

JOSÉ CARDOSO SOBRINHO

SIMULAÇÃO E AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE SECAGEM DE CAFÉ

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
2001

AGRADECIMENTO

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Jadir Nogueira da Silva, pela orientação, pela amizade, pelo estímulo e pela dedicação durante o Programa.

Aos professores Juarez de Sousa e Silva e Adílio Flauzino de Lacerda Filho, pelo apoio e pelas sugestões.

À empresa Heringer, nas pessoas de seus dirigentes, em especial ao diretor da empresa Sr. Eduardo, e ao engenheiro-agrônomo Ubiratam, e ao técnico agrícola Gilson, gerentes das unidades de secagem, por permitirem a realização dos trabalhos experimentais nas unidades de secagem, bem como pelo apoio e pelas sugestões no decorrer dos testes experimentais.

Aos meus amigos Professores. Luís César e Paulo Monteiro, pelo convívio e pela amizade durante o Programa.

Ao Eng. Agrícola José Dermeval Saraiva Lopes, pela contribuição na confecção do programa de simulação.

Aos funcionários José Galinari e Francisco Carlos (Chiquinho), pela amizade e pelo apoio.

BIOGRAFIA

JOSÉ CARDOSO SOBRINHO, filho de João Cardoso e Olinda Maria Cardoso, nasceu em Lunardelli, Paraná, em 30 de julho de 1962.

Em fevereiro de 1988, ingressou no curso de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG, concluindo-o em agosto de 1993.

Em dezembro de 1993, foi contratado pela empresa Sementes Ribeiral, de Patos de Minas, MG.

Em agosto de 1995, iniciou o Programa de Pós-Graduação, em nível de mestrado, em Engenharia Agrícola, concluindo-o em julho de 1997.

Em agosto de 1997, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de doutorado, em Engenharia Agrícola, submetendo-se à defesa de tese em abril de 2001.

ÍNDICE

	Página
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Processos de secagem.....	3
2.2. Secagem de café.....	3
2.3. Secadores rotativos.....	4
2.4. Secadores intermitentes, de coluna de fluxos cruzados.....	5
2.5. secagem em terreiros.....	5
2.6. Fornalhas	6
2.7. Fornalhas com trocadores de calor.....	6
2.8. Combustão.....	7
2.9. Combustíveis.....	9
2.9.1. Poder calorífico.....	10
2.9.2. Madeira como combustível.....	10
2.9.3. Gás liquefeito de petróleo como combustível (GLP).....	11
2.10. Qualidade do café.....	12

2.11. Avaliação dos sistemas e do custo operacional de secagem.....	12
2.11.1. Avaliação energética dos sistemas de secagem.....	12
2.11.2. Avaliação dos parâmetros associados aos sistemas de secagem.....	14
2.11.2.1. Análise de investimentos.....	14
2.11.2.2. Avaliação dos custos operacionais de secagem.....	14
2.12. Simulação de secagem.....	18
2.13. Uso de vapor de água no aquecimento de ar de secagem.....	20
2.14. Análise econômica do sistema.....	20
2.14.1. Taxa interna de retorno (TIR).....	21
2.14.2. Tempo de retorno do capital (TRC).....	21
2.14.3. Vapor presente líquido (VPL).....	21
2.14.4. Relação receita custo (RRC).....	22
2.14.5. Fluxo de caixa incremental.....	23
2.15. Análise de custo.....	24
2.15.1. Custo fixo total (CFT).....	24
2.15.2. Custo fixo médio (CFMe).....	24
2.15.3. Custo variável total (CVT).....	24
2.15.4. Custo variável médio (CVMe).....	25
2.15.5. Custo de combustível (Ccomb).....	25
2.15.6. Custo de manutenção e conservação (C3).....	25
2.15.7. Custo de oportunidade (CO).....	25
2.15.8. Depreciação anual (Da).....	26
2.15.9. Custo operacional total (CopT).....	26
2.15.10. Custo de inadequação.....	27
2.15.11. Custo da energia elétrica.....	27
2.15.12. Custo total de secagem (Ctotal).....	27
2.15.13. Custo total médio (CTMe).....	27
2.16. Análise de rentabilidade sob a ótica da renda e do custo.....	28
2.16.1. Renda bruta total (RBT).....	28
2.16.2. Margem bruta total (MBT).....	28
2.16.3. Renda líquida operacional (RLOp).....	29

2.16.4. Renda líquida total (RLT).....	29
2.16.5. Índices de rentabilidade (IRT).....	30
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	31
3.1. Procedimentos gerais.....	31
3.2. Sistemas de secagem.....	35
3.2.1. Secagem em terreiro.....	35
3.2.2. Secador rotativo	35
3.2.3. Secador intermitente, de coluna de fluxos cruzados.....	37
3.3. Monitorização das operações.....	39
3.3.1. Tempo.....	39
3.3.2. Amostragem do produto.....	39
3.3.3. Uidade do produto.....	41
3.3.4. Temperatura de bulbo seco e bulbo úmido.....	41
3.3.5. Simulação de secagem.....	42
3.3.6. Temperatura do ar intergranular, de exaustão e de secagem.....	52
3.3.7. Análise da qualidade do produto após a secagem.....	54
3.3.8. Parâmetros relativos ao combustível.....	54
3.3.9. Energia elétrica para movimentar o ar de secagem e o produto.....	55
3.3.10. Avaliação do sistema de secagem.....	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	57
4.1. Parâmetros relativos ao ar de secagem e ar ambiente.....	56
4.1.1. Temperatura do ar intergranular.....	56
4.1.2. Temperatura do ar de exaustão.....	60
4.1.3. Temperatura e umidade relativa do ar ambiente.....	60
4.2. Parâmetros relativos ao produto.....	61
4.2.1. Umidade dos grãos.....	61
4.2.2. Massa específica global.....	66
4.2.3. Análise da qualidade do produto após a secagem	70
4.3. Parâmetros relativos ao combustível.....	71
4.4. Avaliação dos sistemas de secagem.....	73
4.5. Parâmetros relativos à avaliação econômica das unidades de secagem.....	82
4.6. Custo de inadequação operacional do sistema.....	87
4.7. Comparação entre os resultados observados e simulados.....	99

4.7.1. Curvas de secagem e temperatura.....	99
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	102
6. SUGESTÕES.....	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
APÊNDICE	112

RESUMO

CARDOSO SOBRINHO, José, D.S., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2001.
Simulação e avaliação de sistemas de secagem de café. Orientador: Jadir Nogueira da Silva. Conselheiros: Adílio Flauzino de Lacerda Filho e Juarez de Sousa e Silva.

Com os objetivos de quantificar e racionalizar os parâmetros energéticos e econômicos de sistemas distintos de secagem, estudou-se a secagem de café em duas fazendas da empresa Heringer Ltda., localizadas nos municípios de Martins Soares-MG e Iúna-ES. Nos ensaios realizados na primeira fazenda, o ar de secagem foi aquecido até 60 °C, através de trocadores de calor por onde circulavam vapor de água e ar. Na unidade de secagem localizada no município de Martins Soares-MG, um dos secadores foi desconectado da linha de vapor, e no lugar do trocador de calor vapor de água/ar colocou-se um queimador de gás liquefeito de petróleo (GLP). Nos ensaios realizados na fazenda de Iúna-ES, o ar de secagem foi aquecido até 60 °C, numa fornalha a fogo indireto com trocador de calor tipo tubo-carcaça. O GLP foi utilizado somente na secagem a fogo direto. O café, com umidade inicial igual a 60 % bu, foi secado durante oito horas, em terreiro, até aproximadamente 47% bu e colocado, posteriormente, em secadores mecânicos para completar a secagem. Como testemunha fez-se, no terreiro,

ao sol, uma secagem para cada ensaio até que o café atingisse a umidade final igual a 13% bu, visando à comparação de qualidade do produto. Nos tratamentos em que o ar de secagem foi aquecido pelo trocador de calor e pela fornalha a fogo indireto, o café passou pela pré-secagem em secador horizontal, reduzindo a umidade de 47 para 30 % bu e, posteriormente, a secagem foi completada em secador vertical. Nos testes realizados com gás liquefeito de petróleo, o produto passou direto do terreiro para o secador vertical, onde ficou até atingir a umidade final desejada. Monitoraram-se os parâmetros relativos ao ar de secagem, ar ambiente, produto, combustíveis, e também, aqueles relativos aos investimentos e custo da secagem do produto, em cada fazenda. No secador rotativo horizontal, houve variação na temperatura do ar de secagem no sentido longitudinal do plenum. No secador de coluna, do início ao final da coluna de secagem, observou-se um gradiente de temperatura de 4 °C. A umidade do café variou na direção perpendicular ao fluxo de grãos, segundo sua posição, ao longo da coluna de secagem, em até 3 % bu, sendo mais secos os grãos localizados próximos ao plenum. A massa específica global variou segundo a umidade do produto. O café com maior umidade apresentou maior massa específica aparente. Não houve diferenciação entre a qualidade do produto secado no terreiro e nos secadores mecânicos. O secador rotativo apresentou menor consumo específico de energia, uma vez que o café com umidade mais elevada requer menos energia para evaporar a água, isto é, os secadores são mais eficientes energeticamente nas operações realizadas com produto mais úmido. O custo da secagem foi igual a R\$8,46; R\$13,66 e R\$17,78 a saca de 60 kg de café beneficiado para a operação em que o ar foi aquecido em fornalha a fogo indireto, vapor de água e GLP, respectivamente. A taxa interna de retorno dos sistemas de aquecimento a fogo indireto foi de 53% aa, e 38% aa para a secagem em que se utilizou o vapor. Considerando-se que a qualidade final do produto seco e beneficiado foi a mesma para todos os ensaios, concluiu-se que o sistema de secagem com aquecimento a fogo indireto (fornalha a fogo indireto) apresentou menor custo final. No entanto, considerando-se o fluxo de caixa incremental, o sistema em que o ar de secagem foi aquecido pelo vapor de água, apesar de ter apresentado maior custo de produção, foi o mais indicado.

ABSTRACT

CARDOSO SOBRINHO, José, D.S., Universidade Federal de Viçosa, April, 2001.
Simulation and evaluation of coffee drying systems. Adviser: Jadir Nogueira da Silva. Committee members: Adílzio Flauzino de Lacerda Filho and Juarez de Sousa e Silva.

In order to quantify and rationalize the energetic and economic parameters of distinct drying systems, drying of coffee was studied in two different farms of the Heringer Ltda. company, situated in the Martins Soares-MG and Iúna-ES counties. For the assays done in the farmer, the drying air was heated to 60 °C through heat exchangers where water vapor and air were circulated. On the drying unit, located in the Martins Soares-MG county, one of the dryers was disconnected from the vapor outlet and a liquid petroleum gas (LPG) burner was connected replacing the water vapor/air heat exchanger. In the assays done at the Iúna-ES farm, the drying air was heated to 60°C in an indirect fire furnace with a tube-carcass-type heat exchanger. The LPG was used only in the direct fire drying. Coffee with an initial moisture of 60% wb was dried during eight hours, in a yard, until approximately 47% wb and placed, afterwards, in mechanical dryers to complete the drying process. As control to compare the quality of the product, one drying for each assay was done, in a yard under sun light, until the final

coffee moisture was 13% wb. On the treatments in which the drying air was heated by the heat exchanger and by the indirect fire furnace, coffee was pre-dried in a horizontal dryer, thus reducing the moisture from 47 to 30% wb and, afterwards, the drying process was completed in a vertical drier. In the tests done using LPG, the product went directly from the yard to the vertical drier, where it remained until the desired moisture was reached. The parameters relative to the drying air, ambient air, product, fuel, and also those relative to the investments and product drying cost, in each farm, were monitored. On the horizontal rotating drier, variation in the drying air temperature in the longitudinal plenum direction was observed. In the column drier, a temperature gradient of 4 °C was observed from end to end in the column. Coffee moisture varied perpendicularly to the coffee bean flux up to 3% wb throughout the drying column, according to its position, being the driest beans located close to the plenum. The global specific mass varied according to product moisture. Coffee with a higher moisture showed higher apparent specific mass. No differentiation was observed between the quality of the product dried in the yard and in the mechanical dryers. The rotating dryer showed the least specific energy usage due to a lower requirement in energy to evaporate water from coffee with a higher moisture, i.e. the dryers are more energetically efficient in the processes done with a more humid product. The drying costs were R\$ 8.46, R\$ 13.66, and R\$ 17.78 for a 60 Kg sac of processed coffee for the operation where the air was heated using an indirect fire furnace, water vapor, and LPG, respectively. The internal reflux rate of the indirect fire heating systems were 53% aa and 38% aa for the vapor drying process. Considering that the end quality of dried and processed product was the same for all assays, we conclude that the drying system using indirect fire (indirect fire furnace) had a lower final cost. Nevertheless, considering the incremental cash flow the most indicated drying system was the one using water vapor to heat the drying air, even though it presented a higher production cost.

1. INTRODUÇÃO

A secagem é o processo mais econômico para manutenção da qualidade de grãos agrícolas durante a armazenagem em ambiente natural. Consiste na remoção de parte da água que os grãos apresentam depois do amadurecimento fisiológico. A umidade final desejada é aquela correspondente ao valor máximo com a qual o produto pode ser armazenado por períodos predeterminados, à temperatura ambiente, sem que ocorram deterioração e, ou redução de qualidade.

Segundo SILVA (1995), a importância da secagem de produtos agrícolas aumenta com o incremento da produção devido aos seguintes fatores: permite antecipar a colheita e armazenamento dos produtos, durante períodos mais longos, sem o risco de deterioração; mantém o poder germinativo das sementes durante longo período; impede o desenvolvimento de microrganismos e insetos; e minimiza a perda do produto no campo.

A proibição da aquisição de derivados de petróleo para secagem de produtos agrícolas em 1980 fez com que, no Brasil, se incentivasse o uso, sob a forma racional, de fontes alternativas de energia para aquecimento do ar de secagem, como lenha e resíduos agrícolas. Na secagem de grãos, é comum o emprego de temperaturas elevadas, ou seja, 10°C ou mais, acima da temperatura ambiente. Nesta condição o consumo de energia, pode ser, em certos casos, superior a 50% do total da energia consumida na produção e no processamento dos produtos vegetais que demandam secagem a alta temperatura (Oliveira Filho, citado por SILVA, 1998)

Em estudos sobre a lucratividade de investimentos, dois enfoques básicos podem ser utilizados, a saber: a análise do investimento e análise de custo. O primeiro fundamenta-se na teoria de investimentos e o segundo, na de custos de produção.

Na análise econômica do sistema de pré-processamento de café é importante empregar os dois procedimentos, com o objetivo de obter elementos para avaliação detalhada dos aspectos econômicos.

A análise econômica requer a elaboração do fluxo de caixa do investimento, isto é, a previsão de todas as saídas (capital investido e despesas de operação) e todas as entradas (receitas do investimento) por período de tempo ao longo de todo o horizonte do projeto (vida útil produtiva) (LEITE et al., 1996). A análise econômica de um investimento é especialmente útil em dois aspectos: a) orienta o investidor sobre a tomada de decisão; e b) auxilia na identificação de equipamentos ou processos, cujo desempenho técnico deva ser melhorado para se obter maior lucro. Investimentos em sistemas de secagem incorporam novas estruturas de custo. No entanto, espera-se que a receita gerada pela redução de perdas e melhoria da qualidade do produto final e a receita marginal superem o custo marginal, resultando em aumento da lucratividade da empresa. Quando se analisam sistemas de secagem, o consumo de combustível e de energia elétrica devem ser racionalizados, de modo a obter um custo mínimo por unidade de produto.

