em chapas metálicas com 23% de perfuração, os dispositivos de

sustentação estabelecem ângulos de repouso predeterminados e permitem que, por gravidade, o produto flua e ocupe a área externa da pirâmide superior e a área interna da inferior. Com os grãos uniformemente distribuídos, a câmara de secagem toma a forma de um octaedro oco, com paredes de 5 cm de espessura, formando duas câmaras *plenum*.

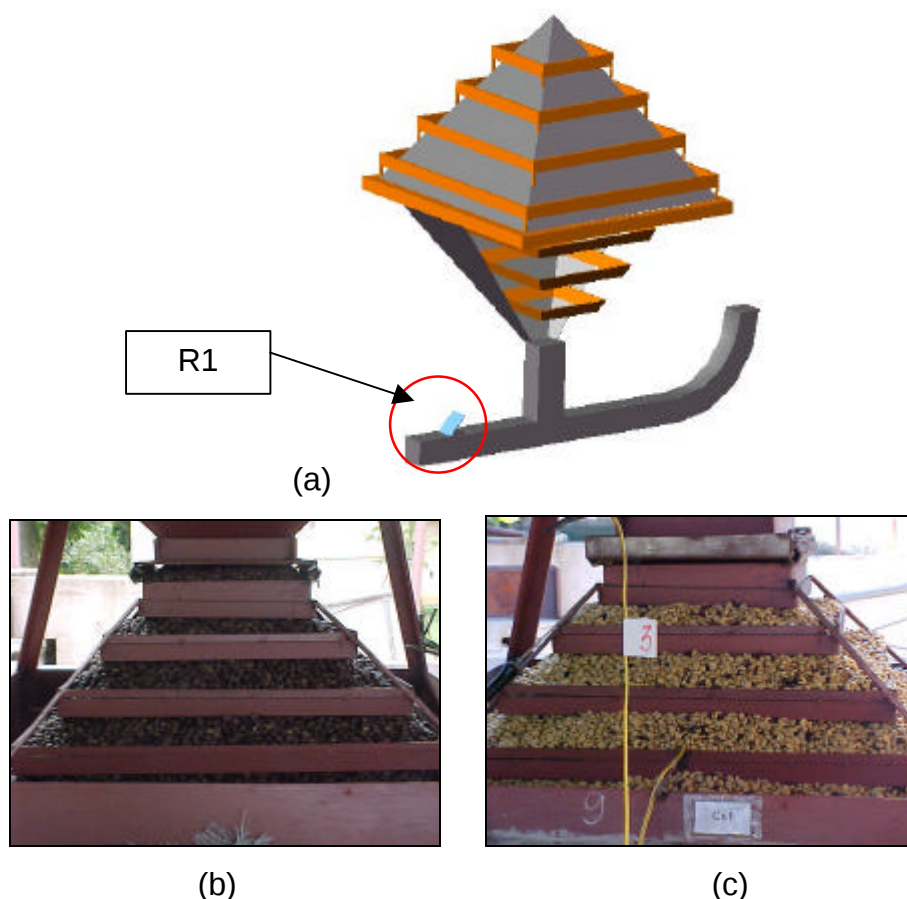


Figura 4 – (a) Detalhe do formato da câmara de secagem e do registro do direcionamento do fluxo de ar para secagem ou movimentação; (b) detalhe da câmara de secagem com café natural; (c) café cereja descascado.

3.2. Funcionamento do secador

O controle do fluxo de ar para a câmara de secagem é feito de forma manual, por meio de um registro preso à tubulação de ar do secador (o detalhe pode ser observado nas Figuras 4a e 6). Outros registros foram utilizados para

direcionar o fluxo de ar para o *plenum* (secagem), movimentação ou descarga da massa de café. O registro 1 (R1), localizado próximo à câmara de secagem, quando fechado, impulsiona o fluxo de ar para a câmara de descanso 2, fazendo a movimentação do café dentro do secador ou mesmo quando o produto estiver sendo descarregado. Esse registro, quando aberto, direciona o fluxo de ar para a câmara de secagem (*plenum*), iniciando assim a secagem propriamente dita.

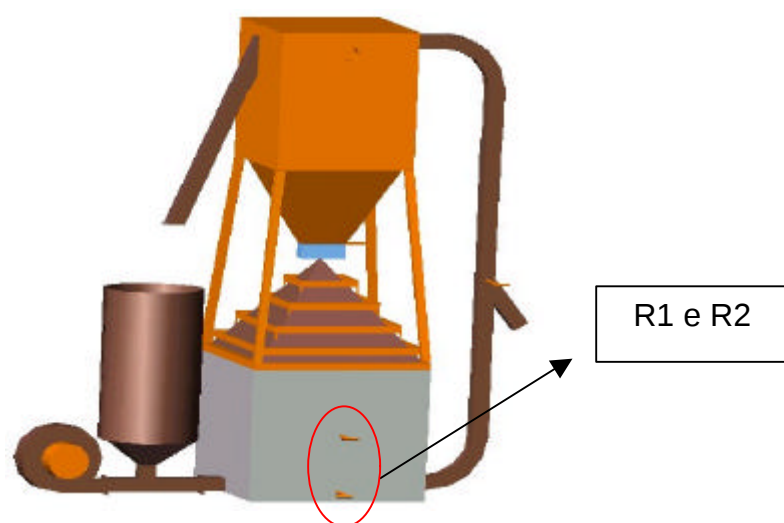


Figura 5 - Vista lateral do secador pneumático e do posicionamento dos registros para direcionamento do fluxo de ar para secagem ou movimentação dos grãos.

A abertura do registro 3 (R3) servia para direcionar o fluxo de café para a câmara de secagem ou para a câmara de descanso 1.

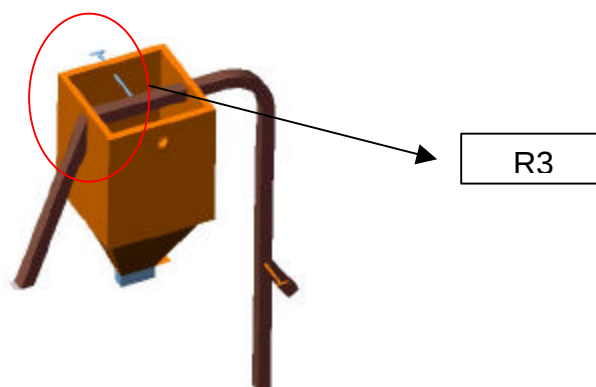


Figura 6 - Vista da câmara de descanso 2 e do registro para direcionamento do fluxo de grãos para câmara de secagem ou movimentação dos grãos.

A movimentação do café da câmara de descanso 1 até a câmara de descanso 2, localizada sobre a câmara de secagem, foi feita por ação pneumática, utilizando o próprio ar de secagem.

O fluxo de ar transportou o café da moega de alimentação, ou câmara de descanso 1, até a câmara de descanso 2, localizada na parte superior do secador. Na secagem contínua, ou seja, quando a massa de grãos não está parada na câmara de secagem, o fluxo de ar passa pela massa de grãos na mesma direção e no sentido contrário ao dos grãos, caracterizando o processo como de fluxo contracorrente. Entretanto, quando a secagem for intermitente (mais indicado para o café), o secador funciona como se fosse em camada fixa, sendo o café movimentado e substituído a cada intervalo de tempo predeterminado.

O café depositado na câmara de descanso 2 flui por gravidade e ocupa toda a câmara de secagem, formando duas camadas finas (5 cm) de grãos (Figura 4b, c). Depois de carregada a câmara de secagem, uma nova carga é enviada para a câmara de descanso 2, para homogeneização e posterior secagem. Destaca-se, assim, a combinação entre sistemas representados por um secador de fluxos contracorrentes e camada fixa com reversão do fluxo de ar. Passado um período de secagem estipulado (1 hora), o café, natural ou descascado, é retirado pela mesma corrente de ar quente insuflada pelo ventilador durante o período de secagem e encaminhado para a câmara de descanso 2 (passando pela câmara de descanso 1), onde é homogeneizado, retornando, novamente, para a câmara de secagem.

Atingido o teor de umidade desejado (12 % b.u., em média), o produto foi descarregado e armazenado em sacos de juta. Do produto ensacado foram

obtidas amostras, para realização das análises de propriedades físicas e qualidade do produto.

Nas Figuras 7, 8 e 9 são ilustrados o sentido dos fluxos de ar e dos grãos no momento do abastecimento, na secagem e na movimentação do grão dentro do secador.

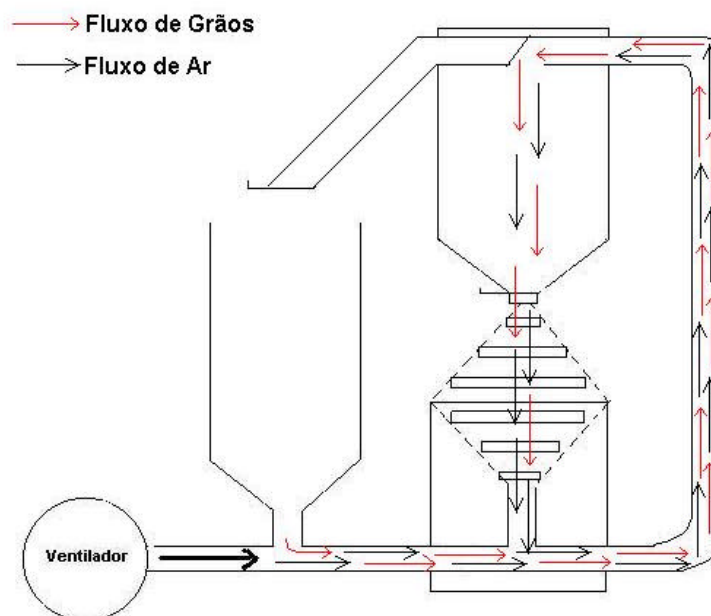


Figura 7- Fluxo de ar e grãos no abastecimento do secador.

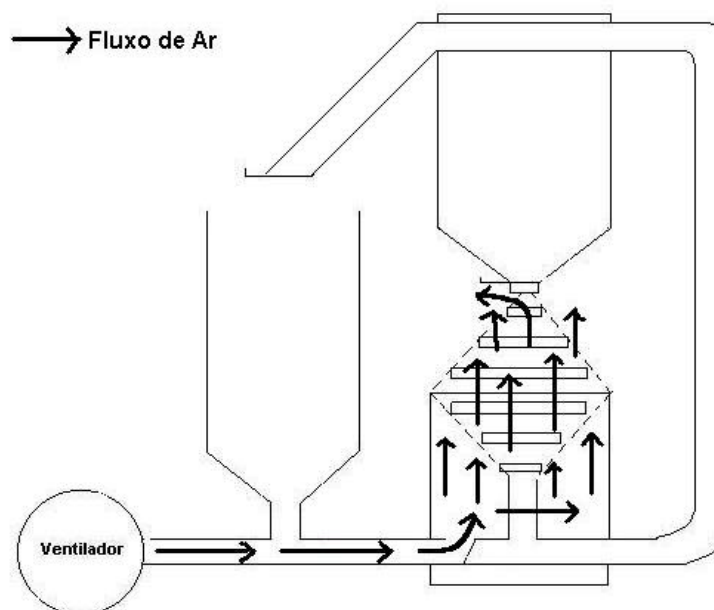


Figura 8 - Fluxo de ar durante a secagem.

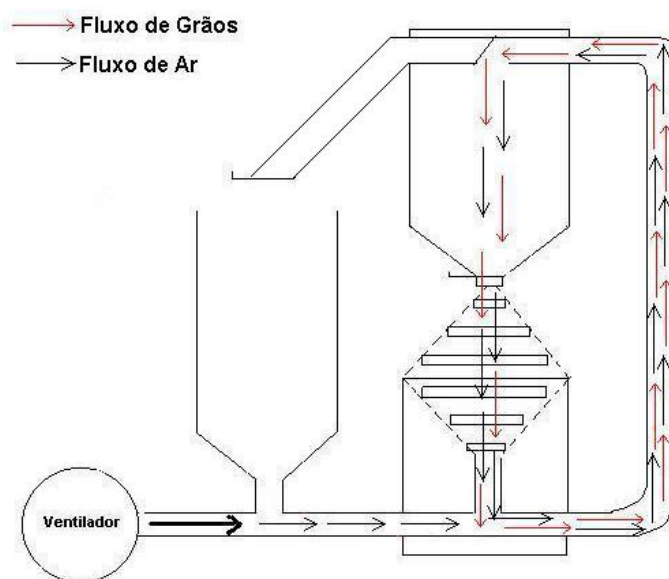


Figura 9- Fluxo de ar e movimentação dos grãos no abastecimento do secador

3.3. Matéria - prima

Foram utilizados frutos de café natural e café cereja descascado da espécie *Coffea arabica*, variedade Catuaí Vermelho, produzido na Zona da Mata de Minas Gerais.

No processamento do café natural (café coco), os frutos destinados ao experimento foram colhidos por derriça manual sobre o pano, no município de Paula Cândido-MG. Em seguida, foram lavados em lavador mecânico, separando os frutos cerejas dos frutos bóias (brocados, mal formados e com algum outro tipo de defeito), e previamente secados em um terreiro híbrido até o ponto de meia-seca.

Os lotes de café cereja descascado utilizados na avaliação do secador foram processados, pelo processo “via úmida”, na Fazenda Itatiaia, município de Araponga – MG.

3.4. Pré-secagem

Devido ao elevado teor de umidade dos frutos de café na colheita, a pré-secagem do café natural e do cereja descascado foi feita em terreiro-secador (Figura 10). Esta tecnologia, desenvolvida pela UFV por meio do CBP&D-Café e descrita por SILVA et al. (2001), distribui ar quente pela massa de café sobre os dutos de saída de ar do sistema.



Figura 10- Pré-secagem do café natural e do cereja descascado recém-saídos do lavador.

A pré-secagem do café iniciava-se logo que o grão saía do lavador ou descascador, com teor de umidade entre 50 e 60% b.u., e prolongava-se até que os grãos atingissem 35 a 40% b.u. A temperatura do ar de secagem não ultrapassou 60°C, temperatura esta recomendada para que a massa de café, neste sistema de secagem, não ultrapasse 40°C. A temperatura da massa de café foi monitorada durante toda a pré-secagem. Para isso, desligava-se o ventilador e media-se a temperatura com um termômetro digital, cujo elemento sensível foi colocado diretamente na massa de café (Figura 11). Para obter uma pré-secagem homogênea, a leira de café foi revolvida manualmente em intervalos regulares de três horas, para o café natural, e de uma hora, para o café cereja descascado.



Figura 11-Pré-secagem em terreiro-secador com monitoramento da temperatura da massa de café.

3.5. Planejamento experimental

Para a realização dos testes, o teor inicial médio de água dos grãos foi de $24,3 \pm 1,6\%$ b.u. para o café natural e $33,9 \pm 2,4\%$ b.u. para o café cereja descascado. A secagem foi feita com a carga completa da câmara de secagem. Para que isso ocorresse, a quantidade total de café foi identificada como sendo de dois lotes (lote 1 e lote 2), os quais foram trabalhados de forma que um permanecia na câmara de secagem (secagem) e o outro na câmara de descanso 2 (repouso), ou seja, enquanto um lote permanecia em repouso, o outro secava. Alternando a secagem e o repouso, o produto permanecia no sistema até atingir teor de umidade próximo de 12% b.u., caracterizando o processo como intermitente. Ao se aproximar do teor de umidade adequado para o armazenamento, os dois lotes (1 e 2) eram misturados em fluxo contínuo e permaneciam no secador até atingirem o teor de umidade de 12% (b.u.).

A temperatura do ar de secagem foi determinada depois da realização de testes preliminares. Durante estes testes, observou-se que a melhor temperatura do ar para secagem foi em torno de $60 \pm 2,8$ °C. Essa temperatura

permitiu que a temperatura da massa de grãos não fosse superior a 40 °C, recomendada, por não afetar a qualidade dos grãos. O experimento foi realizado fazendo-se a movimentação do produto dentro do secador a cada uma hora durante a secagem, conforme a sequência mostrada na Figura 12.

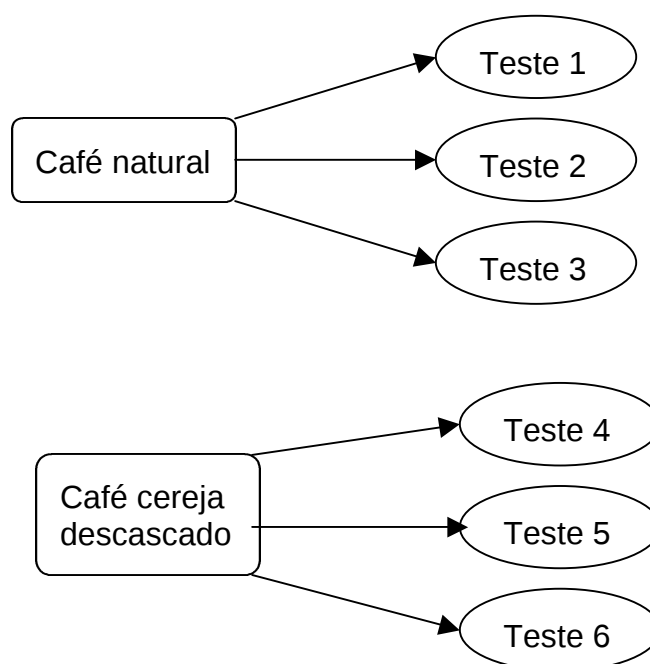


Figura 12 - Cronograma do planejamento experimental realizado.

Durante a secagem, as determinações do teor de umidade do produto foram realizadas antes e depois de cada movimentação do café, utilizando-se o método EDABO (Evaporação Direta da Água em Banho de Óleo) - uma variação do método de destilação e de mesma precisão do método oficial da estufa. Como a estufa é o método oficial, retiravam-se, também, amostras para a determinação do teor de umidade por esse método utilizando-se a temperatura de $105\pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, com três repetições de aproximadamente 30 gramas.

3.6. Fornalha

Para o aquecimento do ar de secagem, foi construída uma fornalha a carvão vegetal do tipo aquecimento direto (Figura 13), ou seja, os gases resultantes da combustão do carvão foram misturados ao ar ambiente e insuflados diretamente na massa de café por meio de um ventilador centrífugo de alta pressão. Diferentemente dos secadores tradicionais, o ventilador foi usado também para transportar o produto. A quantidade de energia térmica consumida pelo sistema foi determinada a partir da massa de combustível gasto, depois que a fornalha entrava em regime permanente de operação.

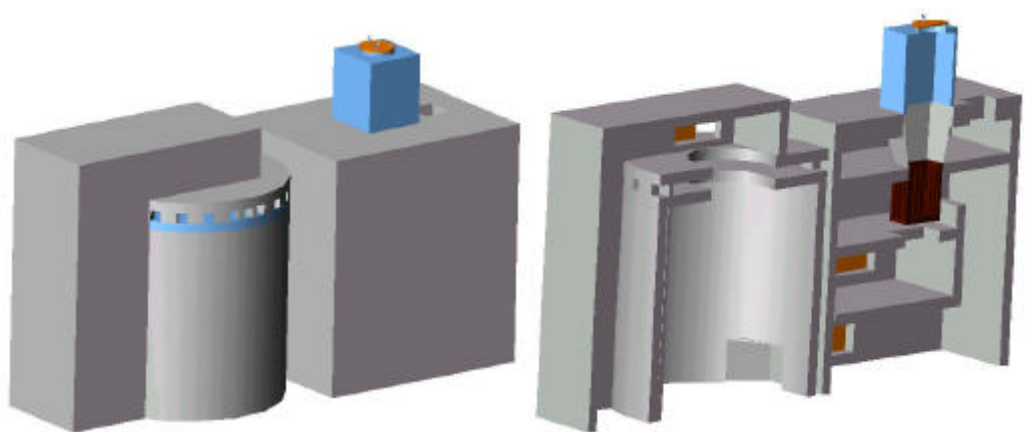


Figura 13 - Vista geral e corte longitudinal da fornalha a carvão vegetal e do ciclone.

3.7. Instrumentação do secador

Para avaliação do secador (controle da secagem), uma série de variáveis foi monitorada por meio da instrumentação do secador. Foram monitoradas as temperaturas nas posições indicadas no Quadro 1, cujos pontos podem ser vistos nas Figuras 14 e 15.

Quadro 1 - Posição das sondas termoeletricas no secador

Sonda Termoeletrica	Posição no secador
S_{ar}	Saída de ar
S_{arg}	Saída de ar + grãos
CD_1	Câmara de Descanso 1
Dvi	Duto vertical inferior
Dvm	Duto vertical médio
Dvs	Duto vertical superior
CD_2	Câmara de Descanso 2
S_1	Pirâmide superior 1
S_2	Pirâmide superior 2
S_3	Pirâmide superior 3
S_4	Pirâmide superior 4
C_s	Câmara de secagem

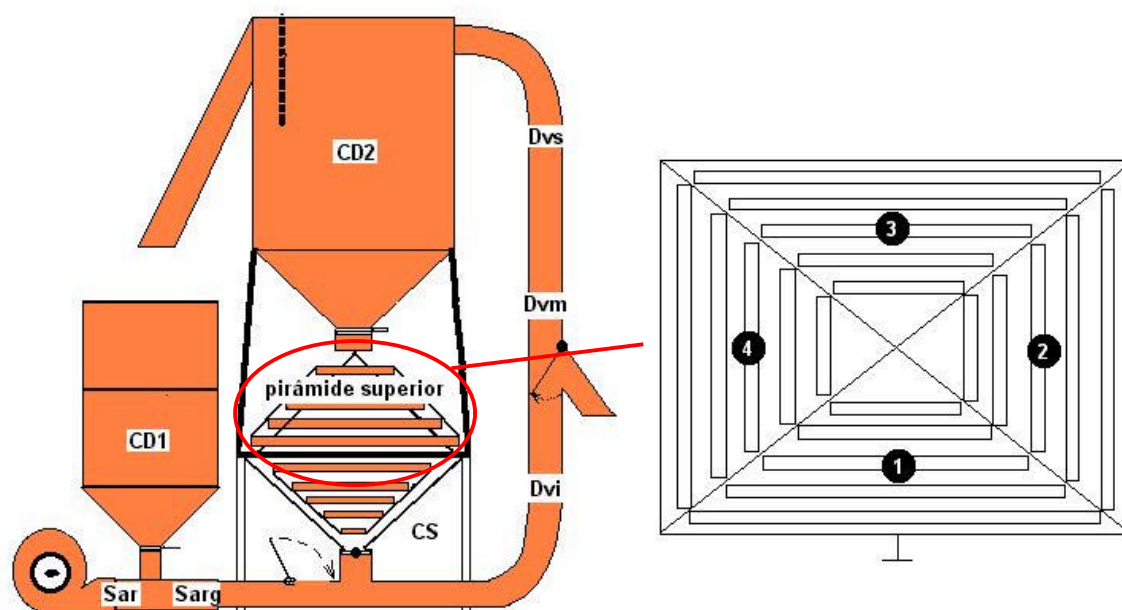


Figura 14 - Detalhes do posicionamento dos sensores de temperatura na massa de grãos (Temperatura na massa de grãos – superior 1 / superior 2 / superior 3 / superior 4).

A temperatura do ar de secagem na saída do ventilador e no condutor de ar e grãos foi medida por meio de uma sonda termoeletrica, tipo K,

posicionada nos respectivos pontos, após mistura do ar ambiente com os gases de combustão no ciclone.



Figura 15 - Vista do secador para café com sistema pneumático e sistema de aquisição de dados (sondas termoeletricas).

Para a medição da temperatura da massa de café foi colocada uma sonda em contato direto com a massa de grãos. Essa medição foi realizada na câmara de descanso 2, depois da secagem.

A temperatura do ar de exaustão foi monitorada por meio de uma sonda termoeletrica posicionada na parte superior da câmara de secagem (Figura 16).



Figura 16 - Sonda termoeletrica para medição da temperatura do ar de exaustão.

A temperatura e a umidade relativa do ar ambiente foram monitoradas a cada hora durante a secagem, por meio de um termoigrômetro digital (Figura 17), instalado em um abrigo meteorológico. Para a determinação das umidades relativas do ar de secagem e exaustão foi utilizado o programa GRAPSI.

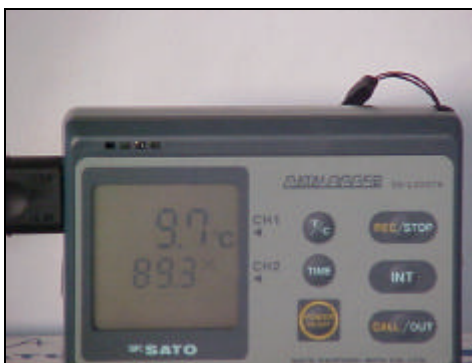


Figura 17 - Termoigrômetro digital para caracterizar as condições do ambiente.

Conforme pode ser observado na Figura 18, para o monitoramento das temperaturas, por meio de sondas termoelétricas, foi utilizado um sistema de aquisição de dados da marca LR.COM, com capacidade para 15 pontos de leituras simultâneas por segundo. A esse sistema de aquisição foi acoplado a um microcomputador, onde os dados de temperatura eram observados e armazenados em intervalos regulares de um minuto.



Figura 18 - Microcomputador com o sistema de aquisição de dados LR.COM.

3.8. Dados experimentais

3.8.1. Características do material transportado

Os valores de peso médio de um grão, velocidade terminal, massa específica real e esfericidade, para o cálculo do coeficiente de resistência entre o ar e os grãos, foram considerados através dos resultados obtidos por COUTO et al. (2001). Esses valores são mostrados no Quadro 2.

Quadro 2- Valores médios de peso, velocidade terminal (VT), massa específica real () e esfericidade () de frutos de café com diferentes teores de umidade (TU)

<i>TU</i> (%b.u.)	<i>Peso x 10³</i> (N)	<i>VT</i> (m/s)	<i>x 10⁻³</i> (kg/m ³)	(%)
67,8	15,36	15,7	1,220	89,2
61,4	12,84	14,9	1,164	86,7
46,9	9,02	14,1	1,083	82,2
29,3	6,71	13,4	0,954	80,5
18,7	5,57	12,2	0,954	80,5

Fonte: COUTO et al. (2001).

3.8.2. Medidas de pressão

As pressões estática e total foram medidas com um manômetro em forma de “U” e utilizando-se um tubo de Pitot. As pressões total e estática foram medidas diretamente no duto de condução do ar de seção quadrada e área de 0,01 m² logo na saída do ventilador.

A pressão dinâmica foi obtida pela Equação 15.

$$P_T = P_e + P_d \quad (15)$$

em que

P_T = pressão total (mm.c. a);

P_e = pressão estática (mm.c. a); e

P_d = pressão dinâmica (mm.c. a).

3.8.3. Sistema de ventilação

O sistema de ventilação do protótipo é constituído de um ventilador centrífugo de alta pressão, acionado por um motor elétrico de 2 cv a 3.410 rpm. Além de transportar o grão, o sistema tem a finalidade de succionar o ar aquecido pela fornalha e promover a sua injeção na câmara de secagem (Figura 19).



Figura 19 - Detalhe do ventilador acoplado à tubulação de transporte.

3.8.4. Determinação das características do sistema de transporte

Por meio dos dados obtidos, calculou-se a velocidade do ar através da Equação 16.

$$v = 4,04 \times \sqrt{P_d} \quad (16)$$

em que

v = velocidade do ar, m.s^{-1} ; e

P_d = pressão dinâmica (mm.c.a).

A vazão foi calculada por meio da Equação 17.

$$Q = A \times v \quad (17)$$

em que

- Q = vazão de ar, $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$;
A = área do tubo, m^2 ; e
V = velocidade do ar, $\text{m}.\text{s}^{-1}$.

Os coeficientes de resistência entre o ar e a tubulação e entre o ar e os grãos podem ser calculados por meio das Equações 7 e 9, respectivamente.

A razão, m, entre a área da seção de estrangulamento do injetor e a área seção da linha de transporte pode ser calculada por meio da Equação 18, e a potência requerida, por meio da Equação 19.

$$m = \frac{1}{\left(\frac{f_{ag}}{D} + L \right)^{\frac{1}{1,79-0,0059 \times W}}} \quad (18)$$

em que

- m = razão de área, adimensional;
 f_{ag} = coeficiente de resistência, adimensional;
D = diâmetro da tubulação, m;
L = comprimento equivalente, m; e
W = vazão mássica de grãos, $\text{kg}.\text{s}^{-1}$.

$$Pot = \frac{Q \times P_t}{455 \times h_{inj} \times h_{vent}} \quad (19)$$

em que

- Pot = potência, cv;
Q = vazão de ar, $\text{m}^3.\text{min}^{-1}$;
 P_t = pressão total, mm.c.a;
 h_{inj} = eficiência do injetor; e
 h_{vent} = eficiência do ventilador.

3.8.5. Avaliação do desempenho do secador

A avaliação do desempenho do secador estudado foi feita segundo metodologia proposta por BAKKER-ARKEMA et al. (1978). No entanto, só serão utilizados os parâmetros mais importantes, segundo OSÓRIO (1982):

- temperatura da massa de grãos;
- umidade relativa e temperatura do ar ambiente e de exaustão do secador;
- teores de umidade inicial e final do café;
- vazão de ar de secagem;
- tempo de secagem;
- poder calorífico do combustível; e
- velocidade do produto no interior do secador.

3.8.6. Consumo de energia

O consumo específico de energia, dado como a quantidade de energia por unidade de massa necessária à remoção da água nos grãos, provém do combustível para aquecimento do ar de secagem e da energia elétrica necessária ao acionamento dos ventiladores e transportadores de grãos. Assim, o consumo específico de energia (CEE) é dado por:

$$CEE = \frac{\text{consumo de combustível} \times \text{poder calorífico}}{\text{água evaporada}}$$

3.8.7. Classificação do café

Para avaliar a qualidade do café, as amostras foram classificadas quanto a tipo e defeitos. No que se refere à qualidade da bebida, foi feita a prova de

xícara. Os testes de classificação do café foram realizados atendendo os critérios do MAPA, na Cooperativa Regional de Cafeicultores em Guaxupé Ltda. (COOXUPÉ), com sede em Guaxupé-MG.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O protótipo do secador para café com sistema pneumático foi construído e avaliado em seu desempenho para a secagem de café natural (coco) e para café cereja descascado, depois de uma pré-secagem em terreiro-secador construído segundo SILVA et al. (2001).

4.1. Características do sistema pneumático

Para caracterizar o sistema pneumático, foram obtidos os dados descritos no Quadro 3. Os valores de pressão total e estática foram obtidos com medição direta no duto de ar do sistema logo na saída de ar do ventilador. Observa-se que os dados de pressão total e estática para o ar foram superiores àqueles obtidos após a mistura do ar com os grãos, o que se deve ao fato de que, para o ar e os grãos misturados, várias fontes de perda de carga podem ser identificadas, como a fricção entre os grãos e com a parede do duto.

Observa-se que os valores encontrados por meio da Equação 16, de 25,3 para o ar e 23,0 m/s para o ar+grãos, mostram que a velocidade do ar no sistema se enquadrhou na faixa de 21 a 25 m/s, recomendada por DENCKER (1966) e Kleis, citado por HUBNER (1986), para que o grão seja transportado dentro de um tubo fechado.

A velocidade dos grãos dentro do secador foi calculada indiretamente, conhecendo-se a distância percorrida e o tempo gasto para a movimentação do grão dentro do protótipo.

O fluxo de ar foi obtido utilizando-se a Equação 17 e a área da seção transversal do duto transportador.

A quantidade de grãos transportados pelo sistema foi determinada em função do tempo gasto para transportar a massa total dentro do secador.

A potência requerida pelo sistema foi calculada por meio da Equação 19, cujo valor pode ser observado no Quadro 3.

Quadro 3 - Características do sistema pneumático

<i>Descrição</i>	<i>Ar</i>	<i>Ar + grão</i>
Pressão total, mm.c.a	71,2	72,4
Pressão estática, mm.c.a	32,0	40,0
Velocidade do ar, m.s ⁻¹	25,3	23,0
Vazão de ar, m ³ .min ⁻¹	15,2	13,8
Fluxo de ar (densidade), m ³ .min ⁻¹ .m ²	1.518	1.380
Velocidade dos grãos, m.h ⁻¹	-	21,6
Quantidade de grãos transportado, kg.h ⁻¹	-	318,92
Potência do sistema, cv	0,51	-

4.2. Características dos grãos no processo experimental

No Quadro 4 são apresentados os valores da massa de café nas suas fases inicial e final, para cada teste realizado, bem como os valores de peso

hectolítrico (pH) determinados em uma balança de pH com capacidade de 1 litro.