Vários parâmetros estão relacionados ao custo de secagem de grãos, dentre os quais pode-se citar: a energia para aquecer e movimentar o ar através da massa de grãos, a energia fornecida aos equipamentos para movimentação do produto, a mão-de-obra, a manutenção e depreciação de equipamentos e instalações, os juros e a quebra técnica.

O café é um produto nobre e contribui significativamente para o crescimento da economia brasileira, considerando seu elevado valor no mercado internacional, em comparação a outros produtos agrícolas. Ultimamente, o preço de cafés de qualidade tem variado entre 100 e 160 dólares americanos, a saca de 60,5 quilos. Na literatura, não há trabalhos consubstanciados relacionando análise energética e econômica de sistemas de secagem de café. Por ser um produto agrícola de valor relativamente elevado para a economia nacional, é evidente a necessidade de trabalhos que completem essa lacuna. Neste contexto o presente trabalho teve por objetivos:

- promover avaliações técnica e econômica de sistemas de secagem que utilizem diferentes fontes de energia para aquecimento do ar;
- propor alternativas técnicas que possam permitir redução no custo operacional do processo e
- desenvolver e validar o software desenvolvido para a simulação da secagem de café.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Processo de secagem

A secagem pode ser classificada em dois processos básicos: natural e artificial. O natural é caracterizado pela secagem do produto no campo, sem a interferência do homem, e o artificial o é realizado por meio de técnicas que, pela interferência do homem, possibilitam reduzir o tempo de operação, além de permitir a preservação da qualidade do produto. Como exemplo de secagem artificial, com ventilação natural, tem-se a secagem em terreiros e em secadores solares rotativos. Já a secagem com ventilação forçada é classificada, de acordo com o aquecimento ou não do ar de secagem em: secagem com ar natural não-aquecido; secagem com baixa temperatura, em que o ar é aquecido até 10 °C acima da temperatura ambiente; secagem com alta temperatura, em que o ar é aquecido, no mínimo, 10 °C acima da temperatura ambiente; sistemas combinados, em que se utilizam os dois métodos, ou seja, alta e baixa temperaturas; e ainda, secaeração e sistemas modificados, (SILVA, 1995).

2.2. Secagem de café

Segundo THOMAZIELLO et al. (1996), a secagem correta é fator importante na obtenção de um produto de boa qualidade.

ABRAHÃO et al. (1976), afirmam serem seis os fatores que afetam a qualidade da bebida do café: grau de maturação, variedade, tempo decorrido entre a

colheita e o início da secagem, influência do primeiro tratamento térmico, temperatura e velocidade de secagem.

Apesar dos ventos e da energia solar não apresentarem custos reais, o baixo rendimento dessa energia exige o uso de grandes áreas de terreno e muitas horas de trabalho, inviabilizando, na maioria das vezes a adoção desses sistemas.

Estudos sobre as causas da mudança de coloração de grãos de café devido a secagem, mostraram que a secagem ao sol causou degradação fotoquímica parcial nos pigmentos verdes dos grãos. Dessa forma, segundo RENA et al. (1986), a remoção da água dos grãos até a umidade entre 11 e 12%, pode ser realizada em secadores mecânicos.

Segundo MATIELLO (1991), além da redução no tempo de secagem, a utilização de secadores viabiliza a secagem em regiões úmidas e em períodos de chuva.

Para que a qualidade do café seja mantida, RENA et al. (1986) indicaram a necessidade do controle de temperatura da massa de grãos ao longo do processo de secagem, além do abastecimento dos secadores com lotes homogêneos de grãos.

Ao estudar a otimização energética em operações pós-colheita de café, BARROS et al. (1994) concluíram que a secagem mecânica, considerados os tipos de secadores horizontais e verticais, representa 80% do consumo total de energia elétrica, sendo diretamente influenciada pela umidade inicial do café, temperatura de secagem, uniformidade dos lotes e a forma de carregar o secador. Conclui, também que 90% dos cafés processados mecanicamente apresentaram excelente qualidade.

MENDES et al. (1995) declararam que o mau uso de secadores deprecia o aspecto e o tipo do café, acarretando redução de aproximadamente 15% do valor do produto, recomendando a instalação de dois termômetros nos secadores mecânicos, sendo um destinado à leitura da temperatura do ar de secagem junto ao ventilador e o outro junto à massa de grãos, na câmara de secagem.

CHALFOUN et al. (1997) fazem referência à necessidade de descanso do café, após a secagem, em tulas com boas condições de armazenagem, a fim de lhe conferir aspecto uniforme com as características sensoriais exigidas pelo mercado consumidor.

2.3. Secadores rotativos

Os secadores rotativos são constituídos de um cilindro horizontal ou ligeiramente inclinado, que gira em torno de um eixo longitudinal a uma frequência compreendida entre 1 e 15 rpm. O secador é carregado com produto úmido por um

transportador e descarregado por gravidade. O ar de secagem é insuflado numa câmara central e atravessa radialmente a massa do produto. As vantagens em utilizar esse equipamento para secagem de produtos agrícolas, em especial o café, são: seu funcionamento como máquina de pré-limpeza e secagem feita uniforme. Entretanto, apresenta desvantagens, como elevado consumo específico de energia, alto custo de investimento e alta incidência de danos mecânicos ao produto (SILVA et al, 1995).

2.4. Secadores intermitente, de coluna de fluxos cruzados

Nos secadores de fluxos cruzados, o ar de secagem atravessa a camada de grãos perpendicularmente ao sentido de seu deslocamento. PINTO FILHO (1994) desenvolveu e avaliou o protótipo de um secador de fluxos cruzados, com reversão no fluxo de ar e reaproveitamento do ar de resfriamento, para secagem de café em coco, com umidade inicial igual a 26,2 e final igual a 14,7 %bu. O consumo de energia foi igual a 17.171, 10.656 e 9.197 kJ por kg de água evaporada, nas temperaturas do ar de secagem iguais a 60, 70 e 90 °C, respectivamente.

VIEIRA (1994), estudando a secagem intermitente de café em secadores de fluxos cruzados e em secadores de camada fixa, observou menor tempo de secagem nos secadores de camada fixa experimental (protótipo), em relação aos secadores comerciais de fluxos cruzados.

2.5. Secagem em terreiros

A secagem em terreiro é um método de uso tradicional na cafeicultura. Apresenta problemas específicos, como a dependência de fatores climáticos, necessidade de mais mão-de-obra e de grandes áreas para construção de terreiros. A secagem em secadores mecânicos é mais recente e apresenta problemas, como o uso de secadores projetados para secar outros tipos de grãos, resultando em baixa eficiência.

No Brasil, predomina a secagem de café em terreiros, os quais podem ser construídos de cimento, tijolos ou de chão batido. Isso se deve, principalmente, à despreocupação com as características qualitativas do produto depois da secagem, bem como o baixo nível técnico e baixo poder aquisitivo dos produtores (PINTO FILHO, 1994).

Nos primeiros dias de secagem, o café é esparramado no terreiro, em camadas finas, sendo revolvido freqüentemente em sentidos ortogonais e enleirado ao entardecer,

no sentido das águas. À medida que vai secando, pode ser esparramado em camadas mais espessas, amontoando-se à noite e cobrindo-se com encerado.

A umidade do café recém-colhido varia com a maturação. Todavia, quanto mais homogêneas a umidade e a maturação, melhor será a secagem e melhores serão as possibilidades de obtenção de produto com qualidade.

GITIMU (1995), ao recomendar a secagem do café ao sol, evidenciou os seus efeitos positivos sobre a qualidade. Recomendou, também, alguns cuidados especiais em função dos estádios de secagem: a) de 44 a 33% bu., para evitar rachaduras no pergaminho, a secagem deve ocorrer de forma lenta, e por isso, deve-se cobrir o café durante as horas mais quentes do dia; b) entre 32 e 22% bu, a secagem influencia a cor do grão, por isso é recomendado que o café fique exposto à luz solar durante dois ou mais dias, para melhorar seu aspecto (cor) – a secagem mecânica não deve ser usada nesse estágio; e c) entre 21 e 12% bu, o café pode ser secado mais rapidamente, sem prejuízo da qualidade, inclusive com a utilização de secadores mecânicos.

2.6. Fornalhas

Alguns modelos de fornalhas acopladas aos secadores permitem insuflar diretamente sobre os produtos os gases resultantes da combustão, sendo possível elevar o rendimento energético do processo pela otimização entre o calor transferido para o ar de secagem e a energia fornecida pelo combustível durante a queima.

Apesar dos altos rendimentos apresentados por fornalhas a fogo direto, o uso de trocadores de calor acoplados às fornalhas, são indispensáveis para a secagem de alguns produtos, como café e cacau, e altamente desejável para os cereais, leguminosas e oleaginosas. Dessa forma, evita-se a contaminação dos produtos com os gases produzidos durante a combustão.

O empecilho para a ampla utilização desses trocadores de calor é a sua baixa eficiência que, segundo ROA (1979), é inferior a 30%, aumentando consideravelmente o custo final de produção. No entanto, qualquer que seja o tipo de fornalha, seu rendimento depende fundamentalmente da eficiência de queima do combustível.

2.7. Fornalhas com trocadores de calor

O trocador de calor é um dispositivo que possibilita a transmissão de calor do fluido quente para outro, denominado fluido frio. Existem vários tipos de trocadores de calor, sendo o mais simples aquele em que os fluidos quente e frio são misturados

diretamente num mesmo recipiente, atingindo uma temperatura final uniforme. No entanto, são mais comuns os trocadores de calor, chamados de recuperadores, nos quais um fluido é separado do outro por uma parede. Um desses trocadores é o de escoamento cruzado. Trocadores de calor são geralmente utilizados para aquecimento e resfriamento de gases, em que um gás é forçado pelo interior de tubos e o outro escoava entre estes. O gás que escoava sobre os tubos é considerado misturado, enquanto aquele que fluiu no seu interior é o não-misturado (INCROPERA, 1993).

Estudando a eficiência energética de uma fornalha com aquecimento indireto, utilizando água e óleo de soja como fluidos circulantes no trocador de calor e comparando a eficiência da fornalha para ambos os fluidos, OLIVEIRA (1996) verificou que: 1) com a água em circulação no trocador de calor, utilizando vazões de ar e de combustível iguais a $1,07 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $14,4 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$, respectivamente, obteve eficiência na ordem de 30%; 2) utilizando óleo de soja e vazões de $1,09 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ e $15,84 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ para o ar e combustível, respectivamente, a eficiência média foi de 49%.

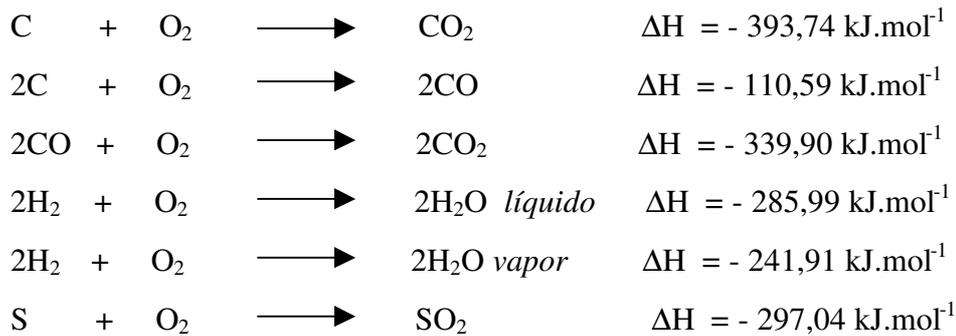
VALARELLI (1991) projetou uma fornalha para queimar palha de café com grelha inclinada e um trocador de calor de tubo aletado duplo, obtendo eficiência térmica igual a 54%. A fornalha operou com vazão de ar igual a $1,084 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, aquecendo o ar ambiente de $23 \text{ }^\circ\text{C}$ para $92 \text{ }^\circ\text{C}$. Neste experimento, consumiram-se $36 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ de combustível.

SAGLIETTI (1991) verificou, numa fornalha a lenha, eficiência energética média igual a 28%, com sistema de aquecimento indireto do ar de secagem. Concluiu que o melhor rendimento operacional foi obtido com a maior abertura nos tubos do trocador de calor e quanto maior o número de tubos abertos, maior o tempo de permanência do ar na fornalha, aumentando a troca de calor.

2.8. Combustão

A combustão é definida como um conjunto de reações químicas nas quais os elementos combustíveis se combinam com o oxigênio, liberando energia quando o combustível atinge a temperatura de ignição (SAGLIETTI, 1991).

Durante a combustão ocorrem reações químicas entre os constituintes do combustível com o oxigênio, especificamente o carbono, o hidrogênio e o enxofre, segundo as reações:



sendo as variações energéticas dadas pela quantidade de energia absorvida ou cedida pelo sistema, em qualquer transformação, sob pressão constante, chamada de entalpia (MAHAN, 1970).

Os valores da variação de entalpia das reações (ΔH) citadas referem-se à temperatura de 298 K (≅25°C). A segunda reação, entre o carbono e o oxigênio, é de combustão incompleta. Os valores negativos devem-se ao fato de serem reações exotérmicas, com liberação de calor ao ambiente.

Busca-se combustão otimizada ao liberar o máximo de calor do combustível com o mínimo de perdas devido à combustão incompleta, seja por falta ou excesso de ar, seja por excesso de umidade do combustível ou por quaisquer outras causas.

A combinação entre os componentes do combustível e o oxigênio do ar exige: 1) temperatura suficientemente alta para iniciar a queima do combustível; 2) mistura e turbulência do ar que proporcione o máximo de contato entre combustível e comburente; e 3) tempo suficiente para a ocorrência da reação de combustão.

A composição do ar, em base molar, é aproximadamente 21% de oxigênio, 78% de nitrogênio e 1% de argônio, outros gases e impurezas. Admite-se que o nitrogênio e o argônio são inertes e não participam das reações químicas de combustão, encontrando-se no final do processo à mesma temperatura que os demais produtos.

Na prática, o ar é considerado como composto de 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio, em volume. Nessas condições, para cada mol de oxigênio estão envolvidos 3,76 moles de nitrogênio, conhecido como “nitrogênio atmosférico”. O ar fornecido para combustão em quantidade suficiente para a queima completa de carbono, hidrogênio, enxofre, e quaisquer outros elementos do combustível que possam oxidar é chamado de “ar teórico”.

Essa quantidade de ar é baseada na análise elementar do combustível, e o resultado da combustão completa é a formação de dióxido de carbono, água, dióxido de enxofre e óxidos metálicos.

Como na prática a queima completa não é conseguida, sempre é fornecida quantidade maior de ar para efetuar a combustão. A quantidade real de ar fornecida, expressa em termos de percentagem do ar teórico, é conhecida como excesso de ar.

As fornalhas são projetadas para operar com excesso de ar, entre 35 e 50%, quando queimam resíduos agrícolas, madeira e bagaço de cana, dependendo da umidade do combustível (JUNGE, 1979).

Segundo VANN EE et al. (1981), níveis de excesso de ar muito elevados devem ser evitados, porque podem provocar o retardamento da reação de combustão, redução na eficiência global do sistema de combustão, aumento das correntes de velocidade do gás, as quais carregam para fora da fornalha partículas incandescentes ou não queimadas e exigência de um sistema de ventilação mais potente.

O processo de combustão é caracterizado pela relação ar-combustível (A/C) que é a razão entre o volume (ou moles) de ar teórico e o volume (ou moles) de combustível. Quando a quantidade de ar fornecida é menor que a teórica necessária, a combustão é dita incompleta – uma parte do carbono une-se ao oxigênio para formar o monóxido de carbono (CO) e não o dióxido de carbono (CO_2) (SHAFIZADEH, 1968).