Neste quadro, observa-se que as massas dos frutos de café variaram de acordo com a redução do teor de água e que o tempo de secagem variou entre os tratamentos com café natural e descascado. A secagem do café natural (testes 1, 2 e 3) teve a duração de 11,5 horas para o teste 1, 10,3 horas para o teste 2 e 9,6 horas para o teste 3. As massas de café com teores de umidade inicial de 25,8, 25,0 e 23,1% b.u. alcançaram teores de umidade final de 11,8, 11,9 e 11,9% b.u., respectivamente.

Quadro 4 - Massa inicial e final, peso hectolítrico, teor de umidade médio dos grãos e tempo de secagem

Tratamento	Massa do lote (kg)		Peso hectolítrico (kg.m ⁻³)		Umidade (% b.u.)		Tempo de secagem (h)
	<i>Inicial</i>	<i>Final</i>	<i>Inicial</i>	<i>Final</i>	<i>Inicial</i>	<i>Final</i>	
Café natural							
Teste 1	136	116	595,6	452,2	25,8	11,8	11,5
Teste 2	156	132	594,3	451,3	25,0	11,9	10,3
Teste 3	156	136	596,0	452,8	23,1	11,9	9,6
Café descascado							
Teste 4	232	166	476,0	440,4	36,8	11,9	14,0
Teste 5	148	116	452,3	438,5	32,5	12,0	12,5
Teste 6	182	142	451,9	437,1	32,3	12,0	12,3

Para o café descascado (testes 4, 5 e 6), a secagem teve a duração de 14,0 horas para o teste 4, 12,5 horas para o teste 5 e 12,3 horas para o teste 6. Os teores de umidade iniciais foram de 36,8, 32,5 e 32,4% b.u., e os finais, de 11,9, 12,0 e 12,0% b.u., respectivamente.

Pode ser observado no teste 4, realizado com café descascado, maior tempo de secagem (14,0 horas). Isso se deve ao fato de a massa inicial deste lote de café ser maior (232 kg) e o teor de umidade inicial do produto se encontrar mais alto, se comparados aos de outros testes realizados.

O teste 3 com café natural apresentou menor tempo de secagem (9,6 horas), o que pode estar relacionado com as propriedades psicrométricas do ar ambiente no momento da secagem e com o menor teor de umidade inicial (23,1%b.u.), como pode ser observado no Quadro 5. De qualquer modo, a secagem do café cereja descascado mostrou-se vantajosa, pois em todos os testes realizados a massa inicial de produto correspondia quase ao dobro da massa inicial de café natural. Ainda, notam-se teores de umidades mais elevados para café cereja descascado, com pequeno acréscimo no tempo de secagem.

4.3. Características do ar e dos grãos no processo experimental

Observa-se, no Quadro 5, que os valores médios da temperatura do ar de secagem variou entre $62,6 \pm 2,13$; $63,7 \pm 6,13$; $63,7 \pm 1,84$; $64,2 \pm 3,24$; $64,7 \pm 5,34$; e $65,0 \pm 5,3$ °C, mostrando que a fornalha manteve a temperatura do ar de secagem praticamente constante, apesar da ausência de um ajuste fino. Essa constância se deve também à uniformidade das características psicrométricas do ar ambiente durante os testes, já que estes foram realizados no período diurno.

Os valores baixos encontrados para a umidade relativa do ar de exaustão mostram um pequeno aproveitamento do ar de secagem, ou seja, o ar de exaustão saía com uma pequena quantidade de água e ainda com

grande potencial para secagem. Esse fato mostra que, para o tamanho do ventilador usado, a câmara de secagem ou a espessura da camada de grãos pode ser aumentada, melhorando a capacidade de secagem.

Quadro 5 - Temperaturas médias do ar de secagem, do ar de exaustão e do ambiente e umidades relativas médias do ar de secagem, exaustão e do ambiente

<i>Tratamento</i>	<i>Temperaturas médias do ar</i>			<i>Umidades relativas médias do ar</i>		
	<i>Secagem (°C)</i>	<i>Exaustão (°C)</i>	<i>Ambiente (°C)</i>	<i>Secagem (%)</i>	<i>Exaustão (%)</i>	<i>Ambiente (%)</i>
Café natural						
Teste 1	62,6±2,13	31,4	20,4	6,9	33,4	64,1
Teste 2	63,7±6,13	34,4	20,5	6,5	26,3	59,3
Teste 3	63,7±1,84	34,5	23,6	7,2	28,9	53,9
Café descascado						
Teste 4	64,2±3,24	31,1	19,3	6,2	30,5	61,6
Teste 5	64,7±5,34	29,0	20,3	7,2	37,9	63,9
Teste 6	65,0±5,3	29,3	23,3	6,4	38,9	55,7

Durante a realização dos testes, a temperatura da massa de café foi monitorada por meio de sensores que foram colocados dentro da câmara de descanso 2. Assim, quando cada lote saía da câmara de secagem e iniciava o período de descanso, os valores de temperatura da massa eram registrados. No Quadro 6 podem ser observados os valores de temperatura da massa de grãos.

Quadro 6 - Temperaturas do ar no *plenum*, do ar* e da massa de café

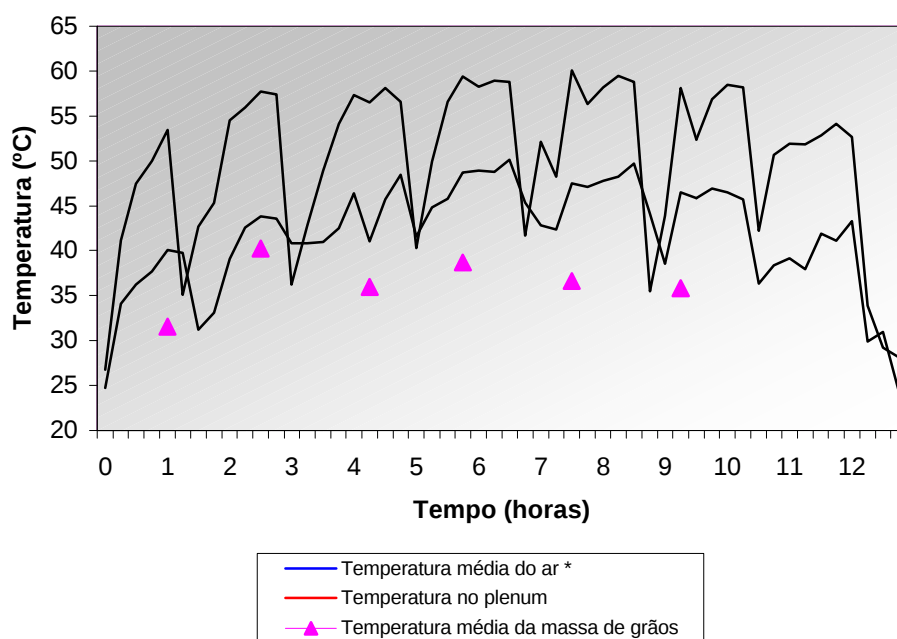
Tratamento	Temperatura do ar no <i>plenum</i> (°C)	Temperatura do ar* (secagem) °C	Temperatura da massa (descanso) °C
Café natural			
Teste 1	49,2±1,2	41,7±3,2	36,5
Teste 2	44,6±2,3	41,3±2,1	39,2
Teste 3	46,7±1,8	40,6±2,3	38,5
Café descascado			
Teste 4	38,5±2,5	35,6±2,8	33,0
Teste 5	38,7±2,3	36,7±2,5	35,1
Teste 6	41,4±1,2	39,8±1,8	35,2

Nota* - temperatura média observada no sensor localizado na espessura média (2,5 cm) da camada de grãos (pirâmide superior da câmara de secagem).

Pode ser constatado no Quadro 6 que a temperatura da massa de café não atingiu valores superiores aos da temperatura máxima recomendada para a produção de um café de boa qualidade (40°C).

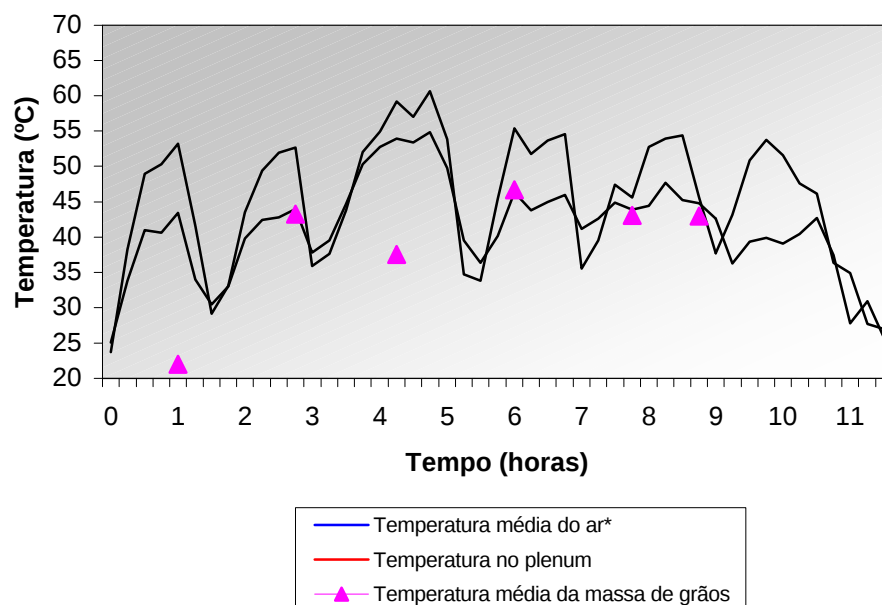
Nas Figuras 20, 21, 22, 23, 24 e 25 observam-se as temperaturas médias do ar na câmara de secagem (espessura média da camada de grãos), do ar no *plenum* e da massa de grãos. Nota-se que a temperatura média na câmara de secagem é inferior à do *plenum*. Esse fato pode ser explicado devido à passagem do fluxo de ar pela camada inferior de grãos, fazendo com que este perdesse energia na forma de calor. Verifica-se também que as curvas apresentam picos inferiores e superiores, que representam, respectivamente, o intervalo de movimentação e o período de secagem. Nesses pontos, observam-se regiões de extremos menos acentuados, que se referem à variação da temperatura no processo em questão. Os pontos em destaque representam as temperaturas atingidas pela massa de grãos na câmara de descanso depois da secagem (sem influência de ar aquecido). A

linha de cor preta (no final da secagem) mostra o período que o café entrava em fluxo contínuo para homogeneização dos lotes.



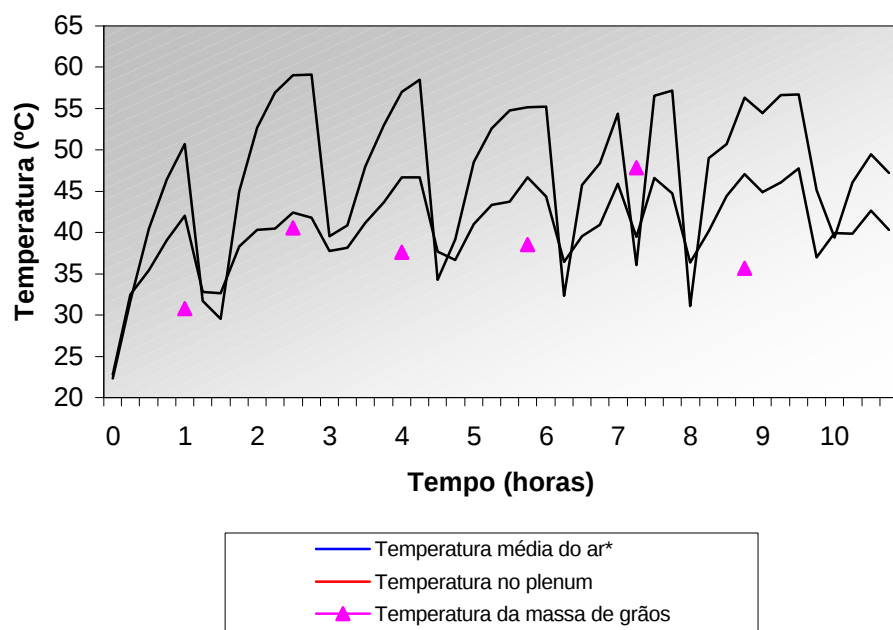
* temperatura observada no sensor localizado na espessura média (2,5 cm) da camada de grãos (pirâmide superior da câmara de secagem).

Figura 20 – Variações da temperatura para o teste 1 (café natural).



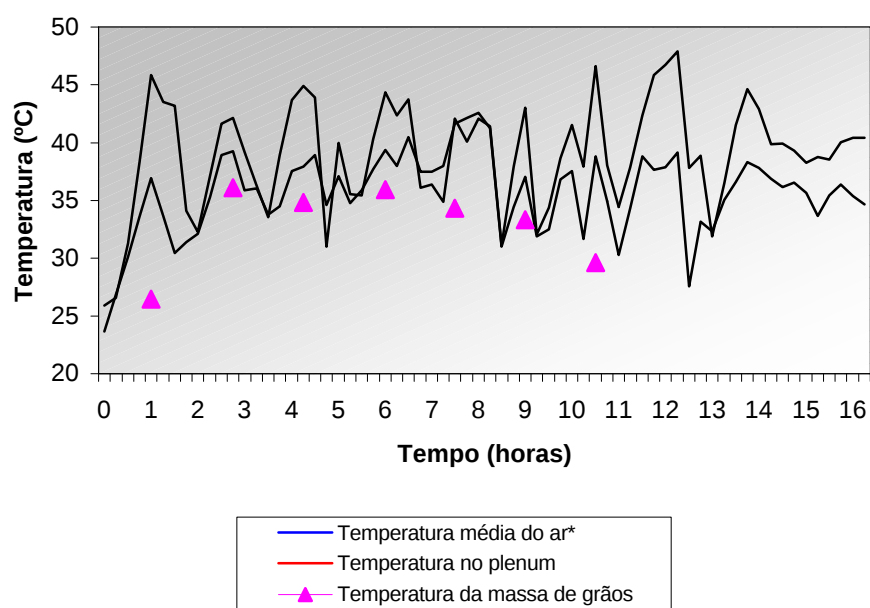
*- temperatura observada no sensor localizado na espessura média (2,5 cm) da camada de grãos (pirâmide superior da câmara de secagem).

Figura 21 – Variações da temperatura para o teste 2 (café natural).



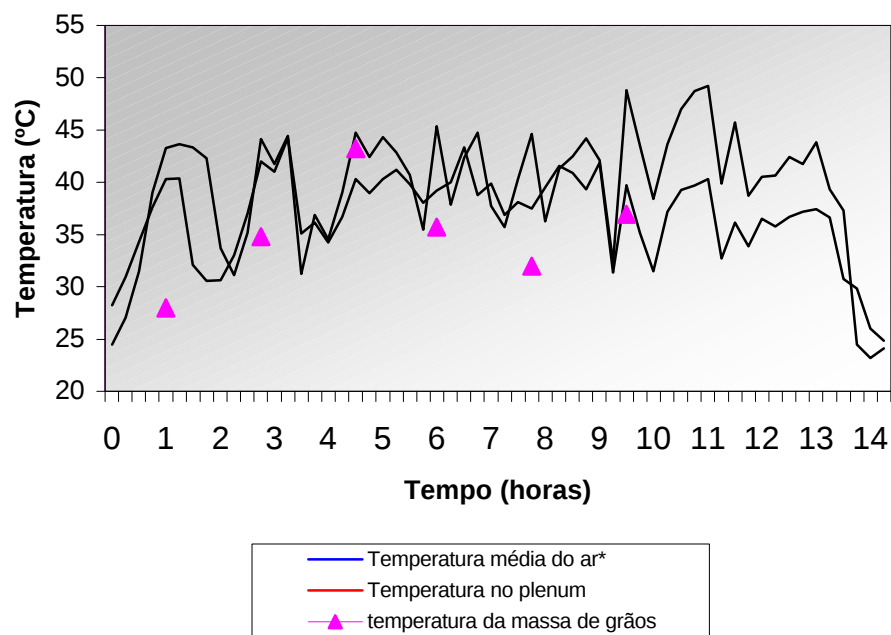
* temperatura observada no sensor localizado na espessura média (2,5 cm) da camada de grãos (pirâmide superior da câmara de secagem).

Figura 22 – Variações da temperatura para o teste 3 (café natural).