Pode ocorrer combustão incompleta mesmo com quantidade adequada de ar, quando a queima é afetada pelos processos de turbulência e mistura do ar durante a operação.

2.9. Combustíveis

Combustíveis são substâncias ricas em carbono e hidrogênio que, em condições adequadas de temperaturas e pressão e na presença de oxigênio, participam de uma reação química conhecida como combustão, na qual há liberação de energia na forma de calor.

Um combustível é caracterizado por suas propriedades físico-químicas, expressas em percentagens de seus componentes.

As quantidades de cada componente no combustível determinam o seu poder calorífico, definido como “quantidade de energia desprendida na combustão completa de uma unidade de peso (ou volume) do combustível”, segundo ANDRADE et al. (1984).

2.9.1. Poder calorífico

Dentre as características dos combustíveis, a mais importante é o poder calorífico. O poder calorífico de um combustível é a quantidade de energia, em forma de calor, liberada na combustão completa de uma unidade em massa, ou em volume, de determinado combustível e não depende das condições em que o mesmo é queimado, considerando-se a sua combustão completa. Geralmente é dividido em superior e inferior (ANDRADE et al. 1985). O poder calorífico superior (PCS) pode ser estimado a partir da composição química do combustível medindo experimentalmente. O poder calorífico inferior é calculado a partir de equações empíricas.

2.9.2. Madeira como combustível

Um modo prático e mais fácil de produzir energia de biomassa é através da combustão da madeira ou de seus rejeitos. Embora fossem feitas diversas previsões sobre a queda do consumo de madeira para fins energéticos, atualmente ela ainda se mantém como a terceira fonte energética do país, representando 17% do total de energia consumida (BRASIL, 1999). A madeira-combustível possui a vantagem de ser renovável, ter baixo teor de cinzas e quantidade insignificante de enxofre. No entanto, é volumosa e tem baixo poder calorífico, em comparação com outros combustíveis

O poder calorífico superior da madeira está entre 19.000 a 20.000 kJ.kg⁻¹ quando seca. A composição química média da madeira, isenta de umidade e sem considerar as quantidades mínimas de outros elementos, é 50% de carbono, 44% de oxigênio e 6% de hidrogênio.

O poder calorífico inferior (PCI) da lenha pode ser calculado por meio da equação 1:

$$PCI = PCS - 2250 * U \quad (1)$$

em que

PCI : poder calorífico inferior do combustível, kJ.kg⁻¹;

PCS : poder calorífico superior do combustível, kJ.kg⁻¹;

2250 : calor de vaporização da água, kJ.kg⁻¹; e

U : umidade da lenha, dec. bs.

O componente que mais afeta a eficiência da madeira como combustível é a umidade que ela pode atingir. A umidade da lenha recém-cortada varia entre 40 e 50% bu. A redução da umidade é desejável para diminuir o custo de manejo e transporte. Nas regiões tropicais, a madeira é cortada três a quatro meses antes de ser queimada e nas regiões temperadas de 6 a 12 meses (MARTINS, 1981). Tais períodos são suficientes para reduzir a umidade até 25 ou 30% bu, aumentando, assim, o poder calorífico da madeira.

Segundo ANDRADE et al. (1984), pode-se enumerar as seguintes vantagens da lenha como combustível:

a) nos países subdesenvolvidos e em desenvolvimento, ainda é o combustível mais barato, tanto por unidade de massa quanto por unidade de calor; b) o seu manuseio não requerer mão-de-obra qualificada; gera empregos e fixação do homem no campo; c) armazenam-se grandes quantidades em espaço aberto; e d) possui baixo teor de cinza e enxofre.

Como desvantagens pode-se citar: a) exigência de mão-de-obra intensiva, elevando-se o custo de produção nos países onde os salários são altos; b) apresenta poder calorífico inferior ao dos demais combustíveis; e c) é de difícil manipulação se comparada aos combustíveis fósseis, líquidos e gasosos.

2.9.3. Gás liquefeito de petróleo como combustível (GLP)

O GLP é largamente conhecido como "gás de cozinha", devido à sua principal aplicação para cocção de alimentos, estimada em mais de 90% da demanda brasileira. Outras aplicações comumente encontradas são como combustível industrial em fábricas, hospitais e restaurantes, de empilhadeiras utilizadas em armazéns de cereais e indústrias e, mais recentemente, em queimadores acoplados a secadores rurais.

À temperatura ambiente e sob pressão entre 3 e 15 kPa, o GLP se liquefaz. Por isso, a forma de comercialização mais comum é a de engarrafamento em botijões de 13 kg. Estima-se que existam mais de 70 milhões de vasilhames com estas características em circulação pelo país. Cilindros com capacidade para acondicionar 45 kg de gás são largamente comercializados. Recipientes com capacidades diferentes também podem ser encontrados, em menor quantidade. A comercialização de GLP a granel pode ser feita, usando-se caminhões e, ou, vagões-tanque.

O governo brasileiro tem feito uma política social de apoio à população, subsidiando o GLP (em botijões de 13 kg) para o uso doméstico através de uma parcela

embutida no preço de outros combustíveis, principalmente no da gasolina, proporcionando sua ampla utilização. Essa política proporciona uma diferença igual a 40% na demanda, em relação à capacidade de produção, obrigando a importação do produto para viabilizar o suprimento complementar. Daí a importância de racionalizar o seu uso.

2.10. Qualidade do café

A qualidade do café continua sendo o fator determinante do seu preço e imprescindível para aceitação do produto nos mercados interno e externo. Verifica-se uma tendência, cada vez maior, de redução de mercados para cafés de baixa qualidade. Assim, o produtor brasileiro que visar lucro com a cafeicultura deverá se especializar na produção de café de qualidade. No Brasil a análise de bebida do café é feita pelo tipo e bebida do produto seco e beneficiado.

2.11. Avaliação dos sistemas e do custo operacional de secagem

2.11.1. Avaliação energética dos sistemas de secagem

Quanto mais tecnificada for a agricultura, a subsistência torna-se passado e a agricultura empresarial toma força, dando novos rumos a esse segmento econômico. A globalização da economia e a atual política de preços imposta aos produtos agrícolas levam os produtores a análises mais detalhadas deste sistema de produção. Em um cenário de alto custo de energia e baixo preço 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 (LACERDA FILHO, 1998).

Hall, citado por LACERDA FILHO (1998), definiu três expressões para a eficiência de energia nos processos de secagem, ou seja, 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 pelo combustível. 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. A eficiência de secagem está relacionada à quantidade de energia em quilojoules por quilogramas de água evaporados durante o processo de secagem.

BAKKER-ARKEMA et al. (1978) propuseram uma metodologia para avaliação do desempenho de secadores com base em número reduzido de testes de campo, em determinadas condições padronizadas, acompanhados da simulação do processo de secagem, com o objetivo de reduzir o tempo e o custo com os testes experimentais. A avaliação da qualidade dos grãos secos complementa os testes de campo. SILVA et al. (1992), entretanto, verificaram que as condições padronizadas nessa metodologia não representa a realidade brasileira.

OSÓRIO (1982) e SILVA (1991) adaptaram a metodologia proposta por BAKKER-ARKEMA et al. (1978) para avaliação do desempenho de secadores de café. Tiveram dificuldades em fixar determinados parâmetros para padronização dos testes, principalmente aqueles relacionados ao produto, como umidade inicial e homogeneização de maturação.

Na secagem de café, SILVA (1991) trabalhou com secador de fluxos contracorrentes e utilizou temperaturas do ar de secagem iguais a 60, 80 e 100 °C, obtendo consumos específicos de energia iguais a 8.300, 7.547 e 6.442 kJ por kg de água evaporada, respectivamente.

OSÓRIO (1982), trabalhando com secador de fluxo concorrente utilizando temperaturas do ar de secagem iguais a 80, 100 e 120 °C, em café, obteve valores no consumo específico médio iguais a 5.700, 4.870 e 4.760 kJ por kg de água evaporada, respectivamente.

PINTO (1993), trabalhando com secador intermitente de fluxos contracorrente/concorrente a temperaturas de 80, 100 e 120 °C, em café, obteve valores no consumo específico médio de energia iguais a 6.068, 5.657 e 5.685 kJ por kg de água evaporada, respectivamente.

LACERDA FILHO (1998), avaliando uma unidade de beneficiamento de sementes de milho composta por sistemas de secagem em leito fixo, trabalhando com temperatura do ar de secagem igual a 40 °C (± 5 °C) e utilizando o sabugo de milho como combustível, obteve eficiências energéticas iguais a 12.967,76; 30.220,2; e 25.213,7 kJ por quilograma de água evaporada para três tratamentos distintos. Fez, neste trabalho, análises de consumo energético e de custo de produção, desconsiderando a análise de investimentos.

REZENDE (1997) desenvolveu um modelo computacional aplicado a dimensionamento, simulação e análise econômica de unidades pré-processadoras de grãos. Fez análise de custos e investimentos, não evidenciando o consumo energético.

2.11.2. Avaliação dos parâmetros associados aos sistemas de secagem

Em estudos sobre a lucratividade de investimentos, dois enfoques básicos podem ser utilizados, a saber: a análise do investimento e a do custo. O primeiro fundamenta-se na teoria de investimentos e, o segundo, na do custo de produção. Na análise econômica do sistema de pré-processamento de café, é importante empregar os dois procedimentos, com o objetivo de obter elementos para avaliação detalhada dos aspectos econômicos.

A avaliação econômica de projetos baseia-se em critérios de rentabilidade. Assim, o projeto é economicamente viável quando gera saldos capazes de remunerar o capital investido.

2.11.2.1. Análise de investimentos

Segundo LEITE et al. (1996), a análise de investimento requer a elaboração do fluxo de caixa do investimento, isto é, a previsão de todas as entradas (capital investido e despesas de operação) e todas as saídas (receitas do investimento) por período de tempo ao longo de todo o horizonte do projeto (vida útil produtiva).

2.11.2.2. Avaliação dos custos operacionais de secagem

Mesmo sendo prática antiga dos pesquisadores, a estimativa do custo de secagem não constitui, no Brasil, rotina das unidades de beneficiamento ou secagem de grãos ou sementes.

YOUNG e DICKENS (1975) afirmaram que poucos esforços foram despendidos para otimizar os processos de secagem, com vistas à conservação de energia ou de capital. Em estudo de avaliação de custo de secagem, em lotes e em fluxos cruzados, estabeleceram vários parâmetros a serem considerados nesta análise e verificaram que o tempo de secagem é um deles, podendo ser estimado por modelos matemáticos já desenvolvidos.

Os parâmetros de custo que envolvem o processo de secagem são: energia para movimentar e aquecer o ar de secagem, trabalho humano, equipamentos, manutenção, taxas, seguros e juros. Na análise consideraram, separadamente, os custos energéticos de aquecimento e de movimentação do ar. Todos os outros custos foram assumidos e considerados fixos, a saber:

a) O custo de combustível é diretamente proporcional à elevação da temperatura do ar acima da temperatura ambiente, fluxo de ar, tempo de secagem e preço do combustível. A estimativa dos custos de combustível é dada por:

$$C_{\text{comb}} = \frac{(T - T_a).T_b.M_a.(C_{pa} + (S.C_{pv})).P_1}{PCI.e_1.A.X} \quad (2)$$

em que

C_{comb} : custo do combustível para secagem, R\$.kg⁻¹ ou R\$.m⁻³;

T : temperatura do ar de secagem, ° C;

T_a : temperatura do ar ambiente, ° C;

T_b : tempo de secagem, h;

M_a : vazão mássica de ar, kg.h⁻¹;

C_{pa} : calor específico do ar seco, kJ.kg⁻¹.°C⁻¹;

S : razão de umidade do ar, kg vapor.kg⁻¹ de ar seco;

C_{pv} : calor específico do vapor de água, kJ.kg⁻¹;

P₁ : preço do combustível, R\$.unid⁻¹;

PCI : poder calorífico inferior do combustível, kJ.kg⁻¹;

e₁ : eficiência da combustão;

A : área de secagem, m²; e

X : espessura da camada de produto, m.

b) O custo de operação do ventilador pode ser estimado pela equação 3.

$$C_{\text{el}} = \frac{Pot.T_b.P_2}{e_2} \quad (3)$$

em que

C_{el} : custo de operação do ventilador, R\$.m⁻³;

Pot : potência despendida pelo ventilador, kW.m⁻³ de produto;

P₂ : preço da eletricidade, R\$.kWh⁻¹;

T_b : tempo de secagem, h; e

e₂ : eficiência do sistema de ventilação, decimal.

c) Os outros custos considerados referem-se à depreciação dos equipamentos, manutenção, juros, seguros, impostos e mão-de-obra. Os demais custos são considerados fixos e, portanto, não são afetados pela quantidade de produto seco. O custo fixo pode ser estimado pela equação 4:

$$Cf = \frac{P3 + \left[P4 \cdot \frac{F}{Tsm} \right]}{\min \left[\left(\frac{Vs}{Ts} \right) ; \frac{v \max}{Tsm} \right]} \quad (4)$$

em que

Cf : custo fixo, R\$.m⁻³;

$P3$: preço da mão-de-obra, R\$.h⁻¹;

$P4$: preço inicial do sistema, R\$;

F : custo de manutenção, depreciação, juros, fração decimal do custo inicial;

Tsm : tempo de secagem máximo, h;

Vs : volume do secador, m³;

Ts : tempo requerido para a secagem, h;

$vmax$: máximo volume da produção anual, m³.

d) O custo total de secagem é estimado pela soma de todos os custos (equação 5).

$$CT = Ccomb + Cel + Cf \quad (5)$$

O custo total médio representa a razão entre o custo total e a quantidade de produto.

$$CTMe = \frac{CT}{q} \quad (6)$$

em que

$CTMe$: custo total médio, R\$.sc⁻¹; e

q : quantidade de café seco e beneficiado por ano em cada unidade, sacas de 60 kg.

Chan et al. citados por SILVA et al. (1992) desenvolveram um modelo para estimar o custo de secagem com base no custo mínimo e nas eficiências térmicas de cinco sistemas. Nessa metodologia, o custo anual de secagem foi estimado por:

$$Ca = \frac{[(C1 + Ce + Cmo + Ci).Vt]}{Cs} + Cf + C4 \quad (7)$$

em que

C_a : custo anual de secagem, R\$.ano⁻¹;
 C_1 : custo de combustível, R\$.h⁻¹;
 C_e : custo de eletricidade para secagem, R\$.h⁻¹;
 C_{mo} : custo de mão-de-obra, R\$.h⁻¹;
 C_i : custo de inadequação do sistema, R\$.h⁻¹;
 V_t : quantidade total a ser secada, m³.ano⁻¹;
 C_s : capacidade de secagem m³.h⁻¹;
 C_f : custo fixo, R\$.ano⁻¹; e
 C_4 : custo de quebra técnica, R\$.ano⁻¹.

Os custos de combustível e de eletricidade podem ser estimados pelas equações 8 e 9.

$$C_1 = \frac{Ea.P1}{e1.PCI} \quad (8)$$

$$C_e = \frac{Pot.P2}{e2} \quad (9)$$

em que

E_a : energia necessária para aquecer o ar, kJ.h⁻¹; e
 Pot : Potência do equipamento, kW.

O custo de mão-de-obra é função do tempo de secagem, e considera-se sua utilização parcial. A equação 10 pode ajustar este custo.

$$C_{mo} = n.P3 \quad (10)$$

em que

n : constante de ajuste: - ar aquecido $n=0,2$
 - ar natural $n=0,0$.

O custo de inadequação é devido à impossibilidade de ajustes para que as operações de campo sejam sincronizadas, em um período de tempo adequado, para atendimento da capacidade de colheita. Pode ser estimado pela equação 11.

$$C_i = \frac{F1.P5.Vt}{Fp.Nh} \quad (11)$$

em que

C_i = custo de inadequação, R\$.h⁻¹;

F1 : fator de inadequação quando se estuda o milho $F1=0,003.\text{dia}^{-1}$;

P5 : preço do produto, $\text{R}\$.m^{-3}$;

Fp : fator de programação: antecipada = $0,2.\text{ano}^{-1}$

atrasada = $2,0.\text{ano}^{-1}$

balanceada = $4,0.\text{ano}^{-1}$;

Vt : quantidade total a ser secada, $m^3.\text{ano}^{-1}$ e

Nh : tempo de secagem por dia, $\text{h}.\text{dia}^{-1}$.

O custo fixo, que inclui a depreciação, os juros e impostos, pode ser estimado como porcentagem do custo inicial, pela equação 12.

$$Cf = F.P4 \quad (12)$$

em que

Cf : custo fixo, $\text{R}\$.ano^{-1}$;

F : fator de depreciação, manutenção, juros e fração decimal do custo inicial; e

P4 : preço inicial do sistema, $\text{R}\$$.

Ao custo de quebra técnica são incorporadas as perdas de matéria seca ocorrida durante a secagem, a secagem em excesso ou incompleta e a perda na qualidade. Contudo, em razão da dificuldade em estimar esses valores, consideraram-se, geralmente, as perdas de matéria seca pela equação 13.

$$C4=Fq.P5.Vt \quad (13)$$

em que

C4 : custo de quebra técnica, $\text{R}\$.ano^{-1}$;

Fq : fator de quebra técnica ($Fq = 0,005$);

P5 : preço do produto, $\text{R}\$.m^{-3}$; e

Vt : quantidade total a ser secada, $m^3.\text{ano}^{-1}$.

2.12. Simulação de secagem

A utilização de modelos matemáticos para a simulação de secagem tem auxiliado muito no projeto, desenvolvimento, avaliação e otimização de secadores (QUEIROZ et al., 1992).

THOMPSON et al (1968) propuseram um modelo para a simulação de secagem de milho em secadores contínuos. Esse modelo, considerado semi-empírico,

simula o processo de secagem por meio de um conjunto de equações, baseadas nas leis de transferência de energia e massa e de uma equação empírica de secagem.

No modelo de Thompson, o processo de secagem é dividido em vários subprocessos. Assim, o leito de grãos passa a ser composto de várias camadas de espessura reduzida, colocadas umas sobre as outras. As variações nas condições do ar e do produto, e em cada camada, são calculadas com base em incrementos de tempo (QUEIROZ et al., 1992). Essa troca de energia e massa entre o produto e o ar está esquematizada na Figura 1.

Na simulação de secagem em secadores de fluxos cruzados, pelo modelo de THOMPSON et al. (1968), o ponto fundamental é a escolha do incremento de tempo, que deve ser igual à espessura da camada, dividida pela velocidade de deslocamento do grão no secador (QUEIROZ et al., 1992).

Trabalhos de validação, realizados por QUEIROZ et al. (1981), SINÍCIO (1983) e SABIONI (1986) com milho; FIOREZE (1982), com mandioca e SILVA (1991) com café, demonstraram que o modelo de THOMPSON et al., (1968) simula o processo de secagem com boa precisão.

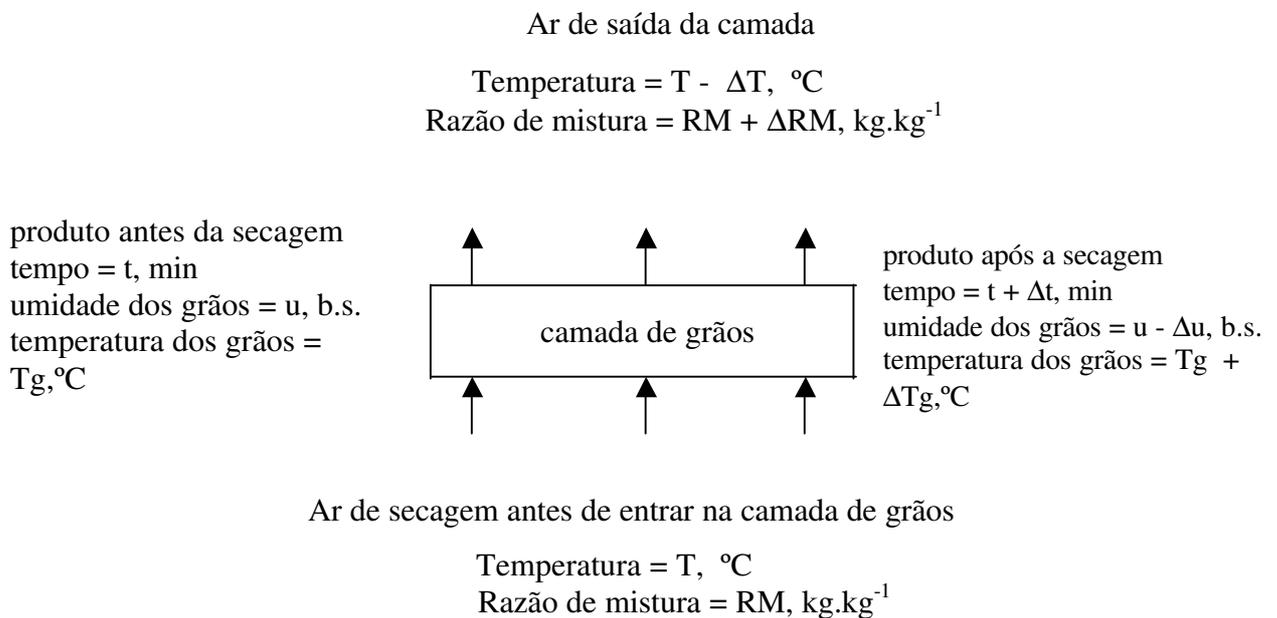


Figura 1 – Esquema das variações que ocorrem durante a secagem de uma camada fina de grãos de café, durante o intervalo de tempo, Δt , segundo o modelo de THOMPSON et al. (1968).

2.13. Uso de vapor de água no aquecimento de ar de secagem

Gerador de vapor é um trocador de calor que produz vapor de água sob pressões superiores à atmosférica a partir da energia térmica de um combustível e de um elemento comburente, estando constituído por diversos equipamentos associados e perfeitamente integrados para permitir a obtenção do maior rendimento térmico possível. Na produção de energia mediante aplicação do calor que despreendem os combustíveis ao serem queimados nos geradores de vapor desenvolve-se o seguinte processo evolutivo: a água recebe calor através da superfície de aquecimento; com aumento da temperatura e atingida a temperatura de ebulição, muda de estado transformando-se em vapor sob determinada pressão, superior à atmosfera, para uso externo. A energia calorífica do combustível converte-se em energia potencial no vapor, que por sua vez transforma-se em mecânica por meio de máquinas térmicas adequadas para a obtenção de energia elétrica, hidráulica ou pneumática, (PERA, 1990).

Segundo NOGUEIRA (1985) e NOGUEIRA (1986), o uso do vapor é uma alternativa viável para utilização de biomassa como fonte de calor, visando a preservação da qualidade do produto final. A operação consiste na instalação de um sistema constituído por uma fornalha equipada com caldeira, e associada a um ou mais trocadores de calor. Nesse processo o vapor fornecido pela caldeira passa pelo trocador de calor que é aquecido. O ventilador do secador, por sua vez, força a passagem do ar ambiente pelo trocador de calor injetando-o na massa de grãos de forma a propiciar a sua secagem. Esse sistema tem como vantagens a possibilidade de instalação de múltiplos secadores, economia de combustível e mão-de-obra, menor risco de incêndio, redução dos níveis de poluição do ambiente e uniformidade da temperatura do ar de secagem. Como principal desvantagem ressalta-se o elevado custo do investimento inicial para implantação e manutenção do sistema.

2.14. Análise econômica do sistema

Para análise econômica foram considerados quatro projetos. Os investimentos de cada unidade de secagem, foram estudados de duas formas. Na primeira, considerando as condições atuais de operação da unidade, na segunda, que todo o sistema de aquecimento seria substituído pelo gás liquefeito de petróleo, segundo os dados obtidos no tratamento 3.

2.14.1. Taxa interna de retorno (TIR)

A TIR é a máxima taxa de juros que o investimento poderá suportar sem se tornar inviável, ou a taxa de juros que iguala o valor presente líquido a zero. Por esse critério, se a TIR estimada para um projeto for superior à taxa de juros vigente no mercado, o projeto é aceito pois resultaria em maior rentabilidade, comparativamente ao mercado financeiro ou ao custo de oportunidade do capital. A TIR é estimada, resolvendo-se a seguinte equação 14

$$-I + \frac{S_1}{(1+\rho)} + \frac{S_2}{(1+\rho)^2} + \dots + \frac{S_n}{(1+\rho)^n} = 0 \quad (14)$$

em que

I : Investimento inicial;

S_n : Receita líquida no ano n;

1,2,..n : horizonte de planejamento, anos; e

ρ : TIR.

2.14.2. Tempo de retorno do capital (TRC)

Este tempo representa o período de tempo necessário para que os saldos anuais gerados pelo sistema de secagem pague completamente o capital total investido na sua implantação. Embora não sendo um índice de rentabilidade econômica propriamente dito, esta medida fornece informação importante para o empresário sobre a liquidez do investimento, isto é, o período de tempo em que o capital imobilizado será recuperado.

Quando o fluxo de caixa anual S é constante e ao longo do horizonte o TRC é determinado por:

$$TRC = \frac{I}{S} \quad (15)$$

em que

I : investimento inicial, R\$;

S : fluxo de caixa anual (saldos financeiros), R\$.ano⁻¹; e

TRC : tempo de retorno do capital, em anos.

2.14.3. Valor presente líquido (VPL)

Este valor representa o somatório do fluxo de caixa descontado entre a receita e a despesa, ao longo do horizonte do investimento. O fator de desconto é a taxa real de

juros, que representa os custos de oportunidade do capital. De acordo com esse critério, um investimento será considerado viável quando seu valor líquido presente for positivo. Nesse caso, pode-se garantir que os recursos financeiros aplicados no investimento proporcionarão renda líquida superior àquela supostamente obtida, caso o mesmo capital fosse empregado à taxa de juros considerada nos cálculos, isto é, a rentabilidade alternativa do capital. Assim, será utilizada a rentabilidade real da caderneta de poupança, uma vez que essa aplicação se encontra disponível para qualquer investidor, (equação 16).

$$VPL = -I + \frac{S_1}{(1+R)} + \frac{S_2}{(1+R)^2} + \dots + \frac{S_n}{(1+R)^n} \quad (16)$$

em que

S_n : Receita líquida no ano t , em R\$;

VPL : R\$; e

R : taxa de juros do mercado

2.14.4. Relação receita custo (RRC)

Esta relação é o somatório do fluxo de caixa do projeto dividido pelo montante investido. Quanto maior for a RRC, melhor será considerado o projeto, pois essa relação indica o retorno para cada unidade monetária investida no projeto, (equação 17)

$$RRC = \frac{\sum_{T=1}^n S_t (1+R)^{-n}}{I} \quad (17)$$

em que

$\sum S_t$: somatório das receitas líquidas até o final do horizonte de planejamento (n anos), R\$;

RRC : adimensional.

Essas medidas de rentabilidade econômica do investimento no sistema de secagem permitiram inferir sobre sua viabilidade e, por conseguinte, sobre a vantagem econômica entre os sistemas estudados.

2.14.5. Fluxo de caixa incremental

O procedimento formal da análise incremental entre os projetos, visando o uso do fluxo de caixa incremental para o presente trabalho, foi feito agrupando-se os quatro projetos A1, A2, A3 e A4, conforme item 2.14. Com a ressalva de que o projeto A_j tem valor de investimentos maior que o projeto A_{j-1} , o procedimento de análise incremental aplicado com os métodos do VPL e da TIR, foi o seguinte:

a) Agruparam-se os projetos em ordem crescente do valor (absoluto) do investimento.

b) Começou-se a análise aceitando o projeto com menor valor de investimento, denominado “projeto desafiado”, isto é, o projeto A1. A seguir confrontou-se esse projeto com o projeto seguinte, *projeto desafiante* A2, cujo valor de investimento foi maior que o do projeto desafiado.

c) Preparou-se o *fluxo de caixa incremental*, formado pela diferença entre fluxos de caixa de A2 e de A1. Calculou-se o incremento do valor do investimento e os incrementos dos retornos anuais do projeto desafiante, obtendo o fluxo de caixa incremental, denominado $\Delta(A2-A1)$.

d) Calculou-se o VPL e a TIR do fluxo incremental $\Delta(A2-A1)$ e aplicou-se os critérios conhecidos:

- Se $VPL > 0$, ou $TIR > k$, em que k é a taxa juros de mercado, então o projeto A_2 é melhor que o projeto A1; nesse caso abandona-se o projeto A1 e fica-se com o projeto desafiante A_2 .
- Caso contrário, se $VPL < 0$, ou $TIR < k$, elimina-se o projeto desafiante A_2 e continua-se mantendo o projeto desafiado A_1 .

e) A seguir, desafia-se o projeto escolhido no item d com o novo projeto desafiante A_3 , isto é:

- Se o projeto A2 for melhor que o projeto A1, então desafia-se o projeto A2 com o projeto A3; e
- Se o projeto A1 for melhor que o projeto A2, então se desafia o projeto A1 com o projeto A3.

Repetem-se os itens d e e desse procedimento, no fluxo de caixa incremental correspondente, isto é, $\Delta(A3-A2)$ ou $\Delta(A3-A1)$.

f) Repetiram-se os itens c, d e e deste procedimento até esgotar os 4 projetos de investimento.

g) Por último, recomendou-se o projeto que exigiu o maior investimento para o qual cada incremento de capital foi justificado.

2.15. Análise de custo

O conhecimento sobre o comportamento do custo foi fundamental para a escolha do sistema de melhor eficiência econômica, complementando-se as análises feitas com base na teoria de investimentos, conforme os indicadores apropriados.

Para análise do custo do sistema de secagem, foram considerados os seguintes parâmetros:

2.15.1. Custo fixo total (CFT)

Este custo compreende os itens que independem da quantidade de grãos secados ou independem da intensidade de uso do sistema, como depreciação, seguros, impostos, juros sobre o capital empatado e mão-de-obra permanente, determinado pela equação 4.

2.15.2. Custo fixo médio (CFMe)

Este custo representa exatamente a razão entre o custo fixo e a quantidade de produto.

$$CFMe = \frac{Cf}{q} \quad (18)$$

em que

Cf : Custo fixo total;

CFMe : custo fixo médio, R\$.sc⁻¹; e

q : quantidade de sacos de café seco e beneficiado por ano em cada unidade.

2.15.3. Custo variável total (CVT)

Este custo compreende os itens que variam diretamente com a intensidade de uso do sistema ou com a quantidade de grãos secos. Inclui gastos com mão-de-obra, manutenção dos equipamentos, motores, consumo de energia, limpeza e movimentação do produto.

$$CVT = C_{el} + C_{comb} + C_3 \quad (19)$$

em que

Cel : custo da eletricidade, equação 3, R\$.m⁻³;

Ccomb : custo de combustível, equação, R\$.m⁻³;

C₃ : custo de manutenção e conservação (8% do investimento), R\$.m⁻³; e

CVT : custo variável total em R\$.m⁻³ de café seco.