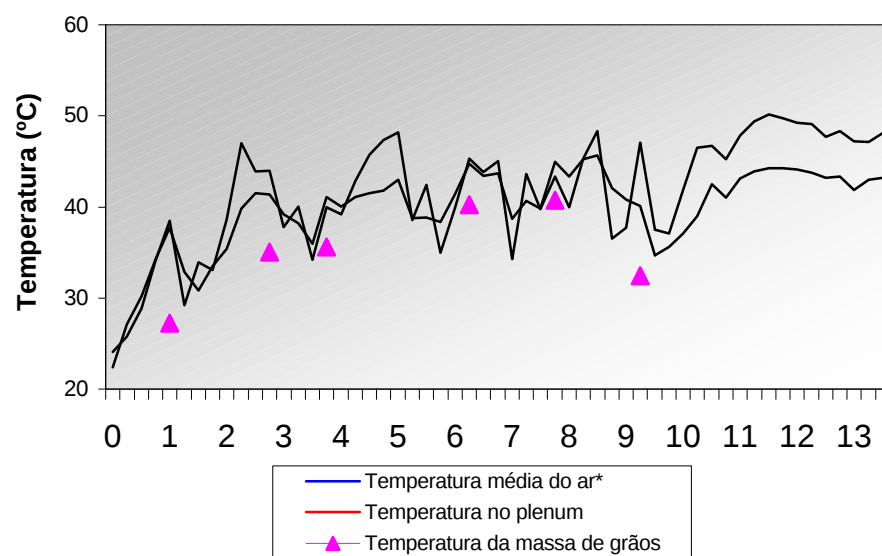
* temperatura observada no sensor localizado na espessura média (2,5 cm) da camada de grãos (pirâmide superior da câmara de secagem).

Figura 23 – Variações da temperatura para o teste 4 (café descascado).



* temperatura observada no sensor localizado na espessura média (2,5 cm) da camada de grãos (pirâmide superior da câmara de secagem).

Figura 24 – Variações da temperatura para o teste 5 (café descascado).



* temperatura observada no sensor localizado na espessura média (2,5 cm) da camada de grãos (pirâmide superior da câmara de secagem).

Figura 25 – Variações da temperatura para o teste 6 (café descascado).

4.4. Curvas de secagem

A secagem do café foi feita de forma intermitente, ou seja, depois de um período preestabelecido, parte do café ficava parada e secando na câmara de secagem e a outra ficava na câmara de descanso 2 (repouso). As curvas apresentadas nas Figuras 26, 27, 28, 29, 30 e 31 mostram as etapas seguidas pelos grãos, com os respectivos tempos. Nestas curvas está descrito o período de secagem do café, que pode ser observado nas linhas de cor azul. O período de descanso, compreendido entre os intervalos de secagem, pode ser visto nas linhas de cor verde. Observa-se também que a porção final da curva (linha vermelha) mostra que a secagem está sendo realizada com movimento contínuo dos grãos, para a homogeneização da massa, tendo em vista que esta atingia teor de umidade próximo ao recomendado para o armazenamento.

Durante o período de descanso, constatou-se pequena redução do teor de umidade da massa, que perdia, em média, 0,5 g de água após ter entrado na câmara de descanso 2. Esse fato pode ser verificado também por outras pesquisas realizadas com secagem parcelada.

Na Figura 23 pode ser observada uma maior redução do teor de umidade da massa de grãos na primeira hora de secagem, já que seu teor de umidade e sua massa inicial eram maiores, se comparados aos de outros testes com café natural. No decorrer do processo, essa perda foi menos acentuada, uma vez que em condições de teor de umidade menor há maior resistência à retirada da água.

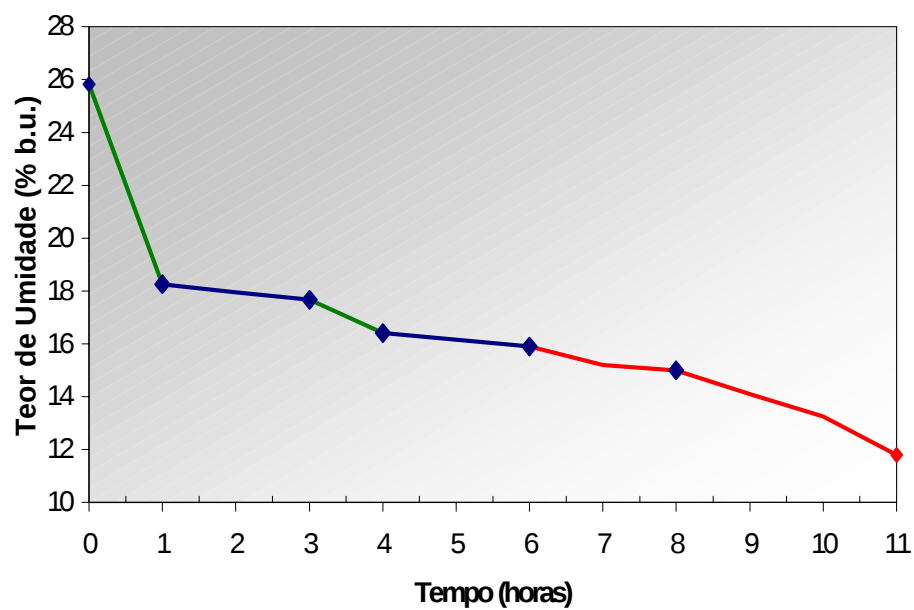


Figura 26 - Curva de secagem para o café natural com movimentação dos grãos a cada uma hora (teste 1).

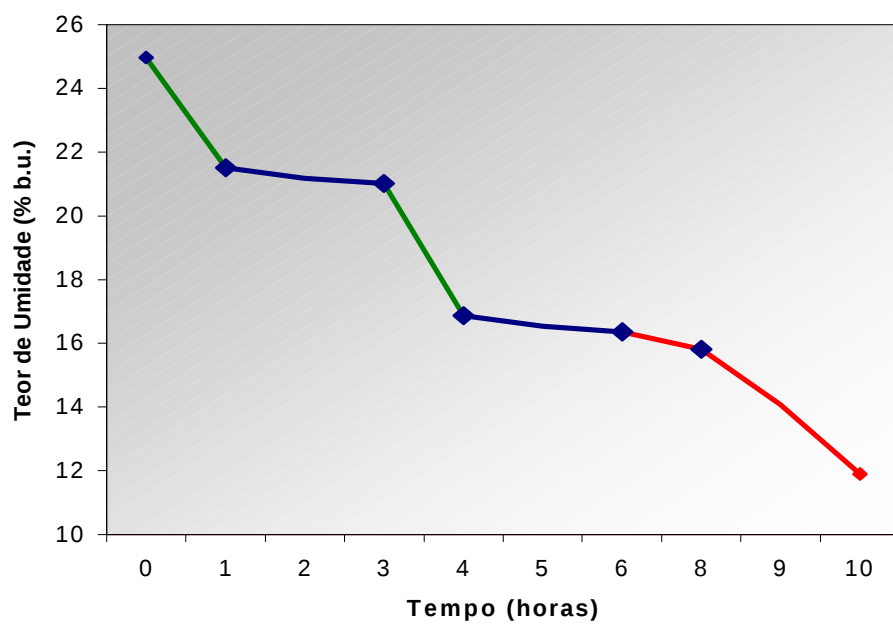


Figura 27- Curva de secagem para o café natural com movimentação dos grãos a cada uma hora (teste 2).

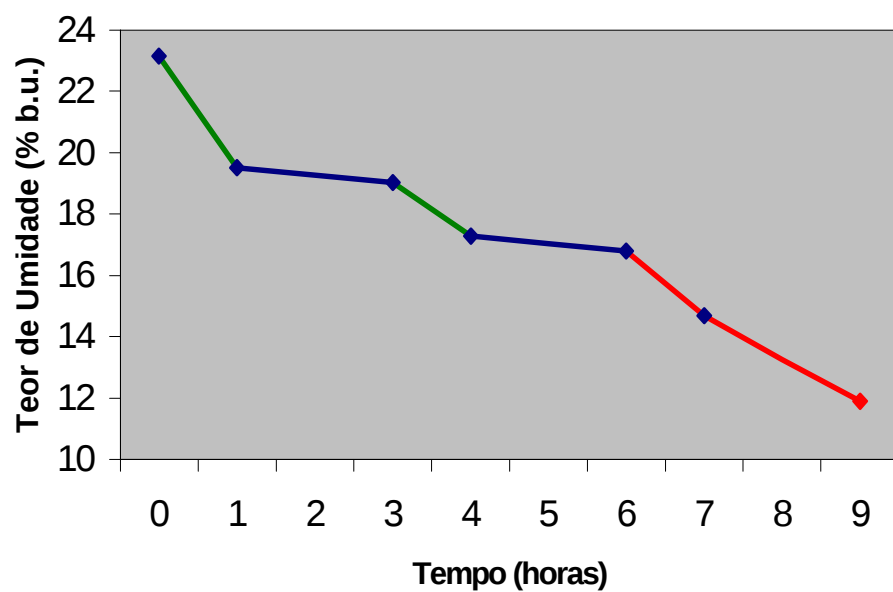


Figura 28 - Curva de secagem para o café natural com movimentação dos grãos a cada uma hora (teste 3).

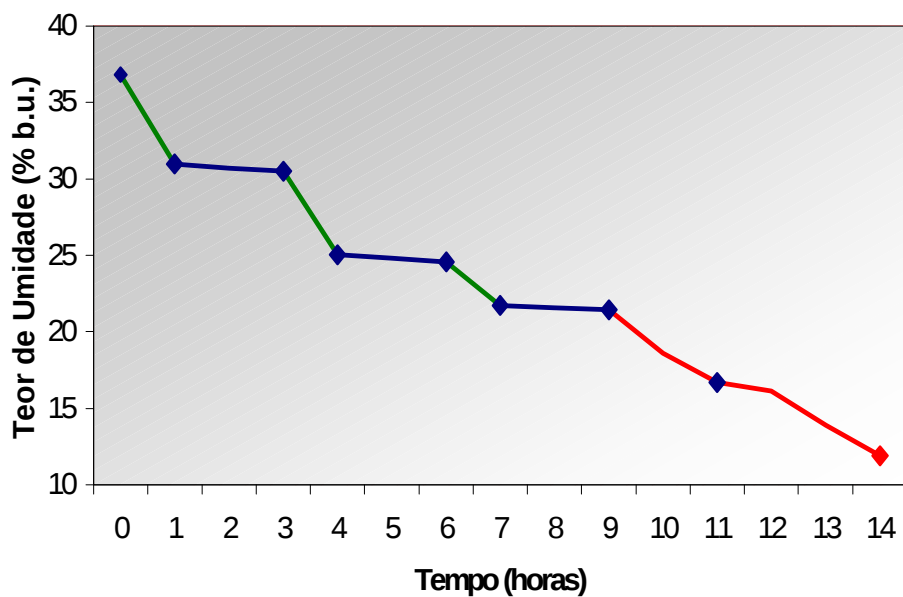


Figura 29 - Curva de secagem para o café descascado com movimentação dos grãos a cada uma hora (teste 4).

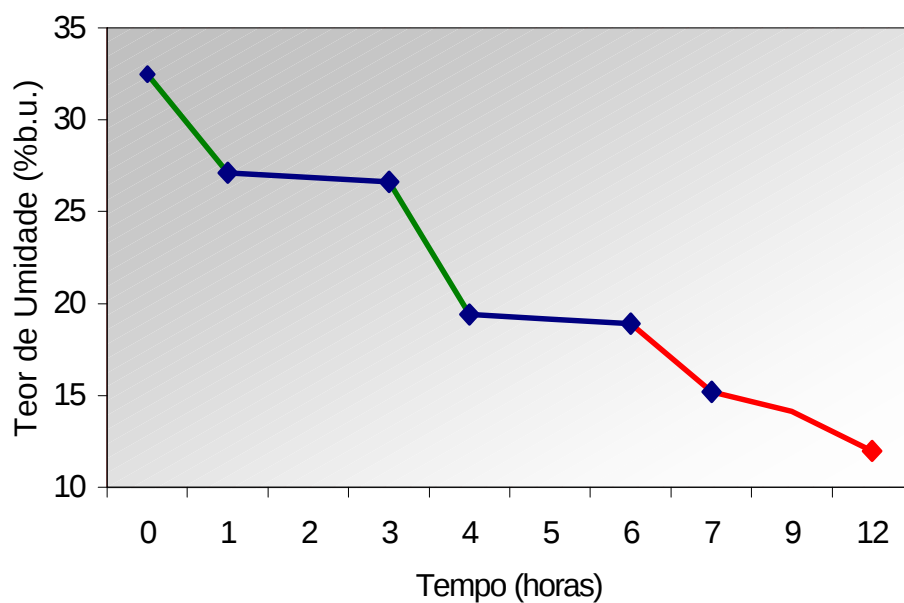


Figura 30- Curva de secagem para o café descascado com movimentação dos grãos a cada uma hora (teste 5).

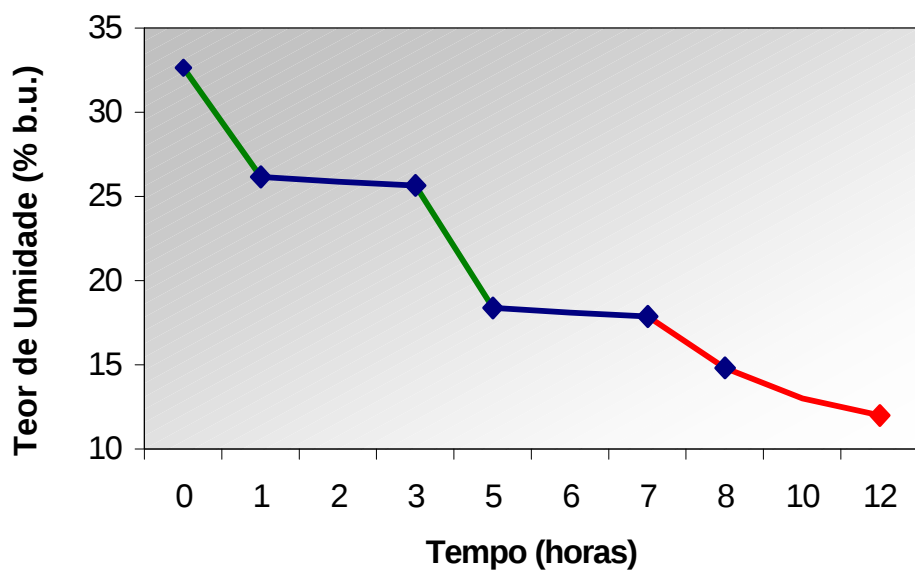


Figura 31- Curva de secagem para o café descascado com movimentação dos grãos a cada uma hora (teste 6).

4.5. Consumo de energia

No Quadro 7, pode ser constatado que o consumo específico de energia para os testes 1, 2 e 3, realizados com café natural, foram de 35,30, 27,43 e 36,08 MJ/kg, respectivamente. Nos testes 4, 5 e 6 (café cereja descascado) obteve-se um consumo específico de 13,27, 25,21 e 17,24 MJ/kg, respectivamente.

Quadro 7 - Tempo de secagem, massa inicial e consumo de energia

	Tempo secagem (h)	Massa inicial (kg)	Consumo de energia (KJ)	Consumo específico de energia (KJ.kg ⁻¹)		Consumo Total de energia (kj.kg ⁻¹)	
Café natural							
			Carvão	Elétrica	Carvão	Elétrica	
Teste 1	11,5	136	701.724	61.546	32.460	2.847	35.307
Teste 2	10,3	156	585.901	48.951	25.316	2.115	27.431
Teste 3	9,6	156	663.657	54.508	33.345	2.739	36.084
Café Descascado							
Teste 4	14,0	232	797.590	72.924	12.164	1.112	13.276
Teste 5	12,5	148	799.894	68.002	13.235	1.975	15.210
Teste 6	12,2	182	671.110	55.354	15.930	1.314	17.244

Observa-se, na Figura 32, que o menor consumo específico de energia de combustível ocorreu no teste 4, em razão de neste teste o teor de umidade inicial do produto ter sido maior (36,8% b.u.), proporcionando maior taxa de secagem no início do processo. Considera-se ainda que, para este teste, o tempo de secagem foi maior.