2.15.4. Custo variável médio (CVMe)

Este custo representa exatamente a razão do custo variável total pela quantidade de produto (q).

$$CVMe = \frac{CVT}{q} \quad (20)$$

em que

CVMe : custo variável médio em R\$.t⁻¹ ou R\$.kWh⁻¹.

2.15.5. Custo de combustível (Ccomb)

Este custo representa o combustível utilizado no experimento, determinado pela equação 2.

2.15.6. Custo de manutenção, conservação (C3)

O valor de C3 foi considerado como sendo 3% para manutenção e de conservação 5% do valor inicial do investimento. Este valor está de acordo com os praticados na economia para avaliação de projetos de investimentos.

2.15.7. Custo de oportunidade (CO)

Este custo representa quanto o empresário está deixando de receber ao investir seu capital no sistema de secagem do café comparando-o a outra opção de investimento, como, no mercado financeiro, rendendo-lhe juros. Essa aplicação corresponde ao valor das benfeitorias, máquinas e equipamentos, que compõem o capital fixo do sistema de secagem, que permanece completamente empatado durante sua vida útil, quando poderia estar gerando dividendos em outras alternativas.

Também conhecido como juros sobre o capital investido, é um custo implícito que representa a renúncia de rentabilidade do investidor quando ele decide aplicar seus recursos financeiros em um sistema em vez de empregá-lo no mercado financeiro ou

outra alternativa. O valor médio entre o valor inicial e final do capital é considerado para determinar o seu custo de oportunidade, fornecendo uma aproximação do montante total que ficou empatado durante a vida útil do sistema. O valor médio do capital investido multiplicado por uma taxa de juros alternativa representa a estimativa de quanto a empresa deixou de receber, em média, por ano, ao empregar seus recursos em dado sistema.

$$CO = \frac{V_{ic} + V_{fc}}{2} \cdot R \quad (21)$$

em que

CO : custo de oportunidade em R\$.ano⁻¹

V_{ic} : valor inicial do capital, R\$;

V_{fc} : valor final do capital, R\$; e

R : taxa de juros de mercado, percentagem

2.15.8. Depreciação anual (D_a)

Esta depreciação é um custo não-monetário que reflete a perda do valor do capital com a idade, o uso e a obsolescência. É também um procedimento contábil que pode ser interpretado como fundos necessários para amortização do capital investido. Reflete a perda do valor do capital inicialmente investido na aquisição do bem. Utilizando-se o método linear, a depreciação é estimada pela equação 22:

$$D_a = \frac{V_{ic} - V_{fc}}{T} \quad (22)$$

em que

D_a : R\$.ano⁻¹; e

T : tempo de vida útil dos equipamentos (anos).

2.15.9. Custo operacional total (CopT)

Este custo é a medida do custo que engloba o custo variável e a depreciação do capital investido no sistema de secagem. Representa, pois, capital de giro (insumos) e capital fixo (depreciação). Inclui todos os custos variáveis e parte dos custos fixos, a depreciação.

$$CopT = CVT + D_a \quad (23)$$

em que

CopT : custo operacional total R\$.ano⁻¹.

2.15.10. Custo de inadequação

O custo de inadequação é devido à impossibilidade de ajustes para que as operações de campo sejam sincronizadas a um período de tempo adequado, para atendimento da capacidade de colheita, podendo ser estimado pela equação 11.

2.15.11. Custo da energia elétrica

O custo da energia elétrica foi calculado segundo a equação 3.

2.15.12. Custo total de secagem (Ctotal)

Este custo é a medida mais ampla para avaliar o custo de um sistema de secagem, pois engloba custo variável, a depreciação do capital e o custo de oportunidade do capital empatado no sistema. Conceitualmente, o custo total de secagem refere-se à remuneração de todos os fatores empregados no sistema estudado, o que é o resultado do somatório do CFT e do CVT. Neste trabalho determinou-se o custo total da secagem de 3 formas: equações 5, 7 e 24, para expressar o resultado do custo total.

$$C_{total} = CFT + CVT \quad (24)$$

em que

Ctotal : custo total da secagem, R\$.sc⁻¹.

2.15.13. Custo total médio (CTMe)

Este custo representa exatamente a razão do custo total pela quantidade de produto (q) .

$$CTMe = \frac{C_{Total}}{q} \quad (25)$$

em que

CTMe : custo total médio, R\$.sc⁻¹.

Para que o sistema de secagem seja economicamente viável, o ganho adicional de renda deve ser superior ao incremento do custo total, ou seja, a receita marginal deve ser superior ou igual ao custo marginal.

Essas análises, juntas, fornecerão informações em diferentes aspectos da rentabilidade da implantação dos sistemas de secagem de café.

2.16. Análise de rentabilidade sob a ótica da renda e do custo

Além da análise de rentabilidade considerada sob a ótica da teoria de investimentos (análise de investimento), pode-se tomar, ainda, uma análise de rentabilidade sob a ótica da renda e do custo. Os seguintes parâmetros foram, então, considerados:

2.16.1. Renda bruta total (RBT)

Esta representa os ganhos monetários gerados por um sistema.

$$RBT = 13,2 \times N \quad (26)$$

em que

13,2 : preço de mercado, em reais por hora, para secar um saco de 60 quilos de café;

N : número de sacos de café seco e beneficiado por ano; e

RBT : renda bruta total, R\$.ano⁻¹.

A quantidade estimada de café seco e beneficiado durante o ano de 1999 nas unidade de Martins Soares, MG, e Laranja da Terra, ES, foi de 35.000 e 25.000 sacas de café com 13% bu de umidade, respectivamente.

2.16.2. Margem bruta total (MBT)

Esta margem é a diferença entre a renda bruta (RBT) e os respectivos custos variáveis (CVT).

$$MBT = RBT - CVT \quad (27)$$

em que

$$MBT : R$.ano^{-1}$$

Utilizando o conceito de margem bruta, podem-se tirar as seguintes conclusões:

- Se $MBT > 0$; o sistema está remunerando os fatores variáveis empregados e gerando um saldo para remunerar seus custos fixos. Todavia, essa informação não é suficiente para se inferir sobre a lucratividade do sistema.

- Se $MBT < 0$; os ganhos gerados não cobrem os custos com insumos variáveis, indicando que a atividade é antieconômica. No curto prazo, o abandono da exploração minimiza os prejuízos, sujeitando-se apenas aos custos fixos que continuarão a existir.

2.16.3. Renda líquida operacional (RLOp)

Esta é definida como a diferença entre a renda bruta total e os custos operacionais (COpT). A renda líquida operacional positiva indica que o sistema gera renda suficiente para repor todo o capital consumido (insumos e depreciação) e um saldo para remunerar o capital investido. Nesse caso, pode-se garantir que o sistema remunera o capital positivamente. No entanto, se a RLOp for negativa, tem-se uma situação em que as rendas geradas pelo sistema não são suficientemente elevadas para repor o capital empregado, indicando a inviabilidade de longo prazo do sistema.

$$RLOp = RBT - COpT \quad (28)$$

em que

RLOp : renda líquida operacional, R\$.ano⁻¹

RBT : renda bruta total R\$.ano⁻¹; e

CopT : custo operacional total R\$.ano⁻¹;

2.16.4 Renda líquida total (RLT)

Esta renda é a principal e mais completa medida de rentabilidade econômica de um sistema. É calculada pela diferença entre a renda bruta total e os custos totais. Como no custo total foram incorporados todos os itens de custos incluindo os custos de oportunidade, ou seja, a remuneração do capital investido, a renda líquida positiva significa que a opção do empresário de alocar seus recursos para implantar o sistema proporcionará melhor retorno em relação ao que obteria caso tivesse aplicado os mesmos recursos financeiros no uso alternativo. Da mesma forma, a renda líquida negativa implica que, no máximo, os ganhos líquidos gerados pelo sistema são inferiores aos ganhos que obteria se os recursos financeiros tivessem sido aplicados no uso alternativo (caderneta de poupança, por exemplo). Finalmente, a RLT nula significa que o retorno do capital investido na empresa proporciona o mesmo retorno que teria sido obtido caso o produtor optasse pelo uso alternativo.

$$RLT = RBT - CT \quad (29)$$

em que

CT : Custos totais (implícitos e explícitos); e

RLT : renda líquida total, R\$.ano⁻¹.

Assim, pela análise da RLT, pode-se concluir que:

- Se $RLT > 0$; situação de lucro econômico supernormal, indicando sua viabilidade com retornos superiores aos que seriam conseguidos se os mesmos recursos fossem utilizados no uso alternativo. Atividades que apresentam esse tipo de comportamento tornam-se muito atrativas, estimulando a entrada de novos investidores no setor.

- Se $RLT = 0$; lucro econômico normal, isto é, o capital apresenta remuneração exatamente igual à remuneração proporcionada pelo mercado de fatores. Este é um ponto de equilíbrio de longo prazo.

- Se $RLT < 0$; significa prejuízo econômico. Porém se esta atividade conseguir suportar os custos operacionais ($RLOp > 0$), pode-se continuar com ela por determinado período, na perspectiva de que ajustes sobre sua eficiência deverão ser realizados para redução dos custos e melhoria da rentabilidade.

2.16.5. Índices de rentabilidade (IRT)

Esta variável fornece a rentabilidade em relação a cada real gasto na empresa. É a relação entre a renda bruta total (RBT) e o custo total (CT) da produção, ou seja:

$IRT < 1$; a empresa sofre um prejuízo econômico;

$IRT = 1$; o lucro é normal; e

$IRT > 1$; o lucro é supernormal

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Procedimentos gerais

O experimento foi realizado no período entre maio e agosto de 1999, nas unidades de pré-processamento de café das fazendas do Sr. Dalton Dias Heringer, que operaram em escala comercial localizadas nos municípios de Martins Soares, MG, e Iúna, ES. O apoio técnico-científico foi dado pelo Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa.

As análises qualitativas do produto foram realizadas no laboratório da empresa Caldas Café Ltda., localizada no município de Manhuaçu, MG.

O delineamento experimental constituiu-se de quatro tratamentos e três testes por tratamento, conforme os seguintes procedimentos:

Tratamento 1 – Pré-secagem em secador rotativo horizontal, com distribuição radial de ar, até que o produto atingisse a umidade igual a $28 \pm 7\%$ bu. Sem a etapa de repouso, a secagem foi completada em secador, intermitente, de colunas, de fluxos cruzados, até que a umidade do produto atingisse a umidade final igual a $12 \pm 1\%$ bu. O aquecimento complementar do ar foi feito por uma fornalha a fogo indireto, utilizando-se eucalipto como combustível, em ambos os secadores;

Tratamento 2 – Pré-secagem em secador rotativo, com distribuição radial de ar, até que o teor de umidade do produto atingisse $22 \pm 8\%$ bu. A secagem foi completada em secador intermitente de colunas, de fluxos cruzados. Quando o café atingiu umidade de $14,5 \pm 1\%$ bu foi colocado em repouso durante 14 ± 2 horas. Após esse período, deu-se continuidade à secagem até que o produto atingisse a umidade final de $12 \pm 1\%$ bu. O aquecimento do ar de secagem em ambos os secadores foi feito em trocador de calor,

cuja energia foi fornecida pela massa de vapor gerada numa caldeira, a partir da combustão de eucalipto.

Tratamento 3 – A secagem foi realizada em secador vertical intermitente, de colunas, de fluxos cruzados até a umidade do produto igual a $16\pm 1\%$ bu, sendo o café, então, transportado para uma tulha para que passasse pelo repouso, que variou de 14 a 46 horas. Após esse período deu-se continuidade à secagem até que o produto atingisse a umidade final igual a $12\pm 1\%$ bu. O aquecimento do ar de secagem foi realizado pela energia fornecida na queima de gás liquefeito de petróleo (GLP);

Tratamento 4 – Secagem em secador rotativo horizontal, com distribuição radial de ar, sem a etapa de repouso até que o produto atingisse o teor de umidade igual a $12\pm 1\%$ bu. O aquecimento complementar do ar foi feito por uma fornalha a fogo indireto, utilizando eucalipto como combustível.

A análise do sistema de secagem foi baseada na metodologia descrita por BAKKER-ARKEMA (1978).

Os parâmetros relativos ao ar de secagem medidos foram as temperaturas inicial e final do ar intergranular ($^{\circ}\text{C}$), temperatura do ar de exaustão na câmara de secagem ($^{\circ}\text{C}$), temperatura do ar de secagem do *plenum* ($^{\circ}\text{C}$), temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$), fluxo de ar de secagem ($\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$); umidade relativa do ar ambiente (%), pressão estática do ar no *plenum* (mmca.) e a velocidade do ar na saída do ventilador ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Nos parâmetros relativos ao produto, determinou-se os teores de umidade inicial (% bu) e final (% bu), as massas específicas inicial e final ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), além da análise de qualidade final do produto.

Com relação ao combustível, determinaram-se o poder calorífico inferior ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$), umidade (dec. bs) e o consumo ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$);

Determinaram-se, também, a eficiência do secador ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ de água evaporada), a duração do teste (h) em cada tratamento e o consumo de energia elétrica (kWh).

Fizeram-se análise de investimentos, de custos e de rentabilidade do sistema.

A Figura 2 ilustra o esquema das instalações analisadas. Nelas, o café foi recebido no terreiro durante a noite e levado para secagem no dia seguinte.

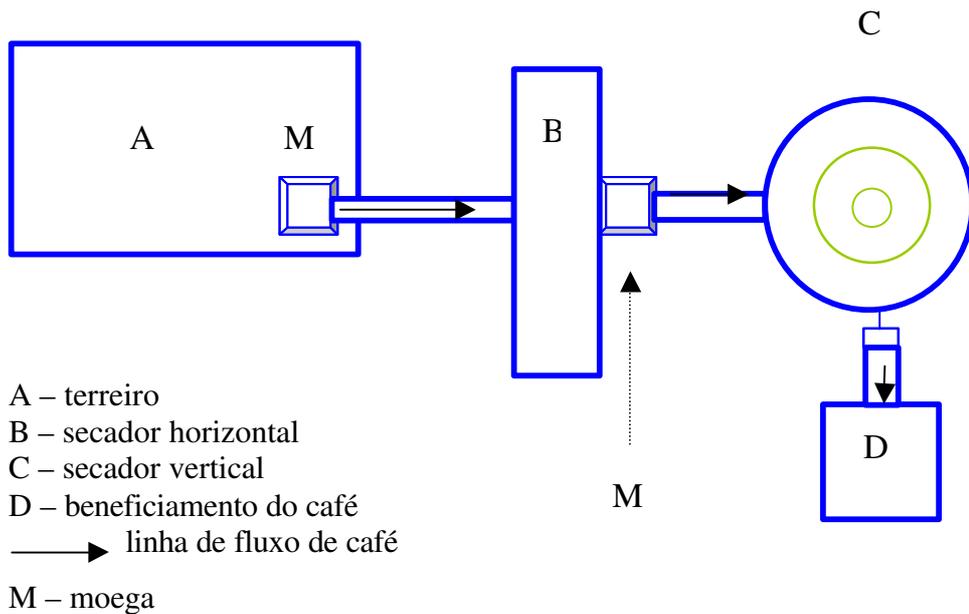


Figura 2 – Esquema e componentes da unidade de pré-processamento utilizada no experimento.

Os fluxogramas das Figura 3 a 5, apresentam as operações necessárias ao desenvolvimento dos testes. Objetivou-se atender à rotina operacional básica das unidades, e durante a realização do experimento foi adotada a sistemática de não alterar a dinâmica de produção destas.

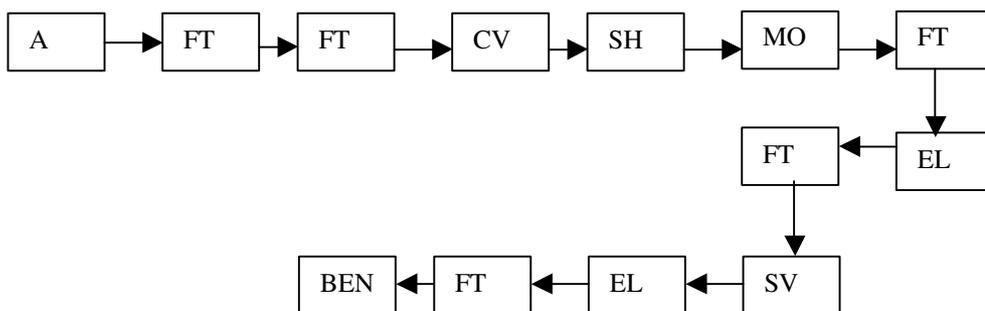


Figura 3 – Fluxograma operacional utilizado no tratamento 1.

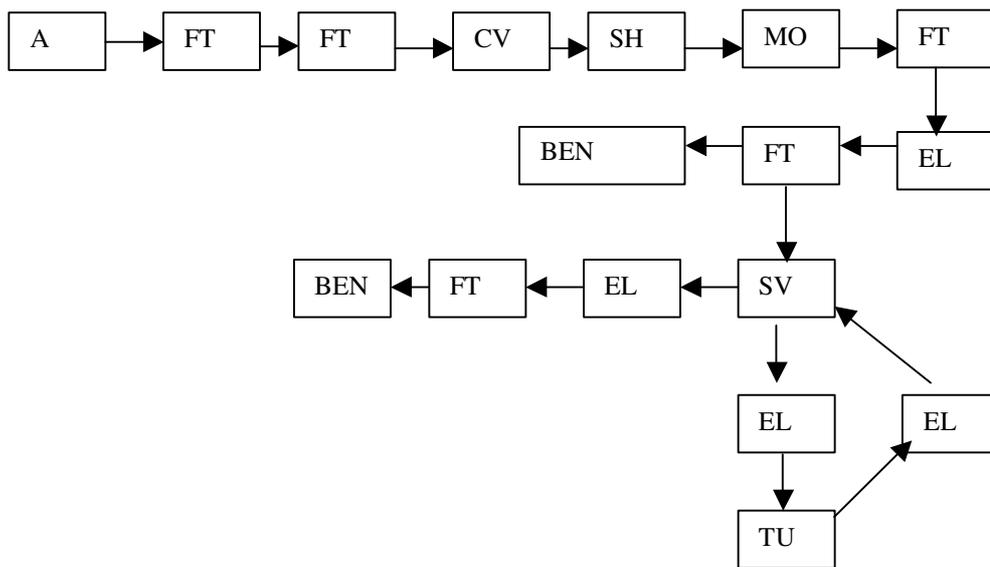


Figura 4 – Fluxograma operacional utilizado no tratamento 2 e 3.

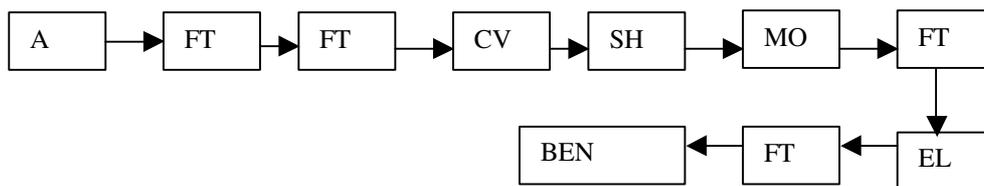


Figura 5 – Fluxograma operacional utilizado no tratamento 4.

em que:

A : terreiro;

FT : fita transportadora;

CV : câmara de ventilação;

SH : secador horizontal;

MO : moega;

EL : elevador;

BEN : beneficiamento;

SV : secador vertical; e

TU : tulha.

3.2. Sistemas de secagem

3.2.1. Secagem em terreiro

O produto foi secado no terreiro durante 8 ± 3 horas antes de ir para o secador mecânico; além dessa operação, uma amostra de 10 quilos de produto úmido, relativo a cada teste, foi secada totalmente no terreiro, visando à comparação da qualidade desta com a do produto secado nos secadores.

3.2.2. Secador rotativo

O secador rotativo horizontal, com distribuição radial de ar e capacidade igual a 15 m^3 , é constituído por um cilindro horizontal, que gira em torno de um eixo longitudinal à frequência de 1,6 rpm. O sistema foi acionado por um motor elétrico de potência igual a 5 c.v. localizado na parte anterior do secador. O ar aquecido é insuflado por um ventilador centrífugo operando com frequência igual a 850 rpm e acionado por um motor elétrico cuja potência é igual a 6 c.v. A vazão de ar igual a $85\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$ e a pressão estática igual a 75 mmca. O fluxo de ar é igual a $17\text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^2$. A espessura média da camada de secagem era igual a 0,60 m e a área de secagem igual a 5 m^2 .

Café, proveniente do terreiro, ficou numa câmara ventilada de capacidade igual a $20\pm 4\text{ m}^3$, localizada na parte superior do secador horizontal rotativo. A carga do secador foi feita por meio de um registro apropriado. Interrompeu-se o carregamento quando se observava uma distância igual a 0,15 m entre a superfície do produto e o anel externo do secador. A descarga do produto foi feita numa moega localizada na parte inferior do secador. Nas Figuras 6, 7 e 8, apresentam-se as vistas lateral, superior e frontal do conjunto fornalha e secador horizontal. Quando o aquecimento do ar de secagem, de ambos os secadores foi feito em trocador de calor (tratamento 2) a energia foi fornecida pelo vapor d'água produzido numa caldeira, a partir da combustão de eucalipto.

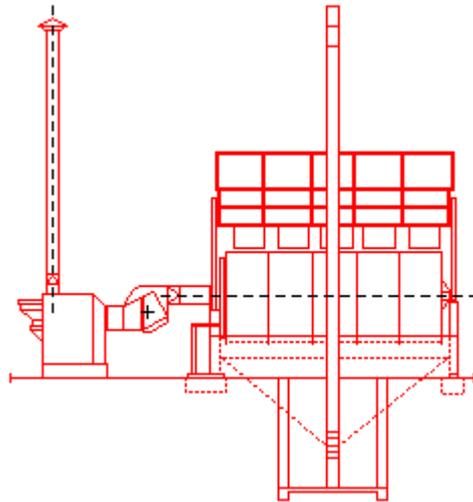


Figura 6 – Croqui: vista lateral do conjunto fornalha, secador horizontal e caixa de ventilação. Pinhalense Máquinas Agrícolas S.A.

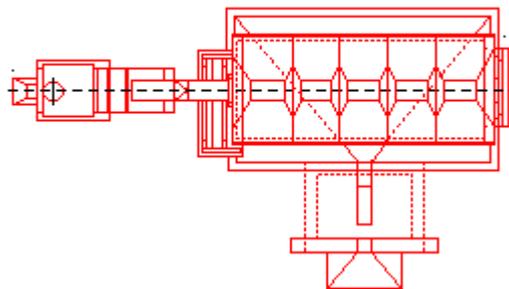


Figura 7 – Croqui: vista superior do conjunto fornalha, secador horizontal e caixa de ventilação. Pinhalense Máquinas Agrícolas S.A.

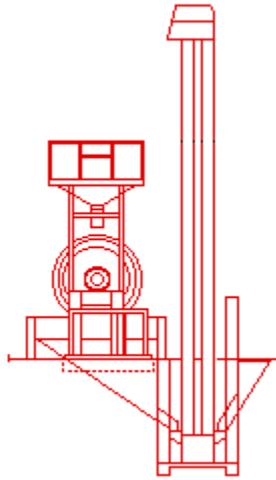
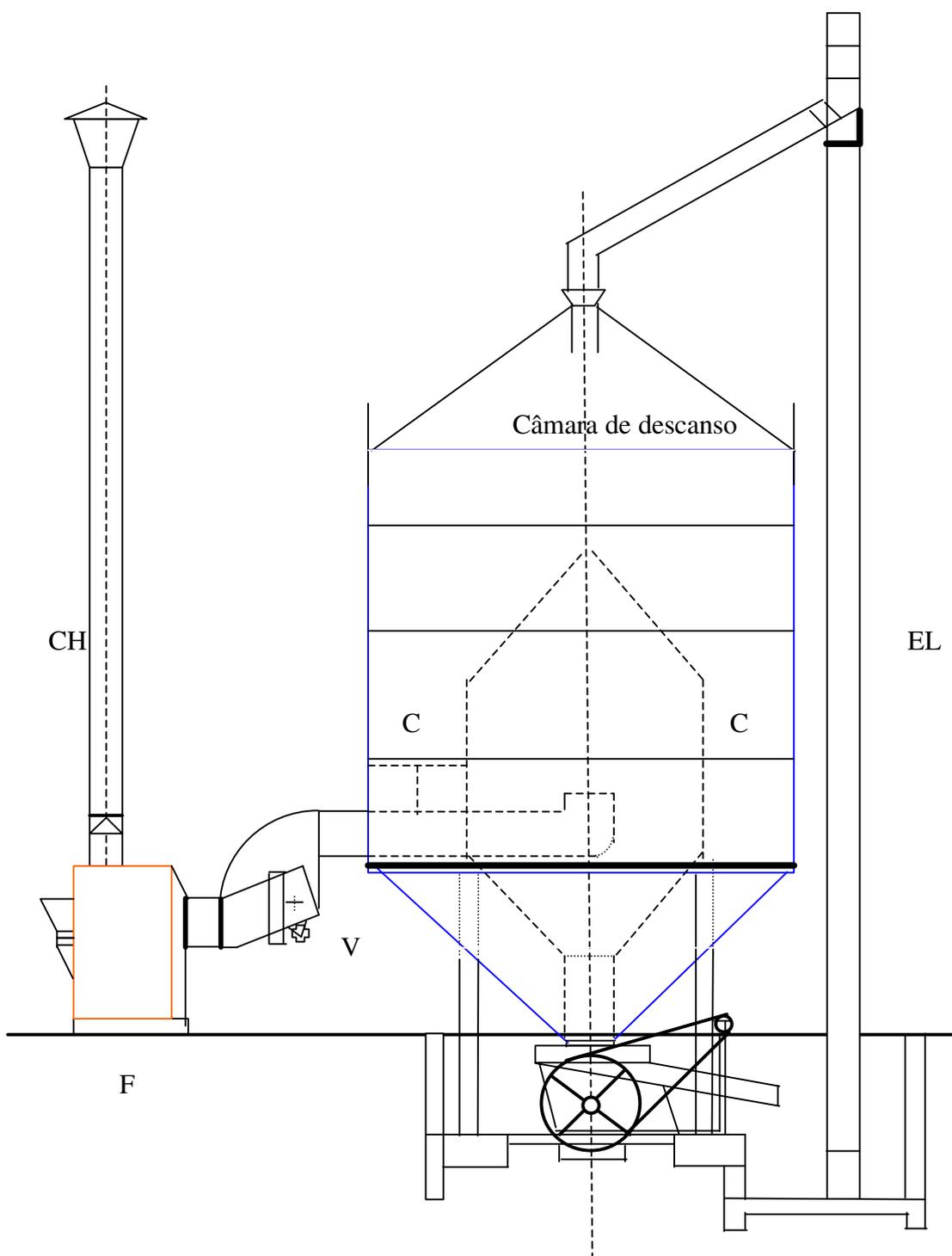


Figura 8 – Croqui: vista frontal do conjunto fornalha, secador horizontal e caixa de ventilação. Pinhalense Máquinas Agrícolas S.A.

3.2.3. Secador intermitente, de coluna, de fluxos cruzados

O secador vertical intermitente, de coluna, de fluxos cruzados tem capacidade igual a 22 m^3 . O ar aquecido foi insuflado por um ventilador centrífugo operando numa frequência de 850 rpm, acoplado a um motor elétrico de potência igual a 6 cv; vazão igual a $85 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ e pressão estática igual a 75 mmca. O fluxo de ar era igual a $9,5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$. A espessura média da camada de secagem café era igual a 0,45 m e a área de secagem igual a 9 m^2 .



CH : Chaminé
 C : Câmara de secagem do café
 EL : Elevador
 V : Ventilador
 F : Aquecimento do ar ambiente

Figura 9 – Croquí: secador intermitente, de coluna, de fluxos cruzados

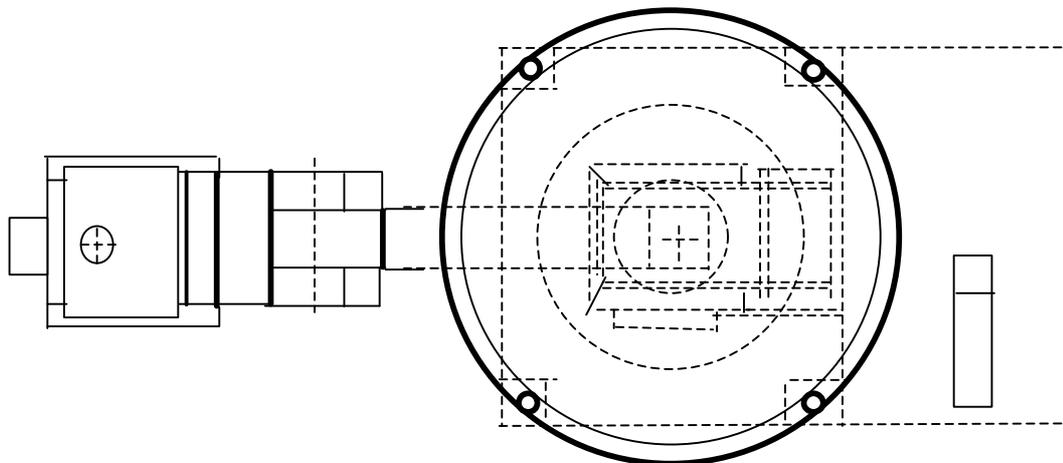


Figura 10 – Croqui: vista superior do secador intermitente de fluxos cruzados.

3.3. Monitorização das operações

Foram mensuradas as seguintes variáveis: tempo, massa e umidades inicial e final do café; temperatura do ar intergranular, de secagem, de exaustão e do ambiente; umidade relativa do ambiente, análise da qualidade do café seco e beneficiado, vazão específica do ar de secagem; consumo de combustível para aquecimento do ar e consumo de energia elétrica durante a movimentação do ar e do café durante secagem.

3.3.1. Tempo

O tempo de secagem foi mensurado, usando-se um cronômetro para monitorar a duração de cada fase operacional que envolvesse consumo de energia elétrica, combustível, mão-de-obra, secagem e movimentação do produto.

3.3.2. Amostragem do produto

O procedimento para obtenção das amostras, atendeu às recomendações contidas em “Regras para Análises de Sementes” (BRASIL, 1992). A amostragem inicial foi realizada durante o carregamento dos secadores horizontais, quando o operador, respeitando a natureza aleatória do procedimento, em intervalos regulares de quatro horas coletava café, na fita de carga do secador, meio quilo de café por vez em

cada ponto do secador. Essas amostras foram homogeneizadas e acondicionadas em sacos plásticos impermeáveis para a imediata determinação da umidade.