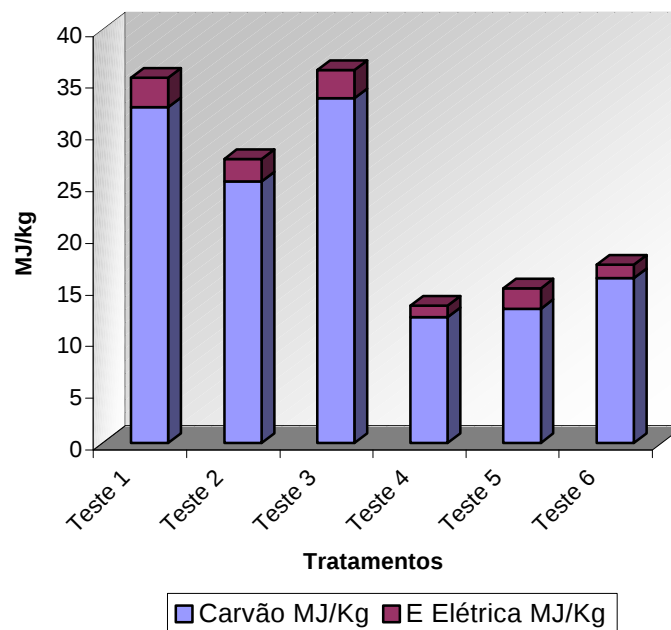


Figura 32 - Consumo específico de energia elétrica e de combustível (carvão).

O consumo específico de energia real média observado no secador em estudo foi de $32.941 \text{ kJ.kg}^{-1}$ de água evaporada para café natural e $15.243 \text{ kJ.kg}^{-1}$ para café cereja descascado.

Como pode ser observado, o protótipo apresentou elevado consumo de energia. Este fato se explica pela movimentação do produto ter sido realizado com o próprio ar de secagem. Entretanto, ao ser feita esta movimentação com ar natural, verificou-se uma economia de energia de 24,12% para café natural e 31,87% para café descascado, em relação ao consumo calculado (Quadro 7). A diferença no consumo de energia pode ser observada com maiores detalhes na Figura 33.

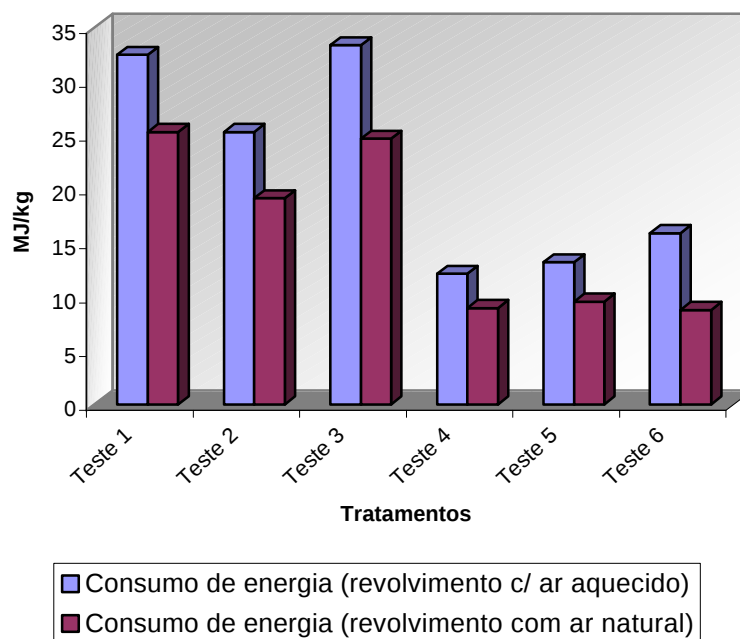


Figura 33 - Comparação do consumo específico de energia elétrica e de combustível (carvão), fazendo-se a movimentação do produto com ar aquecido e natural.

4.6. Qualidade

As amostras de café natural e de café cereja descascado foram enviadas à COOXUPÉ - Cooperativa Regional dos Cafeicultores em Guaxupé Ltda., onde foram feitas as análises sensorial e de classificação do café, para avaliação da qualidade da bebida e das características dos grãos. Os resultados podem ser observados no Quadro 8.

Quadro 8 - Resultados da classificação de bebida dos lotes de café

Lote	Bebida	Tipo	Aroma	Aspecto
Natural				
Teste 1	Duro Verde	6	Regular	Bom
Teste 2	Duro Verde	6	Regular	Bom
Teste 3	Duro Verde	6/7	Regular	Bom
Descascado				
Teste 4	Estritamente Mole	4	Regular	Bom
Teste 5	Estritamente Mole	4	Regular	Bom
Teste 6	Estritamente Mole	3/4	Regular	Bom

Por meio dos resultados obtidos na classificação, pode-se observar, no Quadro 8, que os lotes de café utilizados no novo sistema de secagem foram de boa qualidade. Para os lotes de café natural, a obtenção da bebida considerada “duro verde” se deve à não-separação dos frutos verdes dos frutos cerejas após a colheita.

Considerando que o tipo “4” e “6” é tido como um padrão para exportação, pode-se dizer que, neste trabalho, o café cereja descascado apresentou resultados satisfatórios, comprovando a grande eficiência do sistema de secagem testado.

Quanto ao uso do carvão como combustível, não houve influência na qualidade final do produto. DE GRANDI (1999) e DONZELES (2002) também utilizaram o carvão vegetal como combustível para aquecimento do ar de secagem para o café e verificaram que ele não influenciou a qualidade do produto, no que diz respeito à bebida.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Este trabalho foi desenvolvido com os objetivos de elaborar, construir e avaliar um novo modelo de secador para café. Por meio de um sistema pneumático, foi possível a otimização do processo utilizando um único ventilador para o abastecimento, a secagem, a movimentação e a descarga do produto.

Foi avaliada a redução dos teores de umidade para o café natural e café cereja descascado, fazendo-se a movimentação do produto a cada hora de secagem. Na avaliação foram conduzidos três testes para cada tipo de café.

A secagem feita no secador com sistema de transporte pneumático, utilizando-se café natural, teve a duração de 11,5 horas para o teste 1, 10,3 horas para o teste 2 e 9,6 horas para o teste 3. A massa de café com teor de umidade inicial de $24,6 \pm 1,8\%$ b.u. alcançou o teor de umidade ideal para armazenamento de $11,9 \pm 1,3\%$ b.u. nos testes realizados.

Em se tratando do café descascado, a secagem teve duração de 14,0 horas para o teste 4, 12,5 horas para o teste 5 e 12,2 horas para o teste 6. A

massa de café com teor de umidade inicial médio de $33,9 \pm 2,1\%$ b.u. alcançou o teor de umidade ideal para armazenamento de $12,0 \pm 1,5\%$ b.u. O consumo específico de energia real médio observado no secador estudado foi de 32.941 kJ.kg⁻¹ de água evaporada para café natural e 15.243 kJ.kg⁻¹ para café cereja descascado.

Com base nos resultados obtidos na avaliação do protótipo do secador e na classificação do produto, pôde-se concluir que:

- O conjunto ventilador-motor (2 cv) está superdimensionado para o sistema utilizado, sendo observados os valores de pressão total e estática de 71,2 e 32,0 mm.c.a e o valor de 0,5 cv requerido pelo sistema.
- Quanto às características relacionadas com os danos mecânicos que podem ser causados pelo impacto promovido pelo sistema pneumático, foi observado que não houve danificações no produto.
- Com esse processo pôde-se obter uma secagem homogênea de toda a massa de café.
- A temperatura da massa de café ficou abaixo daquela do ar de secagem (ventilador ligado), com valor médio de $36,25 \pm 1,6^{\circ}\text{C}$.
- O tempo de secagem variou significativamente entre os tratamentos com café natural e descascado.
- O teste 3 apresentou menor tempo de secagem (9,6 horas). Já o teste 4 apresentou maior tempo de secagem (14,0 horas), devido à sua maior massa e teores de umidade iniciais.
- Os testes que se iniciaram com teores de umidade mais elevados apresentaram maior eficiência no processo de secagem.

- O período de descanso do café durante o processo de secagem é de suma importância, sendo observada diminuição do teor de umidade do grão: em média, 0,5 g de água.
- O protótipo apresentou alto consumo específico de energia real média de 32.941 kJ.kg⁻¹ de água evaporada para café natural e 15.243 kJ.kg⁻¹ para café cereja descascado.
- O alto consumo específico de energia e a baixa eficiência energética podem ter sido influenciados pelo alto fluxo de ar aquecido utilizado nos testes, visto que o ar na saída do sistema possuía ainda alto potencial de secagem.
- Quando processado com o novo sistema de secagem, o café foi considerado de boa qualidade. O café natural foi classificado como tipo 6, e o café cereja descascado, como tipo 4.
- O combustível utilizado para aquecimento do ar de secagem e os demais procedimentos utilizados nos testes não influenciaram a qualidade do produto no que diz respeito ao “tipo” e à “bebida”.
- Com as sugestões e adaptações sugeridas, espera-se que o novo secador tenha a sua capacidade de secagem aumentada e um menor consumo específico de energia.

5.1. Sugestões

Para uma maior eficiência de secagem e consumo de energia, algumas modificações no sistema avaliado serão sugeridas. Para isso, podem ser observados na Figura 34 (Apêndice) os detalhes da modificação proposta. Como o ventilador possui pressão suficiente, poderá ser adaptado, na câmara de descanso 2, um sistema de calhas de exaustão, para fazer com que esta

câmara de descanso funcione como câmara de secagem durante os períodos de movimentação do grão e no final da secagem. Um sistema de descarga poderá ser colocado na câmara de descanso 2, para que o escoamento dos grãos seja feito por gravidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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. (Paper 78:3523).

BAKKER – ARKEMA, F. W.; SILVA, J.S., MWARA, E.R. **Testing of the shivers in-bin counterflow dryer-special report** East Lansing, Michigan, Michigan State University, 1980. 18p.

BAKKER – ARKEMA, F. W.; RODRIGUES, J.C.; BROOK, R. C.; HALL, G.E. **Grain quality and energy efficiency of commercial grain dryers**. St. Joseph, Michigan, ASAE, 1981. 15p. (Paper 81-3019).

BAKKER – ARKEMA, F. W. Selected aspects of crop processing and storage: a review. **Journal of Agricultural Engineering research**, v.30, n.1, p.1-22, 1984.

BARTHOLO, G.F.; GUIMARÃES, P.T.G. Cuidados na colheita e preparo do café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.18, n.187, p.33-42, 1997.

BROOKER, D.B.; MCKENZIE, B.A JOHNSON, H.K. **The present status of on farm grain drying**. St. Joseph, Michigan, ASAE, 1978.22p. (Paper 78-3007).

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grain and oilseeds**. New York: Avi publishing, 1992.450p.

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

CASTRO, L.E. **Efeito do despulpamento, em secador de leito fixo sob alta temperatura, no consumo de energia e na qualidade do café (*Coffea arabica* L.)** Viçosa-MG: UFV, 1991. 61 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 1991.

CARDOSO SOBRINHO, J. **Simulação e avaliação de sistemas de secagem de café.** Viçosa: UFV, 2001. 120p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2001.

CARVALHO, V.D. CHALFOUN, S.M. Aspectos qualitativos do café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 11, n. 126, p. 79-92, 1985.

CHALFOUN, S.M.; CARVALHO, V.D. **Colheita e preparo do café.** Lavras - MG, UFLA/FAEPE, 1997. 49p.

CORDEIRO, J.A.B. **Influência da temperatura e do tempo de repouso na secagem de café (*Coffea arabica* L.) em camadas fixas.** Viçosa: UFV, 1982, 60p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1982.

COSTA, L. M.; OLSZEWSKI, N., MÔNACO, P.A **Manejo e Conservação de Solos para a Cultura do cafeeiro.** IN:Produção Integrada de café., 2003, Viçosa. Editor: Laércio Zambolim, -Viçosa:UFV; DFP, 2003. 710 p.

COUTO, S.M., MAGALHÃES, A C. QUEIROZ, D.M. ANDRADE, E. T. **Dimensões principais, massa e volume unitários, esfericidade e ângulo de repouso de frutos de café.** Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande-PB.v. 2,p.39-50, 2000.

COUTO, S.M.; MAGALHÃES, A C.; QUEIROZ, D.M.; BASTOS, I. T. **Massa específica aparente e real e porosidade de frutos de café em função do teor de água.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, campina Grande, PB, DEA/UFPB. V.3, n.1, p.61-68, 1999.

DALPASQUALE, V.A. Secagem de grãos com ar natural: uma opção pouco utilizada no Brasil. **Jornal da Armazenagem**, n.5, v.18, p.5-6, 1983.

DALPASQUALE, V.A. Tecnologia apropriada para secagem e armazenagem de grãos. **Jornal da Armazenagem**, n.6, v.19, p.7-8, 1984.

DALPASQUALE, V.A.; PEREIRA D.A.M.; SINICIO, R.; OLIVEIRA FILHO, D. **Secado de granos a altas temperaturas**. Oficina Regional de la Fao para America Latina y el Caribe, Santiago-Chile. 1991. p.77.

DE BAERDEMAEKER, S.; SEGERLIND, L.J. **Aerodynamic properties of strawberreis**. Transactions of the ASAE, v. 17, n.2, p.729-732, 1974.

DE GRANDI, A. M. **Avaliação da eficiência de secagem de café (*Coffea arabica* L.), em secador de camada fixa vertical com revolvimento mecânico**. Viçosa: UFV, 1999, 61p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1999.

DENCKER, C. H. **Manual de Técnica Agrícola**, Ediciones Omega S.A., Barcelona, 1966.1252p.

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. 122 p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2002.

FAEMG. **Diagnóstico da cafeicultura em Minas Gerais**. Belo Horizonte, MG, FAEMG, 1996. 49p

FREIRE, A.C. F.; MIGUEL, A.C. **Rendimento e qualidade do café colhido nos diversos estádios de maturação em Varginha-MG**. In: Congresso Brasileiro de Pesquisa Cafeeira, 12, 1985, Caxambu-MG. **Resumos...** Rio de Janeiro: MIC/IBC, 1985. p.210-214.

GUIMARÃES, A.C. **Secagem de café (*Coffea arabica* L.) combinando sistemas em altas e baixas temperaturas**. Viçosa – MG: UFV, 1995. 64p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1995.

HAWK, A L.; NOYES, R.T. ;WESTELAKEN, C.M. POSTER, C.H. ; BAKKER-ARKEMA, F.W. **The present status of commercial grain drying**. St. Joseph, Michigan, ASAE, 1978.30p. (Paper 78-3008).

HENDERSON, S.M.; PERRY, R.L. **Agricultural Process Engineering**, 1976.442p.

HUBNER, N. **Simulação de características de transporte pneumático para soja e milho**. Universidade Federal de Viçosa, 24p. 1986. (Seminário).

LACERDA FILHO, A.F. **Avaliação de uma unidade de beneficiamento de sementes de milho** (*Zea Mays, L.*). Botucatu: UNESP, 1998. 198p. Tese (Doutorado em Agronomia)- Universidade Estadual Paulista, 1998.

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

LOPES, R.P.; AFONSO, A D.L., SILVA, J.S., **Energia no pré-processamento de produtos agrícolas**. In: Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. Viçosa: Aprenda Fácil, 2000.p.191-220.

MAGALHÃES, A C. **Desenvolvimento e avaliação de uma máquina recolhadora de café em terreiro utilizando transporte pneumático**. Viçosa: UFV, 2003. 110p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2003.

MAGALHÃES, A C. **Projeto, construção e avaliação de uma máquina de pré-limpeza de café**. . Viçosa: UFV, 1999. 63p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1999.

MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plant an animal materials**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1978. 742p.

MATIELLI, A; RUGGIERO, S. S. **Agronegócio café: histórico e tendências**. Revista Cafeicultura. A revista do cafeicultor. Ano 2. nº5 fevereiro 2003.Patrocínio, Minas Gerais.

MEYER, J.A; VILLA, L.G.; ROA, G.; ROSSI, S.J. Energia para a secagem dos produtos agropecuários. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.3, n.4, p.4-14. 1978.

NELLIST, M.E.; BRUCE, D.M. Grain dryer testing-procedure, calculation and adjustment of results, and effect of errors. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Silsoe Research Institute, v.52,n.1, p.35-51, 1995.

OSÓRIO, A. G. S. **Projeto e construção de um secador intermitente de fluxos concorrentes e sua avaliação na secagem de café**. Viçosa: UFV, 1982. 57p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1982.

PINTO, F. A. C. **Projeto de um secador de fluxos contracorrentes-concorrentes e análise de seu desempenho na secagem de café (*Coffea arabica* L.)**. Viçosa: UFV, 1993. 72p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1993

PINTO FILHO, G.L. **Desenvolvimento de um secador de fluxos cruzados com reversão do fluxo de ar de resfriamento, para a secagem de café (*Coffea arabica* L.)** Viçosa: UFV, 1993. 72p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1994

SABIONE, P.M.; **Projeto e Avaliação de um secador de fluxos cruzados, intermitente e com reversão do fluxo de ar, na secagem de milho (*Zea mays* L.)**. Viçosa: UFV, 1986. 101p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1986.

SEGLER, G. Pneumatic grain conveying with special reference to agricultural engineering. Natl. **Institute of Agricultural Engineering**, Wrest Park, Silsoe, Bedfordshire, England, 174 p., 1951.

SHIVASTAVA, K. A; GOERING, E. C.; ROHRBACH, P.R. **Engineering principles of agricultural machines**. St Joseph, Michigan: ASAE, 1996. 601p.

SILVA, J.S., **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Viçosa: Ed. Aprenda Fácil, 2000.502p.

SILVA, J.S., **An engineering economic comparison of five drying techniques for shelled corn on Michigan farms.** East Lansing, Michigan State University, 1980. (Ph.D. Dissertation).

SILVA, L.C. **Desenvolvimento e avaliação de um secador de café (*Coffea arabica* L.) intermitente de fluxos contracorrente.** Viçosa: UFV, 1991, 74p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1991.

SILVA, J.S.; AFONSO, A. D.L.; PINTO, F.A. C. **Avaliação de secadores e custo de secagem de produtos agrícolas.** Engenharia na Agricultura. Viçosa: AEAGRI-MG/DEA., v.2,n.2. 19p.1992. (Série Armazenamento).

SILVA, J.S.; RUFFATO, S.; PRECCI, R.L. **Gerenciamento da secagem de café em sistemas combinados.** In: ZAMBOLIM, L.(Ed.) **Café: produtividade, qualidade e sustentabilidade.** Viçosa: UFV, Departamento de Fitopatologia, 2000. 396p.

SILVA, J.S.; SAMPAIO, C.P.; MACHADO, M.C.; LO MONACO, P.A **Preparo, Secagem e Armazenagem.** In: SILVA,J. S. (Ed.) **Secagem e armazenagem de café-tecnologias e custos.** Editor; Juarez de Sousa e Silva. Viçosa: UFV, 2001. 162p.

SILVA, J.S.; NOGUEIRA, R. M., LOPES, R.P. **Um Sistema ideal para secagem e armazenagem de café.** In: ZAMBOLIM, L.(ed.) **Produção Integrada de café.** Viçosa: UFV, Departamento de Fitopatologia, 2003. 710p.

SILVA, J.S.; LUCENA, E.M.P. Estrutura, composição e propriedades das sementes. In: pré-processamento de produtos agrícolas. In: SILVA, J.S.(ed.) **Pré-Processamento de Produtos Agrícolas.** Juiz de Fora, Instituto Maria, 1995. 23-32p.

SILVA, J.S.; LACERDA FILHO, A F., **Construção de secador para produtos agrícolas.** Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1984. 17p. (Informe Técnico, 41)

SOUZA, S.M.C.; CARVALHO, V.L. Efeito de microorganismos na qualidade da bebida de café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.18, n. 187, p.21-26, 1997.

TEIXEIRA, R.A.F., SANTINATO, R. Tempo médio de café nas regiões cafeeiras da Zona da Mata, Rio Doce, Mucuri de Minas Gerais. In: **Congresso Brasileiro de Pesquisa Cafeeira**, 3, 1975, Curitiba – PR. **Resumos...** Rio de Janeiro: IBC/GERCA/EMBRAPA, 1975. p.259-261.

VIEIRA, G. **Secagem intermitente de café (*Coffea arabica* L.) em secadores de fluxos cruzados e em secador experimental de camada fixa**. Lavras; UFLA, 1994.91p. Dissertação (Mestrado em Processamento de Produtos Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, 1994.

VILELA, E.R. Secagem e qualidade do café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.1, n.187, p.63-67, 1997.

APÊNDICE

Apêndice 1- Relação do tempo e teor de umidade na secagem para o café natural e descascado.

-Teste 1

Lote 1		Lote 2	
Tempo (h)	Umidade (%b.u.)	Tempo (h)	Umidade (%b.u.)
08:40	25,82	10:15	25,32
09:40	19,46	11:15	17,03
11:48	18,96	13:23	16,38
12:48	17,27	14:23	15,54
15:03	16,77	16:41	15,04
16:03	15,40	17:41	15,01
18:15	15,00	18:15	15,00
20:10	11,8	20:10	11,8

-Teste 2

Lote 1		Lote 2	
Tempo (h)	Umidade (%b,u,)	Tempo (h)	Umidade (%b,u,)
08:45	24,97	10:21	24,47
09:45	20,83	11:20	22,19
11:50	20,33	13:49	21,69
12:50	16,04	14:49	17,69
15:25	15,54	16:50	17,19
16:25	14,78	17:50	16,83
18:07	14,08	18:07	14,08
19:06	11,9	19:06	11,9

-Teste 3

Lote 1		Lote 2	
Tempo (h)	Umidade (%b,u,)	Tempo (h)	Umidade (%b,u,)
08:36	23,14	10:05	22,64
09:36	18,81	11:05	20,22
11:37	18,31	13:11	19,72
12:36	15,60	14:10	18,98
14:46	15,10	16:13	18,48
15:46	13,74	17:12	15,61
17:43	13,23	17:43	13,24
18:11	11,9	18:11	11,9

Continuação do Apêndice 1

-Teste 4

Lote 1		Lote 2	
Tempo (h)	Umidade (%b,u,)	Tempo (h)	Umidade (%b,u,)
09:23	36,8	10:58	36,30
10:23	32,30	11:58	29,68
12:30	31,8	14:11	29,18
13:30	24,48	15:11	25,62
15:40	23,98	17:19	25,12
16:41	23,54	18:19	19,93
18:52	23,44	20:47	19,43
19:52	17,08	21:47	16,34
21:48	16,11	21:48	16,11
23:59	11,9	23:59	11,9

-Teste 5

Lote 1		Lote 2	
Tempo (h)	Umidade (%b,u,)	Tempo (h)	Umidade (%b,u,)
09:59	32,47	11:42	31,97
10:58	28,49	12:42	25,79
13:18	27,99	14:54	25,29
14:19	22,09	15:54	16,73
16:41	21,59	18:20	16,23
17:40	15,99	19:20	14,43
20:00	14,14	20:00	14,16
22:31	12,00	22:31	12,00

-Teste 6

Lote 1		Lote 2	
Tempo (h)	Umidade (%b,u,)	Tempo (h)	Umidade (%b,u,)
09:15	32,37	10:50	31,87
10:15	25,82	11:50	26,47
12:18	25,32	14:16	25,97
13:48	17,38	15:16	19,37
15:59	16,88	17:28	18,87
16:59	16,63	18:27	13,04
19:00	13,01	19:00	13,02
21:21	12,00	21:21	12,00

Apêndice 2- Relação das temperaturas no sistema para o teste1 (café natural)

lote1	08:40:00	53,37	53,27	40,28	49,33	49,88	49,28	17,75	20,80	23,31	25,83	29,14	26,72
	08:55:00	60,67	60,36	34,74	51,16	48,17	46,03	20,32	21,60	36,11	37,51	41,09	41,16
	09:10:00	60,80	60,53	34,79	52,32	49,18	46,89	20,07	22,40	32,80	44,57	45,10	47,42
	09:25:00	60,53	60,29	35,10	52,50	48,25	46,58	20,78	23,11	32,08	47,90	47,66	49,96
	09:40:00	64,16	63,98	31,54	55,88	49,76	48,72	24,11	23,87	34,53	51,06	50,97	53,45
lote2	09:55:00	52,14	52,14	41,30	51,86	51,75	50,86	47,96	24,50	52,02	39,96	42,63	35,09
	10:10:00	60,22	60,33	47,86	59,12	59,37	58,36	31,61	25,40	39,18	30,28	30,05	42,71
	10:25:00	68,06	68,08	43,31	56,40	52,53	49,42	27,85	25,96	32,67	35,14	38,70	45,32
	10:40:00	64,40	64,67	41,98	57,53	53,73	50,09	31,37	26,65	37,76	44,41	47,69	54,49
	10:55:00	62,02	62,32	41,23	56,35	51,60	49,47	36,14	27,55	42,34	49,07	51,27	55,93
lote1	11:10:00	63,62	63,80	40,42	56,83	51,14	49,70	33,00	28,00	42,07	51,62	52,59	57,38
	11:25:00	67,97	68,00	40,81	66,72	65,50	64,02	54,18	28,53	55,88	37,30	41,73	36,20
	11:40:00	61,23	61,08	52,31	60,20	58,98	57,60	34,79	28,61	51,58	41,50	41,64	42,77
	11:55:00	65,47	65,28	44,39	55,25	50,40	49,74	34,69	29,00	45,16	44,18	45,47	48,89
	12:10:00	64,60	64,49	40,27	51,91	45,95	43,20	32,66	29,20	40,73	49,16	50,90	54,11
lote2	12:25:00	61,94	61,68	39,40	51,37	45,08	42,56	30,94	29,04	47,07	54,55	54,87	57,31
	12:40:00	63,24	63,11	36,46	51,95	44,40	41,48	28,86	29,10	42,79	55,77	55,28	58,14
	12:55:00	60,30	60,04	40,54	58,97	57,17	55,33	41,33	29,89	55,58	54,59	53,76	56,59
	13:10:00	67,25	67,12	53,26	65,93	64,82	63,42	55,66	30,60	55,78	36,76	43,23	40,27
	13:25:00	65,78	65,60	53,03	52,17	52,53	51,23	33,97	30,20	58,95	45,41	44,74	49,94
lote1	13:40:00	63,11	62,83	42,20	51,78	46,68	43,77	29,15	31,00	46,43	52,68	53,00	56,57
	13:55:00	61,99	61,80	40,26	51,75	46,41	43,07	29,66	31,10	53,80	55,50	55,31	58,27
	14:10:00	63,13	62,98	39,63	52,05	46,33	42,98	32,14	30,97	52,13	56,19	55,74	58,94
	14:25:00	62,39	62,22	44,26	61,55	60,87	59,70	48,91	30,70	60,31	56,25	53,25	58,82
	14:40:00	62,17	61,96	49,95	61,07	60,88	59,67	52,31	30,40	56,92	48,05	46,04	41,71
lote2	14:55:00	58,26	57,79	40,19	48,10	45,43	43,03	37,88	29,93	51,92	44,46	45,04	52,12
	15:10:00	64,56	64,40	42,41	51,85	47,67	43,08	31,30	28,77	51,51	43,49	45,70	48,21
	15:25:01	63,37	63,08	38,82	53,73	47,28	42,23	28,39	29,10	51,95	52,79	54,72	56,30
	15:40:00	58,17	57,92	36,68	52,44	45,27	41,14	26,47	28,60	49,63	56,31	56,49	58,17
	15:55:00	67,50	67,04	36,11	54,93	46,84	41,19	25,92	28,00	49,90	57,31	57,69	59,49
lote1	16:10:00	60,50	60,21	40,75	58,80	57,34	55,74	44,05	28,30	59,47	57,14	53,86	58,79
	16:25:00	62,30	61,99	53,46	61,27	61,10	59,98	53,64	28,03	53,84	50,49	44,15	35,50
	16:40:00	57,52	57,28	51,68	56,54	56,93	56,17	32,47	26,50	46,31	40,99	40,39	43,91
	16:55:00	70,04	69,57	40,60	60,71	54,08	51,23	25,71	25,20	57,94	50,52	49,69	52,36
	17:10:00	59,06	58,91	38,81	55,52	50,10	47,95	25,26	24,41	52,40	56,03	54,84	56,87
lote2	17:25:00	64,94	64,61	38,86	58,63	52,15	49,27	24,42	24,00	48,09	57,78	56,05	58,49
	17:40:00	62,50	62,28	36,73	56,79	50,01	48,20	24,36	23,50	46,01	57,56	55,65	58,17
	17:55:00	60,99	60,81	47,33	60,18	59,69	58,89	53,65	23,10	56,21	35,66	30,46	42,25
	18:10:00	59,23	58,88	52,66	58,35	58,30	57,71	26,58	22,68	36,71	50,34	43,61	50,67
	18:25:00	65,10	64,80	55,12	63,57	62,55	61,63	23,59	22,31	37,28	50,84	46,31	51,93
lote1	18:40:00	65,28	65,04	55,16	63,18	62,42	61,22	24,62	21,90	31,55	50,08	48,20	51,87
	18:55:00	61,31	61,34	55,92	60,89	61,07	60,21	34,57	21,60	45,98	50,53	49,45	52,83
	19:10:00	57,58	57,43	52,05	56,98	57,02	56,45	34,78	21,49	42,86	51,12	48,93	54,14
	19:25:00	62,01	61,80	44,83	60,89	60,41	59,88	52,72	20,90	51,88	52,38	48,13	52,65
	19:40:01	63,23	62,99	39,27	62,11	57,90	54,65	44,63	20,70	51,53	20,10	27,18	33,87
lote2	19:55:00	63,06	62,78	42,43	61,72	57,38	54,90	48,32	20,40	49,64	23,59	30,08	29,21
	20:10:00	55,81	55,23	37,32	54,39	53,82	53,09	31,13	19,90	34,21	19,64	23,98	28,16

Apêndice 3- Relação das temperaturas no sistema para o teste 2 (café natural)

lote 1	08:45:01	56,71	56,50	28,28	47,66	45,04	42,62	18,74	21,20	36,99	18,06	24,25	23,68
	09:00:00	65,40	64,96	15,21	53,75	49,67	47,69	21,41	21,74	47,13	31,29	35,17	38,23
	09:15:00	70,91	70,46	19,04	59,68	54,63	52,26	22,48	22,71	53,87	42,12	45,26	48,98
	09:30:00	55,00	54,92	21,72	51,34	47,42	46,54	24,88	23,40	44,75	45,95	48,44	50,32
	09:45:00	67,03	66,79	22,00	58,61	53,26	51,40	25,73	24,40	51,33	47,73	50,23	53,23
	10:00:00	59,82	59,77	22,61	59,10	58,57	57,64	48,04	24,86	55,01	24,34	31,61	41,63
	10:15:00	61,84	61,73	49,33	60,78	59,80	58,55	30,07	24,90	45,53	26,30	24,94	29,20
	10:30:00	68,88	68,91	47,90	57,85	53,14	48,14	30,74	25,60	37,87	32,84	35,72	33,03
lote 2	10:45:00	65,02	65,20	46,46	57,86	52,83	49,26	34,92	26,11	44,54	42,33	46,30	43,50
	11:00:00	62,42	62,70	45,04	56,63	51,79	48,42	32,05	26,90	45,81	47,05	49,89	49,41
	11:15:00	65,40	65,49	43,47	58,27	52,24	48,48	30,31	26,69	42,64	49,73	52,16	51,90
	11:30:00	62,58	62,59	41,12	60,80	60,02	58,22	49,39	27,30	53,72	37,79	32,29	35,87
	11:45:00	52,43	52,69	41,32	52,72	53,10	52,37	47,97	27,80	52,30	39,09	38,67	37,57
	12:00:00	69,81	69,73	35,72	60,57	52,43	51,79	47,95	28,28	59,33	43,37	47,61	43,75
	12:15:00	71,26	71,16	35,93	63,41	54,42	53,83	47,07	28,60	66,20	49,85	56,42	52,03
	12:30:00	71,80	71,68	36,93	64,66	55,86	54,46	45,71	28,90	67,04	54,86	60,22	54,97
lote 1	12:45:00	72,21	71,97	37,68	64,13	55,57	53,94	44,28	29,10	65,89	57,25	61,31	57,02
	13:00:00	70,07	69,89	38,45	64,03	55,87	54,73	42,72	29,43	67,72	59,15	63,08	60,65
	13:15:00	61,59	61,03	44,24	60,14	58,92	57,70	44,47	29,30	58,40	53,61	57,79	53,86
	13:30:00	60,77	60,68	39,73	60,13	59,41	58,25	53,72	29,31	55,09	37,79	35,87	34,71
	13:45:00	53,53	53,33	51,03	53,44	53,17	52,23	32,55	29,51	38,68	39,03	38,21	33,78
	14:00:00	62,74	62,66	48,99	57,24	51,06	49,03	30,94	29,30	37,51	45,28	48,60	45,43
	14:15:00	60,26	60,15	47,51	56,02	49,82	47,93	29,42	29,30	39,24	51,89	54,51	51,75
	14:30:00	62,63	62,46	45,97	56,46	50,50	47,43	30,15	29,50	40,95	53,74	55,51	53,65
lote 2	14:45:00	62,71	62,62	46,42	57,25	50,53	49,17	30,23	29,70	43,46	54,47	56,17	54,55
	15:00:00	61,13	61,05	45,13	60,53	60,04	58,97	52,35	29,78	56,30	38,97	39,61	35,55
	15:15:00	64,69	64,37	55,06	63,47	62,48	61,38	33,35	29,50	53,46	44,89	42,52	39,47
	15:30:00	63,01	62,86	48,30	58,03	53,48	51,69	31,52	29,40	49,13	48,49	52,56	47,36
	15:45:00	56,19	55,98	46,38	54,65	50,00	48,80	31,73	29,20	38,03	53,93	56,45	52,75
	16:00:00	65,66	65,30	45,71	59,01	53,11	51,24	31,79	30,22	47,83	55,55	57,13	53,97
	16:15:01	56,90	56,65	44,35	54,11	49,38	47,71	30,36	30,42	37,46	56,42	56,53	54,37
	16:30:00	81,12	80,06	42,97	77,04	74,70	73,17	54,00	28,66	56,10	51,77	42,39	45,63
lote 2	16:45:00	62,15	61,58	50,96	60,48	60,02	59,36	51,71	26,57	55,48	44,99	43,19	37,70
	17:00:00	66,63	66,33	50,36	58,95	55,38	54,08	29,35	25,33	32,43	43,43	43,74	43,18
	17:15:00	64,47	64,35	45,13	57,72	51,51	49,95	26,66	24,20	31,61	49,25	52,32	50,87
	17:30:00	63,56	63,30	42,94	57,45	51,04	49,55	26,51	23,50	29,37	52,36	54,37	53,72
	17:45:00	63,28	62,93	55,62	61,63	60,82	59,66	24,68	22,90	30,67	51,14	51,42	51,59
	18:00:00	65,49	65,13	59,34	64,34	64,19	63,29	22,45	22,31	40,24	49,56	49,47	47,58
	18:15:00	64,19	64,13	46,50	63,12	62,30	61,92	53,73	21,63	53,97	45,03	50,23	46,09
	18:30:00	62,17	61,93	36,57	61,00	56,76	52,86	37,17	21,10	52,23	39,04	37,16	36,33
lote 1	18:45:00	57,54	57,58	41,20	57,11	56,82	56,65	49,72	20,80	49,61	19,16	21,54	34,87
	19:00:00	58,75	58,57	36,56	57,85	53,74	50,29	33,39	20,40	51,07	23,14	28,83	27,67
	19:06:00	54,08	53,55	34,54	52,81	52,56	51,96	30,37	20,20	33,24	22,54	26,95	26,96

Apêndice 4- Relação das temperaturas no sistema para o teste 3 (café natural)

lote 2	10:06:00	59,5	59,58	48	56,32	55,4	54,23	30,25	23,9	50,51	31	25,16	29,58
	10:21:00	66,76	66,86	45,64	59,26	54,22	50,99	30,59	24,22	51,49	36,56	40,86	44,95
	10:36:00	60,19	60,46	43,67	55,98	51,74	48,96	31,67	24,4	45,3	43,52	48,24	52,66
	10:51:00	64,36	64,61	42,06	58,63	53,38	50,46	34,97	25	38,8	47,07	51,11	56,93
	11:06:00	62,95	63,14	40,16	62,03	60,13	58,31	42,92	25,2	59,13	48,06	34,96	59,07
	11:21:00	54,83	55,06	47,43	54,84	54,45	53,4	50,02	25,2	48,75	38,84	38,29	39,53
	11:36:00	52,81	52,77	44,14	49,49	46,39	44,85	29,48	25,4	47,16	40,34	39,66	40,88
lote 1	11:51:00	63,88	63,59	41,56	56,23	49,96	46,52	28,86	25,91	44,64	46,78	47,33	48,03
	12:06:00	69,09	68,83	39,67	60,43	53,25	51,15	30,38	26,4	43,19	51,14	53,99	52,97
	12:21:00	70,73	70,52	38,35	62,77	55,18	52,77	30,75	26,7	46,78	55,1	58,13	57,02
	12:36:00	60,81	60,75	37,59	57,43	51,12	48,49	32,11	26,92	49,06	56,78	53,85	58,46
	12:51:00	67	66,82	37,86	65,66	64,83	63,7	53,93	27,28	53,65	34,5	35,43	34,3
	13:06:00	65,23	65	57	62,82	62,64	61,42	33,53	27,07	48,59	40,46	30,62	39,16
	13:21:00	65	64,76	44,1	57,96	51,23	48,24	31,31	27,21	40,62	46,45	49,71	48,57
lote 2	13:36:00	62,13	62,01	41,81	56,95	51,07	48,07	31,25	27,58	40,32	50,86	54,71	52,56
	13:51:00	62,14	61,91	41,12	57,1	50,67	46,79	30,82	27,48	40,36	52,79	54,37	54,79
	14:06:00	63,21	63,01	39,52	57,13	50,31	48,12	31,28	27,2	40,52	53,76	55,96	55,19
	14:21:00	65,58	65,33	48,17	64,3	63,21	61,83	54,09	27,3	56,34	32,51	29,61	32,32
	14:36:00	62,98	62,75	54,46	61,91	61,03	59,76	33,49	27,35	53,76	44,95	32,18	45,76
	14:51:00	59,46	59,4	43,98	57,85	52,95	50,95	28,74	27,6	37,38	48,31	50,44	48,36
	15:06:00	61,78	61,62	40,01	57,52	52,29	48,89	29,29	27,1	48,93	52,47	55,17	54,39
lote 1	15:21:00	61,38	61,21	39,08	57,21	51,55	49,51	28,85	27,29	47,61	54,81	56,68	56,52
	15:36:00	67,58	67,29	39,18	59,71	53,8	51,03	30,31	27,4	38,65	55,79	57,24	57,19
	15:51:00	65,27	64,98	50,22	63,85	62,78	61,87	54,74	27,7	57,9	31,71	28,02	31,11
	16:06:00	56	56,44	55,45	57,06	57,3	56,36	40,31	28	55,37	43,88	33,29	49,01
	16:21:00	62,77	62,63	42,38	58,15	52,35	50,62	30,46	28,4	46,63	50,92	51,92	50,72
	16:36:00	64,32	63,97	37,26	58,81	51,82	49,27	30,02	26,5	42,9	54,49	55,58	54,42
	16:51:00	57	56,89	36,08	54,97	48,98	47,71	27,6	25,6	44,49	56,96	57,11	56,61
lote 2	17:06:00	64,04	63,77	36,32	57,89	51,16	49,08	27,96	25,1	52,18	57	56,93	56,67
	17:21:00	61,54	61,28	46,77	60,44	59,96	59,23	52,43	24,6	57,07	27,96	38,21	45,1
	17:36:00	59,1	58,98	49,15	58,43	58,06	57,44	52,51	24,2	52,63	43,67	39,15	39,41
	17:51:00	64,62	64,46	52,76	63,42	62,42	61,48	24,79	23,87	46,95	43,2	45,33	46,08
	18:06:00	65,74	65,44	54,67	64,06	63,01	61,95	23,16	23,11	50,95	44,41	52,22	49,45
	18:11:00	66,11	65,95	56,27	64,9	64,03	62,98	23,72	23,1	41,84	47,08	49,35	47,25

Apêndice 5- Relação das temperaturas no sistema para o teste 4 (café descascado)

lote 1	09:23:00	58,43	57,98	27,18	56,71	55,54	54,38	19,69	21,90	23,44	24,86	24,35	25,94
	09:38:00	59,29	59,27	26,55	52,30	48,41	47,33	24,46	22,70	33,72	24,30	26,66	26,56
	09:53:00	60,40	60,10	26,55	51,62	47,49	46,26	25,62	23,00	35,80	26,65	35,00	31,27
	10:08:00	62,67	62,76	26,62	55,29	50,88	49,38	30,28	24,00	39,15	29,82	41,39	38,31
	10:23:00	67,01	67,07	26,46	58,16	53,76	51,49	34,82	24,40	44,35	33,81	45,18	45,85
	10:38:00	64,88	65,07	26,66	63,72	62,91	61,27	45,28	24,67	46,59	29,80	33,64	43,53
	10:53:00	60,71	61,01	52,02	60,35	59,81	58,31	34,40	25,40	41,01	27,50	27,86	43,19
lote 2	11:08:00	67,13	67,28	37,84	59,75	54,88	52,71	29,30	25,80	46,20	26,61	26,89	34,13
	11:23:00	60,19	60,27	37,02	56,14	51,06	49,30	28,42	26,30	40,85	27,91	33,44	32,28
	11:38:00	64,78	64,92	36,06	58,84	52,70	51,00	29,78	26,20	41,58	31,73	41,55	37,08
	11:53:00	65,73	65,66	36,13	58,70	52,65	51,50	29,53	27,20	45,59	37,96	44,90	41,65
	12:08:00	68,04	68,01	36,96	66,39	64,99	63,46	49,65	27,60	46,59	33,56	35,72	39,20
	12:23:00	60,87	60,79	52,27	60,22	59,51	58,35	35,16	27,90	42,48	37,03	36,86	36,28
	12:38:00	67,53	67,33	37,89	60,44	55,05	53,62	32,82	28,00	42,86	31,40	32,89	33,58
lote 1	12:53:00	67,32	67,23	36,17	61,23	55,50	53,81	30,47	27,90	37,63	32,89	39,69	38,91
	13:08:00	67,48	67,36	35,46	61,16	55,25	53,60	30,38	28,20	37,75	38,94	45,32	43,69
	13:23:00	61,35	61,29	35,00	57,59	52,12	50,21	31,02	27,90	40,47	41,27	46,08	43,92
	13:38:00	59,69	59,61	36,02	58,80	58,10	56,67	45,66	28,16	47,83	33,69	28,80	31,02
	13:53:00	64,10	63,83	52,89	62,82	61,85	60,60	44,88	28,50	41,87	37,59	40,54	39,98
	14:08:00	63,45	63,30	40,95	59,16	57,31	55,96	29,58	29,10	42,49	33,66	33,90	35,58
	14:23:00	63,47	63,37	38,30	58,74	53,50	51,90	27,71	29,10	40,88	33,96	39,64	35,47
lote 2	14:38:00	63,64	63,45	37,48	57,78	52,53	50,65	30,31	29,09	38,38	39,04	44,36	40,29
	14:53:00	63,84	63,64	36,47	57,89	51,82	50,63	30,72	28,50	36,45	41,37	45,60	42,37
	15:08:00	61,87	61,81	35,96	57,44	52,12	49,74	33,37	28,61	44,34	42,41	46,58	43,75
	15:23:00	63,43	63,19	37,89	62,02	61,10	59,68	46,63	28,50	45,62	35,02	40,78	36,09
	15:38:00	64,27	63,80	53,31	62,90	61,85	60,50	29,90	28,50	44,44	38,88	38,10	36,38
	15:53:00	65,54	65,22	43,33	59,66	53,62	52,17	32,52	29,25	49,77	35,12	37,74	34,87
	16:08:00	65,15	64,76	40,22	59,40	52,79	51,20	31,57	29,50	54,11	39,18	45,80	40,10
lote 1	16:23:00	64,05	63,82	39,59	58,79	52,38	51,04	30,49	29,81	52,68	41,58	46,32	42,06
	16:38:00	66,45	66,01	34,70	58,62	50,38	50,74	29,90	27,10	50,97	41,37	45,64	41,43
	16:54:00	65,70	65,54	42,60	63,94	63,52	63,05	52,22	25,37	44,35	30,70	23,56	31,11
	17:09:00	66,96	66,35	54,16	65,22	64,23	63,60	29,95	24,39	42,80	34,48	36,22	37,94
	17:24:00	72,31	71,93	43,53	63,97	58,53	57,39	26,07	23,30	41,23	31,02	31,98	32,08
	17:39:00	64,59	64,18	36,45	58,61	51,83	50,75	26,57	22,50	34,25	33,86	39,45	34,41
	17:54:00	63,97	63,52	34,81	58,26	51,40	50,14	25,46	21,60	43,63	37,80	44,35	38,64
lote 2	18:09:00	66,55	66,33	34,33	60,11	52,26	51,17	24,33	21,10	42,28	40,28	46,62	41,54
	18:24:00	60,25	60,15	39,60	59,41	58,89	58,13	48,94	20,50	50,91	24,63	30,66	37,95
	18:39:00	77,37	75,53	52,85	73,09	69,70	68,63	46,77	19,85	42,38	38,64	38,96	38,02
	18:54:00	64,11	63,47	47,84	58,34	56,41	54,82	22,72	19,80	34,89	33,26	33,23	34,44
	19:09:00	68,55	68,11	32,49	60,68	51,15	50,44	24,16	19,90	39,80	35,96	41,77	37,88
	19:24:00	68,40	68,22	30,42	61,88	52,22	50,76	25,32	19,70	45,91	42,36	47,35	42,36
	19:39:00	67,81	67,58	29,88	60,12	50,59	49,37	25,33	19,50	36,40	45,46	49,27	45,83
lote 1	19:54:00	66,53	66,24	29,69	60,13	50,44	49,50	23,25	19,20	35,24	46,58	50,58	46,74
	20:09:00	66,15	65,94	28,88	59,86	49,96	49,02	24,46	18,80	39,06	47,51	51,17	47,88
	20:24:00	65,11	65,07	44,47	63,97	63,24	62,58	52,49	18,30	50,42	18,14	23,50	37,84
	20:39:00	64,47	64,15	52,51	62,98	62,03	61,49	35,45	18,00	45,68	33,96	35,10	38,86
	20:54:00	68,13	67,83	43,47	59,26	53,55	50,73	20,88	17,40	48,27	31,11	32,56	31,88
	21:09:00	61,70	61,56	38,28	57,11	49,95	47,33	20,48	16,90	45,37	36,74	41,22	36,48
	21:24:00	64,28	63,99	37,57	57,85	50,50	47,28	20,67	16,70	43,33	41,45	44,91	41,55
	21:39:00	62,56	62,28	37,28	57,42	49,89	46,80	19,73	16,50	45,96	43,96	46,83	44,65
	21:54:00	63,84	63,60	51,49	62,20	60,84	59,80	30,27	16,20	46,03	43,74	45,38	42,91

Continuação do Apêndice 5

22:09:00	63,10	62,89	54,16	61,67	60,62	59,63	31,48	16,08	48,52	40,79	42,08	39,89
22:24:00	60,33	60,16	51,44	59,03	58,14	57,30	29,20	16,10	46,24	40,35	41,97	39,91
22:39:00	61,17	61,09	52,52	60,05	59,32	58,44	30,92	16,00	48,96	39,72	41,56	39,31
22:54:00	58,78	58,61	50,48	57,59	57,00	56,16	30,82	15,70	45,66	40,31	41,05	38,29
23:09:00	65,98	64,84	52,05	63,96	61,83	60,69	31,10	15,50	39,25	39,20	40,64	38,79
23:24:00	63,61	63,37	53,31	62,00	61,09	60,18	30,38	15,60	46,16	38,79	41,16	38,53
23:39:00	64,08	63,88	53,62	62,52	61,36	60,39	29,49	15,49	48,77	39,46	41,83	40,05
23:54:00	62,50	62,37	53,23	61,26	60,52	59,40	30,03	15,68	41,84	40,95	43,14	40,44
23:59:00	61,53	61,34	52,60	60,22	59,43	58,34	30,11	15,70	38,94	41,09	43,01	40,43

Apêndice 6- Relação das temperaturas no sistema para o teste 5 (café descascado)

	Hora	Sar	Sarg	CD1	Dvi	DVm	DVs	CD2	S1	S2	S3	S4	CS
lote 1	09:59:00	62,02	62,12	29,02	56,31	56,03	55,19	21,84	23,39	40,76	24,24	24,57	24,47
	10:14:00	63,63	63,76	27,4	55,76	51,06	49,53	26,71	24,45	45,04	25,94	28,28	27,09
	10:29:00	66,43	66,19	27,82	57,87	51,28	49,43	28,58	25,6	47,51	28,41	35,65	31,48
	10:44:00	65,54	65,66	27,66	58,48	52,62	50,19	30,08	26,21	49,55	32,29	42,54	39,06
	10:59:00	66,28	66,57	27,97	65,12	63,24	60,95	45,03	27,23	52,75	37,11	44,53	43,64
	11:14:00	65,01	65,45	27,04	64,65	64,24	62,78	53,26	27,4	43,64	27,2	30,18	43,32
	11:29:00	64,24	64,44	53,82	63,64	62,82	61,5	44,16	28,38	38,94	28,85	26	42,27
lote 2	11:44:00	65,72	66,03	50,17	60,57	59,22	57,65	31,54	28,81	38,84	27,89	27,05	33,7
	11:59:00	70,46	70,54	35,61	62,04	53,4	51,77	29,36	29,4	41,33	29,27	32,08	31,13
	12:14:00	72,82	72,66	33,59	62,02	53,41	52,07	31,74	29,3	41,6	35,2	41,85	35,16
	12:29:00	69,96	69,88	33,74	61,87	53,74	53,22	30,42	29,45	48,9	39,29	46,48	41,73
	12:44:00	69,95	69,78	34,61	62,81	54,77	53,7	31,37	30,6	55,02	42,76	48,75	44,42
	12:59:00	57,76	57,87	44,63	57,5	57,13	55,68	49,05	30,8	48,54	31,31	29,83	31,21
	13:14:00	63,05	62,64	51,42	61,51	60,34	59,43	31,6	30,1	42,96	35,66	35,92	36,9
lote 1	13:29:00	70,32	70,05	47,11	61,99	56,49	54,02	33,63	30,91	38,1	32,08	35,89	34,58
	13:44:00	62,82	62,64	42,92	57,88	52,08	49,97	31,8	31,2	37,54	33,89	44,1	39,04
	13:59:00	65,58	65,49	43,21	59,32	53,3	50,87	32,94	31,8	38,93	38,23	47,03	42,44
	14:14:00	64,46	64,39	43,51	59,75	54,01	51,03	32,01	32,3	39,22	41,27	48,56	44,34
	14:29:00	66,17	65,94	44,75	63,36	61,97	59,29	45,87	32,5	53,32	38,29	40,68	42,83
	14:44:00	65,84	65,44	54,93	64,73	63,83	62,05	48,2	32,4	45,06	41,05	40,88	40,68
	14:59:00	68,19	67,97	49,24	61,24	58,02	55,31	33,7	31,8	51,73	34,17	34,39	35,46
lote 2	15:14:00	63,01	62,88	43,75	58,8	53,95	51,19	34,07	32,4	48,82	36,5	42,37	37,86
	15:29:00	63,73	63,51	41,31	58,05	52,57	49,79	34,89	31,98	53,69	40,87	46,69	42,34
	15:44:00	62,02	61,82	40,23	57,04	50,78	48,84	26,48	31,55	32,5	43,45	47,78	44,74
	15:59:00	61,01	60,87	44,51	60,39	60,08	58,64	48,8	31,2	52,38	38,15	37,9	37,72
	16:14:00	63,54	63,22	47,7	62,45	62,13	60,5	45,64	31,39	45,58	36,47	34,17	35,71
	16:29:00	65,21	64,87	54,74	64,15	63,63	62,07	29,94	30,82	45,02	39,37	37,17	40,35
	16:44:00	64,24	63,88	43,39	58,22	53,05	51,9	27,77	30,52	52,57	35,88	39,13	36,27
lote 1	16:59:00	62,85	62,47	39,79	57,52	51,43	50,31	26,7	29,57	49,52	40,93	46,24	41,3
	17:14:00	61,63	61,52	36,42	56,11	49,72	49,73	24,33	26,02	48,3	42,26	46,85	42,45
	17:29:00	59,43	59,41	36,6	55,57	49,32	49,3	24,28	25,53	40,01	43,71	48,01	44,19
	17:44:00	65,04	64,98	40,53	64,08	63,35	62,82	49,64	24,8	52,93	43,92	45,75	42,13
	17:59:00	64,41	64,36	46,88	63,81	63,55	62,84	46,78	24,59	44,92	28,85	27,02	32,35
	18:14:00	62,97	62,78	52,5	62,27	61,69	61,08	29,25	23,94	45,76	36,65	34,38	43,54
	18:29:00	66,17	66,18	40,52	58,69	52,86	50,51	25,01	23,3	32,4	33,21	37,06	38,45
lote 2	18:44:00	64,58	64,59	39,09	58,57	52,24	48,08	24,13	26,6	32,63	41,88	47,56	43,63
	18:58:00	64,11	64,14	38,38	58,75	51,7	47,43	23,59	28,1	32,7	46,01	50,28	47,02
	19:14:00	60,86	60,79	36,89	55,47	49,35	45,01	22,87	28,97	31,17	47,55	51,13	48,73
	19:29:00	61,14	61,03	36,96	56,55	50,26	45,74	23,25	29,53	32,56	47,68	51,63	49,2
	19:44:00	59,87	59,65	41,13	58,44	58,16	57,05	46,47	23,5	48,65	34,24	24,5	39,88
	19:59:00	61,37	61,18	51,89	60,86	60,76	59,6	29,16	23,11	48,67	37,36	35,49	45,73
	20:14:00	59,37	59,37	48,86	58,65	57,89	57,44	27,56	21,53	41,11	33,41	39,48	38,7
	20:29:00	67,14	66,92	53,26	65,54	64,07	62,47	28	21,7	43,48	38,99	41,83	40,48
	20:44:00	64,56	64,52	53,28	63,62	62,61	61,91	28,16	20,9	40,54	39,31	42,32	40,66
	20:59:00	63,07	62,94	52,35	61,94	60,95	59,72	28,52	21,1	39,11	42,16	44,45	42,42
	21:14:00	68,82	68,56	55,38	67,05	65,68	64,56	26,84	20,53	41,2	42,51	44,43	41,72
	21:29:00	65,34	65,3	54,69	64,16	63,27	62,28	26,54	20,37	41,17	42,57	45,53	43,83
	21:44:00	64,56	64,58	43,87	63,55	62,69	62,22	40,59	19,99	44,78	36,9	44,78	39,35
	21:59:00	61,1	60,98	40,96	60,46	57	55,63	41,44	19,71	44,26	22,12	36,85	37,29
	22:14:00	61,94	61,91	42,55	61,4	57,34	54,58	43,43	20,12	41,77	23,97	33,52	24,51

Continuação do Apêndice 6

22:29:00	48,19	48,46	39	48,65	48,96	48,58	25,37	20,05	38,01	23,35	22,74	23,19
22:31:00	47,16	47,4	37,84	47,61	47,9	46,87	24,26	20,39	27,9	21,83	29,38	24,11

Apêndice 7- Relação das temperaturas no sistema para o teste 6 (café descascado)

	Hora	Sar	Sarg	CD1	Dvi	DVm	DVs	CD2	S1	S2	S3	S4	CS
lote 1	09:15:00	50,79	50,96	27,48	50,69	51,01	49,99	16,7	20,9	23,6	21,88	23,29	24,06
	09:30:00	57,12	57,08	25,69	49,36	47,24	44,9	21,17	22,4	34,69	24,04	27,36	25,76
	09:45:00	58,09	57,99	26,49	51,03	48,61	45,97	23,16	23,66	35,98	26,68	34,4	28,83
	10:00:00	64,46	64,37	26,92	55,05	50,8	48,16	25,43	24,74	40,14	30,86	41,26	34,15
	10:15:00	64,08	63,94	27,22	55,89	50,29	47,46	27,33	25,97	43,27	36,98	44,66	38,48
	10:30:00	65,26	65,14	26,19	63,88	62,82	60,69	42,96	26,8	45,72	30,88	28,06	29,19
	10:45:00	67,12	66,92	54,62	65,8	65,02	62,33	29,75	27,2	40,64	28,22	27,28	33,91
lote 2	11:00:00	72,79	72,88	44,69	62,37	57,35	52,71	32,86	28	45,55	29,24	31,07	33,08
	11:15:00	66,8	66,95	42,78	59,65	53,99	51	33,37	28,6	43,73	31,77	37,45	38,61
	11:30:00	66,11	66,34	34,75	59,02	52,29	50,45	30,48	28,91	46,43	38,82	45	46,99
	11:45:00	62,98	63,13	35,61	58,2	51,67	50,02	32,05	30,2	46,64	42,43	46,68	43,88
	12:00:00	62,22	62,31	45,42	60,32	59,5	56,73	49,17	30,31	53,65	36,94	35,76	37,8
	12:15:00	62,94	62,76	52,76	61,93	60,94	59,12	30,22	30,5	44,1	40,21	37,95	40,05
	12:30:00	63,97	63,92	36,46	57,78	50,78	49,84	31,99	30,49	41,13	33,52	38,83	34,23
lote 1	12:45:00	72,64	72,53	35,38	64,6	55,34	53,75	31,61	30,8	47,26	37,41	44,62	39,22
	13:00:00	69,44	69,32	35,07	62,38	54,11	50,93	31,58	31,3	44,11	42,13	46,89	42,85
	13:15:00	70,68	70,47	35,55	63,59	54,43	52,57	30,84	31,55	41,81	44,26	48,54	45,74
	13:30:00	72,22	71,98	36,87	64,39	55,35	54,09	32,97	32,01	40,19	45,25	49,8	47,34
	13:45:00	72,26	72,11	37,01	64,85	56,21	54,51	33,19	32,33	43,23	45,83	50,54	48,2
	14:00:00	68,32	68,15	48,93	67,34	66,84	64,54	49,25	32,31	56,18	34,18	32,51	38,54
	14:15:00	67,07	66,8	56,42	66,05	65,19	62,84	34,59	32,6	44,19	40,51	38,11	42,46
lote 2	14:30:00	63,42	63,33	42,92	58,4	53,29	50,44	30,89	32,21	49,54	33,19	38,41	34,98
	14:45:00	65,09	64,86	41,18	58,41	52,93	49,41	31,7	32,8	47,89	38,3	46,64	39,99
	15:00:00	64,22	64,07	40,47	58,77	53,43	48,99	30,35	32,9	48,74	42,94	48,92	43,83
	15:15:00	64,27	64,11	40,12	58,68	53,12	50,04	31,54	32,55	49,15	44,07	49,12	45
	15:30:00	62,56	62,48	46,88	61,85	61,41	59,72	48,32	32,1	49,3	36,82	36,46	34,28
	15:45:00	66,71	66,31	54,7	65,44	64,57	62,54	44,21	32,49	43,94	44,32	41,81	43,59
	16:00:00	67,58	67,33	53,19	63,09	61,91	59,6	31,07	32,57	49,26	39,66	37,82	39,76
lote 1	16:15:00	67,16	66,91	37,88	60,54	53,51	51,71	29,53	32,1	55,67	38,19	47,38	39,93
	16:30:00	66,58	66,43	34,97	60,16	52,95	51,3	29,78	31,38	53,29	44,33	51,93	45,32
	16:45:00	62,2	61,91	34,42	57,53	50,74	49,6	28,23	31,3	50,9	47,39	53,02	48,3
	17:00:00	73,44	72,74	42,65	70,74	68,84	67,4	50,94	29,95	53,95	44,14	40,17	36,53
	17:15:00	58,45	58,27	49,81	57,96	57,77	56,85	48,7	29,34	47,52	43,54	42,9	37,74
	17:30:00	63,51	63,3	46,78	58,02	55,51	53,72	27,78	28,43	33,83	40,37	36,16	37,47
	17:45:00	65,14	65,1	38,69	58,83	52,37	51,01	26,67	26,4	31,96	38,55	45,54	37,08
lote 2	18:00:00	62,09	62,02	36,79	56,72	50,12	49,55	26,39	24,9	30,9	43,64	48,86	41,88
	18:15:00	66,45	66,34	38,18	59,5	52,35	50,43	25,66	25,5	31,56	47,48	51,33	46,49
	18:30:00	69,24	69,07	53,24	66,84	64,96	63,06	35,95	24,89	46,94	47,39	50,84	46,7
	18:45:00	68,23	68,07	55,17	65,7	64,5	62,56	35,7	24,2	48,48	44,3	47,18	45,23
	19:00:00	73,39	73,26	58,63	70,24	68,49	65,6	36,8	26,48	51,1	45,13	49,68	47,85
	19:15:00	73,39	73,26	59,01	70,78	68,81	65,52	34,51	28,01	50,87	45,77	50,94	49,41
	19:30:00	69,53	69,46	57,39	67,84	65,88	63,07	34,97	28,9	50,32	46,07	51,79	50,19
	19:45:00	66,93	66,85	55,86	65,56	63,76	60,99	33,65	29,5	49,16	47,38	51,09	49,74
	20:00:00	66,62	66,44	55,63	64,99	63,69	60,77	32,01	30	47,6	47,51	51,44	49,26
	20:15:00	61,77	61,69	53,04	60,93	60,01	57,31	32,04	30,03	46,07	47,73	51,28	49,08
	20:30:00	59,47	59,16	50,16	58,3	57,21	54,44	29,72	30,2	44,77	47,91	49,89	47,67
	20:45:00	58,56	58,37	50,39	57,59	56,77	54,1	27,65	30,2	45,33	47,61	50,14	48,34
	21:00:00	51,03	50,85	45,4	50,68	50,33	47,82	28,7	30,1	41,85	46,94	48,61	47,22
	21:15:00	65,92	65,52	53,01	63,65	62,15	59,06	31,89	29,9	46,99	46,08	49,01	47,14
	21:21:00	63,28	63,06	53,22	61,9	60,78	58,1	32,15	29,9	46,78	46,22	49,87	48,15

Legenda:

-  processo de secagem dos grãos
-  processo de movimentação dos grãos
-  fluxo contínuo da massa de grãos
-  temperatura da massa de grãos depois da secagem
-  temperatura do ar+grão e no *plenum*,

Apêndice 8 - Consumo energético com movimentação do produto com o ar de secagem

Testes	Carvão	Energia Elétrica	Total
	MJ/kg	MJ/kg	MJ/kg
Café Natural			
Testes 1	32,46	2,85	35,31
Teste 2	25,32	2,12	27,40
Teste 3	33,34	2,74	36,08
Café Descascado			
Teste 4	12,16	1,11	13,27
Teste 5	13,23	1,98	15,21
Teste 6	15,93	1,31	17,24

Apêndice 9 - Consumo energético com movimentação do produto com o ar natural

Testes	Carvão	Energia Elétrica	Total
	MJ/Kg	MJ/Kg	MJ/Kg
Café Natural			
Teste 1	25,31	2,85	28,16
Teste 2	19,07	2,12	21,19
Teste 3	24,66	2,74	27,40
Café Descascado			
Teste 4	8,97	1,11	10,08
Teste 5	9,58	1,98	11,56
Teste 6	8,8	1,31	10,11

Apêndice 10 - Redimensionamento do sistema com base na capacidade de transporte

Dados do protótipo

Capacidade de transporte do sistema: 318,92 kg/h

Massa transportada no sistema: 156 kg (café natural)

Massa transportada no sistema: 232 kg (café cereja descascado)

Câmara de descanso 1: Volume: 0,32 m³

- Porção cilíndrica:

- Altura: 1,09 m
- Diâmetro: 0,60 m

- Porção cônica:

- Altura: 0,13 m
- Diâmetro: 0,60 m

Câmara de descanso 2: Volume: 0,29 m³

- Porção retangular
- Altura: 0,70 m
- Área da base: 0,38 m²
- Porção cônica:

- Diâmetro: 0,60 m
- Altura: 0,20 m

Câmara de secagem: Volume: 0,16 m³

- Pirâmide interna
- Altura: 0,40 m
- Área da base: 0,96 m²
- Pirâmide externa
- Altura: 0,48 m
- Base: 1,10 m²

Redimensionamento

Massa transportada: 624 kg (café natural)

Massa transportada: 928 kg (café cereja descascado)

Câmara de descanso 1: Volume :1,20m³

- Porção cilíndrica:
- Altura: 1,40 m
- Diâmetro: 1,00 m
- Porção cônica:
- Altura: 0,30 m
- Diâmetro: 1,00 m

Câmara de descanso 2: Volume: 0,80 m³

- Porção retangular
- Altura: 0,80 m
- Área da base: 1 m²
- Porção cônica:
- Diâmetro: 1,00 m
- Altura: 0,38 m

Câmara de secagem: Volume: 0,55 m³

- Pirâmide interna
- Altura: 0,60 m
- Área da base: 1,66 x 1,66 m²
- Pirâmide externa
- Altura: 0,70 m
- Base: 1,86 x 1,86 m²

Desenho do secador proposto



Figura 34 - Nova estrutura do secador com sistema pneumático para café,