Durante a secagem, no secador horizontal, com o secador parado e o ventilador desligado, amostras de 5,0 kg foram obtidas num único ponto (Figura 10), localizado na parte superior do secador. O operador abria o registro de entrada de produto e então, coletava a amostra de café. Após a retirada das amostras do produto, fechava-se o registro e reiniciava-se a secagem.

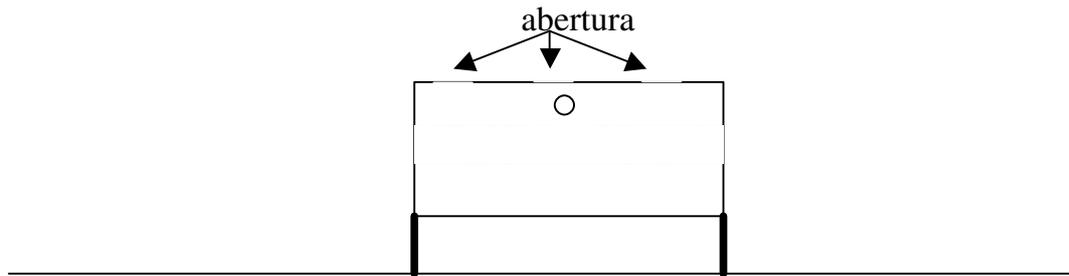


Figura 11 – Ponto de coleta de amostra na massa de café dentro da câmara de secagem.

No secador vertical intermitente de fluxos cruzados, as amostras de café foram coletadas a 2,30 m (pontos 1 e 2) e 2,80 m (pontos 3 e 4) da base do secador. Coletaram-se amostras de café em pontos localizados a 0,08 m e 0,36 m do duto de ar quente, pontos 2 e 4 e pontos 1 e 3 respectivamente (Figura 11).

Para coleta de amostras na câmara de secagem, fizeram-se dois orifícios na parede do secador a 2,30 m e 2,80 m da base. Foi utilizado um amostrador do tipo tubos concêntricos, cujo comprimento permitia a coleta de amostras nos pontos pre-estabelecidos, o que era feito em intervalos regulares de quatro horas. Coletou-se aproximadamente 0,5 kg de café em cada ponto (1 a 4), acondicionando-o em sacos plásticos impermeáveis para o imediato processamento. Objetivando determinar a massa específica aparente e umidade do produto, no ponto 5, coletou-se aproximadamente 1,5 quilos de café.

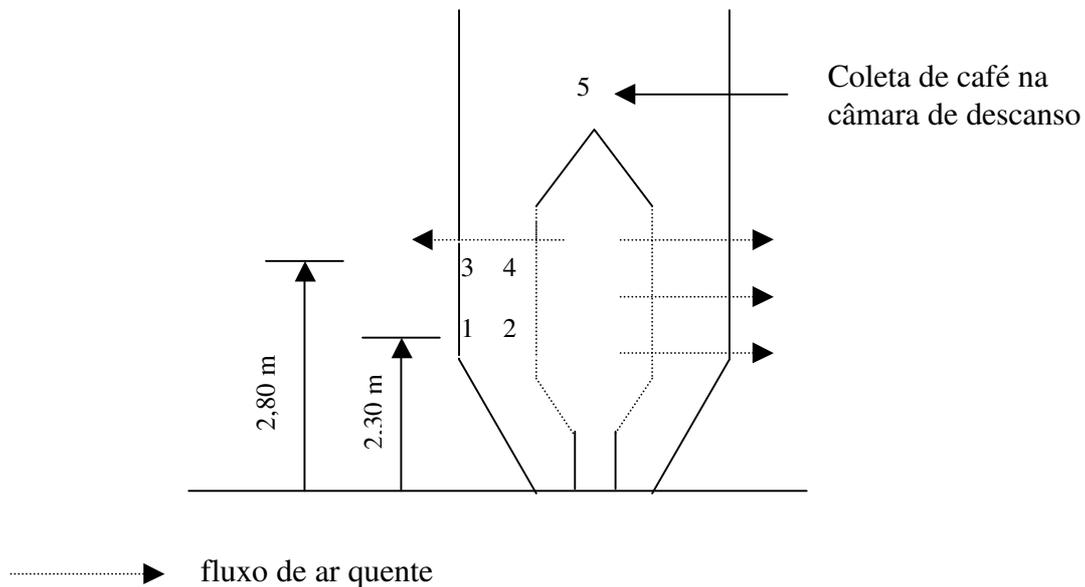


Figura 11 – Pontos de coleta de amostras na massa de café durante a secagem em secador intermitente de fluxos cruzados.

3.3.3. Umidade do produto

A umidade do produto foi medida antes, durante e após a secagem, utilizando-se o método da destilação a 200 °C no aparelho DUPEA. Quando o produto atingiu $17\pm 2\%$ bu, utilizou-se além do método direto em medidor, cujo princípio de funcionamento se baseia na capacidade das sementes em resistir a passagem da corrente elétrica, em determinada temperatura.

3.3.4. Temperatura de bulbo seco e bulbo úmido

As temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido foram medidas com psicrômetro aerado. A leitura foi feita em intervalos regulares de quatro horas, sendo a primeira às sete horas e a última às 21 horas. As leituras eram feitas a 100 metros do secador, evitando-se, assim, a atmosfera de exaustão próxima dos secadores.

3.3.5. Simulação de secagem

Desenvolveu-se um programa de computação para simular a secagem, com base no modelo proposto por THOMPSON et al. (1968). A linguagem utilizada foi o Turbo Pascal 5.5.

As equações de THOMPSON et al. (1968) para determinar a umidade de equilíbrio e calor o específico numa camada fina de produto utilizadas no programa, foram:

Razão de umidade do café

$$RU = e^{(-a \cdot t)^b} e^{(-c/T_{eq})} \quad (30)$$

em que

RU : razão de umidade, decimal;

t : tempo para que o valor RU seja reduzido à metade do seu valor inicial, min;

T_{eq} : temperatura de equilíbrio, K;

a, b, c : constantes

- para umidade do café entre 44 e 28 % b.u.

$$a = 173.705;$$

$$b = 0,83681;$$

$$c = 5.533,11 ;$$

- para umidade menor ou igual a 28 % b.u.

$$a = 105,756;$$

$$b = 0,60564;$$

$$c = 2.751,51.$$

Umidade de equilíbrio entre o ar e o grão

$$U_{eq} = 1,1298 \cdot \frac{-\ln(1 - U_{Re})}{(T + 40,535)} \quad (31)$$

em que

U_{eq} : umidade de equilíbrio, decimal bs;

U_{re} : umidade relativa do ar nas condições de equilíbrio, decimal;

T : temperatura de equilíbrio, °C.

- Calor específico do café

$$C_p = 1,674 + 2,51 \frac{u}{(1+u)} \quad (32)$$

em que

C_p : calor específico do produto, $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$;

u : umidade do produto, decimal b.s.

Para efeito de simulação, a massa de produto foi dividida em 20 camadas no sentido vertical e três na horizontal, com 0,14 m cada, perfazendo o total de 60 volumes de grãos para um tempo de simulação de 80 minutos, conforme Figura 12. Repetiu-se este procedimento até que a umidade final média das três camadas na direção horizontal atingisse 13 % b.u, que foi a condição de parada do programa.

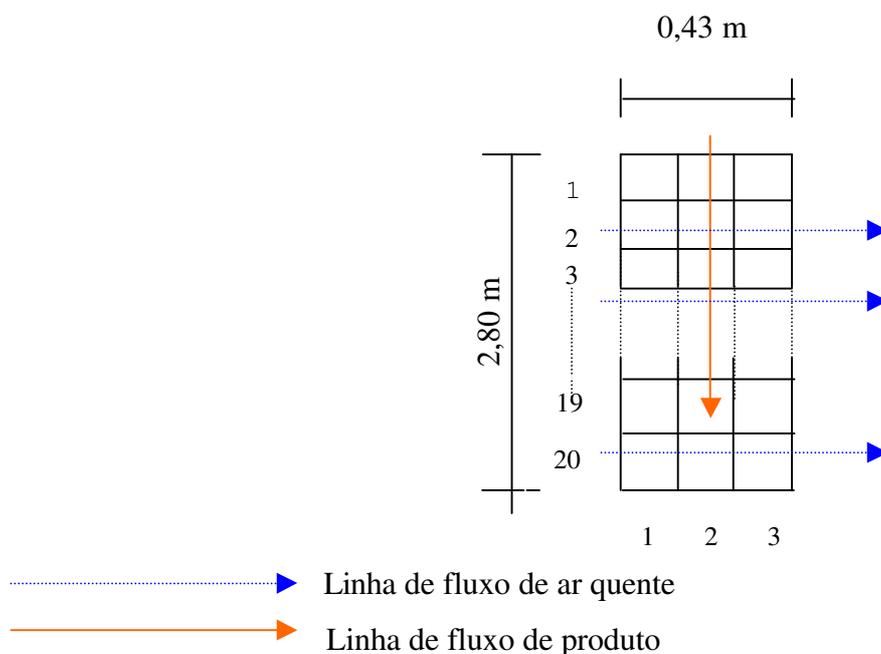
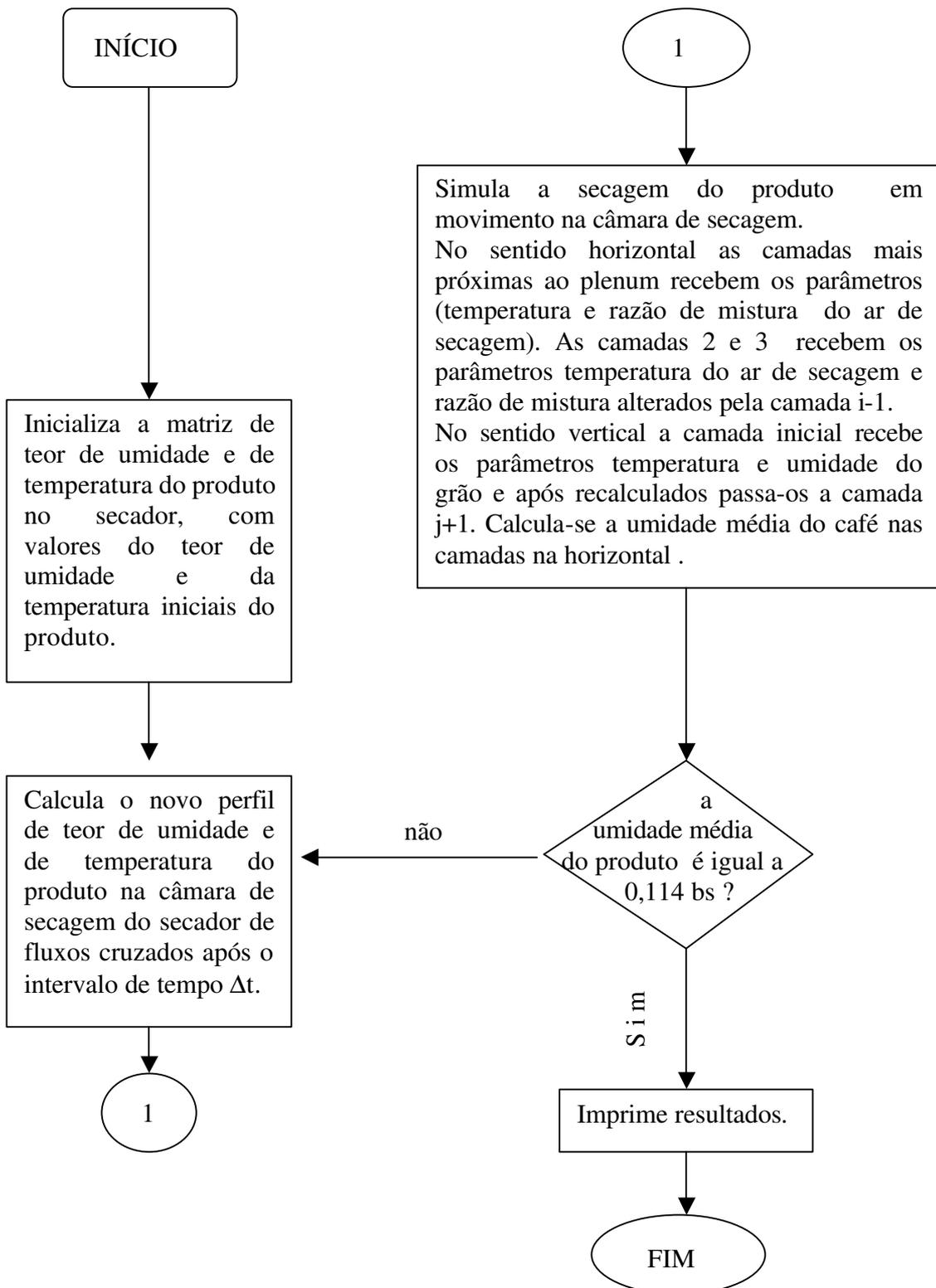


Figura 12 – Croqui: representação do programa implementado

Apresenta-se a seguir o fluxograma simplificado e a listagem do programa implementado. Inicia-se a matriz de umidade e temperatura do produto, a seguir calcula-se o novo perfil de umidade e temperatura, então calculam-se os parâmetros relacionados à secagem do produto, caso a umidade média do café seja menor ou igual a 0,114 bs a simulação é interrompida. Caso a umidade não seja inferior a 0,114 bs o programa calcula um novo perfil de umidade e temperatura.

FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DO PROGRAMA IMPLEMENTADO



PROGRAM THOMPSON; {* Este programa simula a secagem de café em coco em secador intermitente de fluxos cruzados, usando o modelo proposto por Thompson* }

(*Programa elaborado por: José Cardoso Sobrinho e
José Dermeval Saraiva Lopes*)

USES CRT;

TYPE MATRIZ = ARRAY[1..3,0..20] OF REAL;

VAR TEOR_UMIDADE_INICIAL, TEMPERATURA_INICIAL_GRAOS,
MASSA_ESPECIFICA, TEMPERATURA_AMBIENTE,
UMIDADE_RELATIVA_AR_AMBIENTE, FLUXO_AR_SECAGEM,
TEMPERATURA_AR_SECAGEM, ESPESSURA_CAMADA,
ALTURA_COLUNA, VELOCIDADE_PRODUTO : REAL;

DELTAX, DELTAY, DELTAT, ES, RMIS, URX, BU_BS, VESP : REAL;
GA, UMIDADE_INICIAL_GRAO, TEMP_INICIAL_GRAO : REAL;
TARSECAG, URARSECAG, T, Y, CALOR_ESP, FATOR_R : REAL;
TEMP_EQUIL : REAL;
CONTADOR : INTEGER;
UG, TG, URS, TS, RM : MATRIZ;
F : TEXT;
UGX : ARRAY[1..3]
OF REAL;

CONST CONTROLE: BOOLEAN = TRUE;
CONTADOR1 : INTEGER = 0;

PROCEDURE LEIA_DADOS;
BEGIN

CLRSCR;
GOTOXY(30,2); WRITE('Dados de entrada');
GOTOXY(30,3); WRITE('-----');
GOTOXY(5,6); WRITE('Teor de umidade inicial do produto (%).... ');
READLN(TEOR_UMIDADE_INICIAL);
GOTOXY(5,7); WRITE('Temperatura inicial dos graos (°C):..... ');
READLN(TEMPERATURA_INICIAL_GRAOS);
GOTOXY(5,8); WRITE('Massa especifica do grao (kg/m3):..... ');
READLN(MASSA_ESPECIFICA);
GOTOXY(5,9); WRITE('Temperatura ambiente (°C):..... ');
READLN(TEMPERATURA_AMBIENTE);
GOTOXY(5,10); WRITE('Umidade relativa media do ar ambiente:.... ');
READLN(UMIDADE_RELATIVA_AR_AMBIENTE);
GOTOXY(5,11); WRITE('Temperatura do ar de secagem (°C):..... ');
READLN(TEMPERATURA_AR_SECAGEM);
GOTOXY(5,12); WRITE('Fluxo do ar de secagem (m3/min/m2):..... ');
READLN(FLUXO_AR_SECAGEM);
GOTOXY(5,13); WRITE('Velocidade do produto (m/min):..... ');

```

READLN(VELOCIDADE_PRODUTO);
GOTOXY(5,14); WRITE('Espessura total da camada de secagem:..... ');
READLN(ESPESSURA_CAMADA);
GOTOXY(5,15); WRITE('Altura da coluna de secagem (°C):..... ');
GOTOXY(5,16); WRITE('Umidade relativa do ar de secagem (%):.... ');
READLN(URARSECAG);

```

```

READLN(ALTURA_COLUNA);

```

```

PROCEDURE LIMPA_LIXO_DOS_VETORES;

```

```

VAR I, J: WORD;
BEGIN
FOR I:= 1 TO 3 DO
FOR J:= 1 TO 20 DO
BEGIN
UG [I,J]:=0;
TG [I,J]:=0;
URS[I,J]:=0;
TS [I,J]:=0;
RM [I,J]:=0;
END;
END;

```

```

PROCEDURE PRESSAO_VAPOR_SATURACAO(TEMPX:REAL);
VAR TEMP: REAL;
BEGIN
TEMP:=TEMPX+273.16;
ES:=-7511.52/TEMP+89.63121+0.02399897*TEMP-12.150799*LN(TEMP)+
2.0998405E-11*EXP(4*LN(TEMP))-1.1654551E-5*SQR(TEMP);
ES:=EXP(ES-1.2810336E-8*EXP(3*LN(TEMP)))/0.1333;
END;

```

```

PROCEDURE RAZAO_MISTURA(TEMPERATURAX,UMIDADE_RELATIVAX:
REAL);
BEGIN
PRESSAO_VAPOR_SATURACAO(TEMPERATURAX);
RMIS:=ES*UMIDADE_RELATIVAX/100;
RMIS:=0.622*RMIS/(760-RMIS);
END;

```

```

PROCEDURE UR_AR_SECAGEM(TEMPY,RZMIST: REAL);
BEGIN
URX:=RZMIST*760/(0.622+RZMIST);
PRESSAO_VAPOR_SATURACAO(TEMPY);
URX:=URX/ES*100;
END;

```

```

PROCEDURE BUBS(UIX:REAL);

```

```

BEGIN
  BU_BS:=UIX/(100-UIX);
END;

PROCEDURE VOL_ESPECIFICO(TEMPZ,RMX: REAL);
BEGIN
  VESP:=RMX*101325/(0.622 + RMX);
  VESP:=287*(TEMPZ+273.16)/(101325 - VESP);
END;

PROCEDURE CALCULOS_INICIAIS;
BEGIN
  DELTAX:=ESPESSURA_CAMADA/3;
  DELTAY:=ALTURA_COLUNA/20;
  DELTAT:=DELTAY/VELOCIDADE_PRODUTO;
  RAZAO_MISTURA(TEMPERATURA_AMBIENTE,
  UMIDADE_RELATIVA_AR_AMBIENTE);
  VOL_ESPECIFICO(TEMPERATURA_AMBIENTE,RMIS);
END;

PROCEDURE CAMADA(TSS,RMM,UGG,TGG:REAL);
VAR VESPX, RMISX : REAL;
BEGIN
  CALOR_ESP:=0.4+0.6*UGG/(1+UGG);
  IF NOT CONTROLE THEN
  BEGIN
    VESPX:=VESP;
    RMISX:=RMIS;
  END;
  RAZAO_MISTURA(TEMPERATURA_AR_SECAGEM,
  UMIDADE_RELATIVA_AR_SECAGEM);
  VOL_ESPECIFICO(TEMPERATURA_AMBIENTE,RMIS);

  FATOR_R:=MASSA_ESPECIFICA *VESP* 10*DELTAY/(FLUXO_AR_SECAGEM*
  10*DELTAT*(1+UGG));
  IF NOT CONTROLE THEN
  BEGIN
    VESP:=VESPX;
    RMIS:=RMISX;
  END;
  CONTROLE:=FALSE;
  TEMP_EQUIL:=((0.24+0.45*RMM)*TSS+CALOR_ESP*FATOR_R*(1+UGG)*TGG);

  TEMP_EQUIL:=TEMP_EQUIL/(0.24+0.45*RMM+CALOR_ESP*FATOR_R*(1+UG
  G));
END;

PROCEDURE
DELGADA(TE,TGRAO,UGRAO,CP,R,URARSEC,UIGRAO,DT,RZM:REAL;II,JJ:B
YTE);

```

```

VAR UMID_EQUI, RZ_UMID, A1, A2, A3, DUU, TEQ, UF: REAL;
  RMF, ATIV, TEABS, DHFG, TF, URFINAL : REAL;
BEGIN
  UMID_EQUI:=1.1282*EXP(0.5405*LN(-LN(1-0.01*URARSEC)/(TE+40.535)));
  RZ_UMID:=(UGRAO-UMID_EQUI)/(UIGRAO-UMID_EQUI);
  IF UIGRAO > 0.38889 THEN
  BEGIN
    A1:=0.73681;
    A2:=173,705;
    A3:=5,533.11;
  END
  ELSE
  BEGIN
    A1:=0.605604;
    A2:=105.756;
    A3:=2,751.53;
  END;
  DUU:=0;
  IF RZ_UMID > 1 THEN
  BEGIN
    RZ_UMID:=1;
    DUU:=UGRAO-UIGRAO;
  END;
  IF RZ_UMID > 0 THEN
  BEGIN
    IF RZ_UMID <> 1 THEN
      TEQ:=EXP((1/A1)*LN(-LN(RZ_UMID)/(A2*EXP(-A3/(TE+273.16)))));
    IF RZ_UMID = 1 THEN
      TEQ:=0;
      TEQ:=TEQ+DT;
    IF TEQ = 0 THEN
      UF:=UIGRAO + DUU;
    IF TEQ > 0 THEN
      UF:=(UIGRAO+DUU-UMID_EQUI)*EXP(-A2*EXP(A1*LN(TEQ))*EXP(-
        A3/(TE+273.16)))+UMID_EQUI;
    END;
  IF RZ_UMID <= 0 THEN
    UF:=UGRAO;
    RMF:=RZM+R*(UGRAO-UF);
    ATIV:=1-EXP(-0.8*(TE+40.535)*EXP(1.85*LN(UGRAO)));
    TEABS:=TE+273.16;
    DHFG:=0.088*SQR(TEABS)*EXP(1.85*LN(UGRAO))*(-1+1/ATIV);
    TF:=(0.24+0.45*RZM)*TE-(RMF-RZM)*(588+DHFG-
    TE)+CP*R*(1+UGRAO)*TE;
    TF:=TF/(0.24+0.45*RMF+CP*R*(1+UGRAO));
    UR_AR_SECAGEM(TF,RMF);
    URFINAL:=URX;
    RMIS:=RMF;
    UG[II,JJ]:=UF;
    TG[II,JJ]:=TF;

```

```

IF II <> 3 THEN
BEGIN
  URS[II+1,JJ]:=URX;
  TS[II+1,JJ]:=TF;
  RM[II+1,JJ]:=RMF;
END;
WRITELN(F, CONTADOR1:8,TE:12:2,RZ_UMID:11:2,UF:13:6,TEQ:15:2,
ES:17:2);
END;

PROCEDURE CORRIGE(TF,RUF,UF,TGF,CP,R:REAL;II,JJ:BYTE);

VAR T1, RM1, H1, PV9, RM2, T2, UR2, UR1, T3, RM3, UR3: REAL;
    NVEZES, JFLAG                : INTEGER;

BEGIN
  T1:=TF;
  RM1:=RUF;
  H1:=0.24*T1+RM1*(588+0.45*T1);
  NVEZES:=0;
  PRESSAO_VAPOR_SATURACAO(T1);
  PV9:=ES;
  RM2:=0.622*PV9/(760-PV9);
  T2:=(H1+(RM2-RM1)*T1+CP*R*(1+UF)*T1-RM2*588);
  T2:=T2/(0.24+RM2*0.45+CP*R*(1+UF));
  UR_AR_SECAGEM(T1,RM1);
  UR1:=URX;
  REPEAT
    NVEZES:=NVEZES+1;
    T3:=T1-(UR1-100)/(UR1-UR2)*(T1-T2);
    RM3:=(H1-RM1*T1+CP*R*(1+UF)*(T1-T3)-0.24*T3)/(-T1+588+0.45*T3);
    UR_AR_SECAGEM(T3,RM3);
    UR3:=URX;
    JFLAG:=1;
  IF UR3 > 100 THEN
  BEGIN
    UR1:=UR3;
    H1:=0.24*T3+(588+0.45*T3)*RM3;
    RM1:=RM3;
    T1:=T3;
    JFLAG:=0;
  END;
  IF UR3 < 99 THEN
  BEGIN
    UR2:=UR3;
    RM2:=RM3;
    T2:=T3;
    JFLAG:=0;
  END;
  IF NVEZES > 100 THEN

```

```

    JFLAG:=1;
    UNTIL JFLAG = 1;
    RUF:=RM3;
    UF:=UF-(RM3-RUF)/R;
    TF:=T3;
    TGF:=T3;
    RMIS:=RUF;
    UG[II,JJ]:=UF;
    TG[II,JJ]:=TF;
    UR_AR_SECAGEM(TF,RUF);
    IF II <> 3 THEN
    BEGIN
        URS[II+1,JJ]:=URX;
        TS[II+1,JJ]:=TF;
        RM[II+1,JJ]:=RUF;
    END;
END;

```

```

PROCEDURE CALCULOS;
VAR I, J      : BYTE;
BEGIN
    UMIDADE_INICIAL_GRAO:=TEOR_UMIDADE_INICIAL;
    TEMP_INICIAL_GRAO:=TEMPERATURA_INICIAL_GRAOS;
    BUBS(UMIDADE_INICIAL_GRAO);
    UMIDADE_INICIAL_GRAO:=BU_BS;

```

```

REPEAT
    FOR I:=1 TO 3 DO
    BEGIN
        UG[I,0]:=UMIDADE_INICIAL_GRAO;
        TG[I,0]:=TEMP_INICIAL_GRAO;
        UGX[I]:=UG[I,0];
    END;

```

```

RAZAO_MISTURA(TEMPERATURA_AMBIENTE,UMIDADE_RELATIVA_AR_AMBIENTE);

```

```

    FOR J:=1 TO 20 DO
    BEGIN
        URS[1,J]:= URARSECAG;
        TS [1,J]:= TEMPERATURA_AR_SECAGEM;
        RM [1,J]:= RMIS;
    END;
    T:=T+DELTAT;
    Y:=Y+DELTAY;
    CONTADOR:=1;

```

```

    FOR J:=1 TO 20 DO
    FOR I:=1 TO 3 DO
    BEGIN
        UG[I,J]:=UG[I,J-1];

```

```

    TG[I,J]:=TG[I,J-1];
    CAMADA(TS[I,J],RM[I,J],UG[I,J],TG[I,J]);
    UR_AR_SECAGEM(TEMP_EQUIL,RM[I,J]);
    IF URX < 100 THEN
    BEGIN

DELGADA(TEMP_EQUIL,TG[I,J],UG[I,J],CALOR_ESP,FATOR_R,URX,UGX[I],D
ELTAT,RMIS,I,J);
    UGX[I]:=UG[I,J-1];
    END
    ELSE
    BEGIN
    CORRIGE(TEMP_EQUIL,RMIS,UG[I,J],TEMP_EQUIL,CALOR_ESP,FATOR_R,I,J);
    UGX[I]:=UG[I,J-1];
    END;
END;

    UMIDADE_INICIAL_GRAO:=(UG[1,10]+UG[2,10]+UG[3,10])/3;
    TEMP_INICIAL_GRAO:=(TG[1,10]+TG[2,10]+TG[3,10])/3;
    CONTADOR:=CONTADOR+1;
    UNTIL (UMIDADE_INICIAL_GRAO >= 0.114) AND
(UMIDADE_INICIAL_GRAO <= 0.116);

    CLRSCR;
    GOTOXY(10,10);
    WRITE('Umidade final do grao: ',UMIDADE_INICIAL_GRAO:10:2);
    GOTOXY(10,12);
    WRITE('Temperatura final do grao: ',TEMP_INICIAL_GRAO:8:2);
END;

{ Programa principal }
BEGIN
CLRSCR;
Y:=0;
T:=0;
TEXTBACKGROUND(5);
TEXTCOLOR(14);
LEIA_DADOS;
CALCULOS_INICIAIS;

RAZAO_MISTURA(TEMPERATURA_AR_SECAGEM,UMIDADE_RELATIVA_A
R_AMBIENTE);
UR_AR_SECAGEM(TEMPERATURA_INICIAL_GRAOS,RMIS);
BUBS(TEOR_UMIDADE_INICIAL);
VOL_ESPECIFICO(TEMPERATURA_INICIAL_GRAOS,RMIS);
CLRSCR;
ASSIGN(F,'DADOS.DAT');
REWRITE(F);
REWRITE(F);

```

```

WRITELN(F,' CONTADOR TEMPER. EQUIL RAZAO UMIDADE UMIDADE
FINAL TEMPO EQUIL. ES');
WRITELN(F,'-----');
CALCULOS;
CLOSE(F);
END.

```

3.3.6. Temperaturas do ar intergranular, de exaustão e de secagem

As temperaturas do ar intergranular, de exaustão e de secagem foram medidas por um sistema de termometria, sendo as leituras feitas em termômetro digital, com precisão de 0,1 °C. Os sensores eram de cobre-constantan com bitola igual a 22 AWG. Foram utilizados dois sistemas de medição, com as mesmas características, sendo um para o secador intermitente, de colunas, de fluxos cruzados e outro para o horizontal.

No secador horizontal rotativo, consideraram-se três distâncias ao longo de seu eixo principal, para determinar a temperatura do ar de secagem (pontos 1,2 e 3) e exaustão, pontos (5, 6 e 7) previamente estabelecidos, a cada quatro horas durante a pré-secagem do lote de café. A temperatura do ar intergranular foi determinada num único ponto, com leituras realizadas sempre com o sistema de ventilação desligado, e imediatamente após a parada total do rotor do ventilador (ponto 4). Admitiu-se a temperatura da massa de café em equilíbrio com a do ar intersticial, quando esse não estava em movimento forçado (Figura 13).

Os pontos referentes às temperaturas do ar de secagem foram demarcados, tomando-se como referência o lado de instalação do ventilador, da seguinte forma: ponto 5 – distante 0,40 m do início do cilindro (duto de ar quente), ponto 6 a 2,5 m do início do cilindro e ponto 7 a 4,60 m do início do cilindro. A temperatura do ar intergranular foi medida no ponto 4 na região central do secador, na mesma cota do ponto 6. A temperatura do ar de exaustão foi determinada pelo valor médio obtido entre os resultados obtidos nos pontos 1, 2 e 3, localizados paralelamente aos pontos 5, 6 e 7 respectivamente, conforme Figura 13.

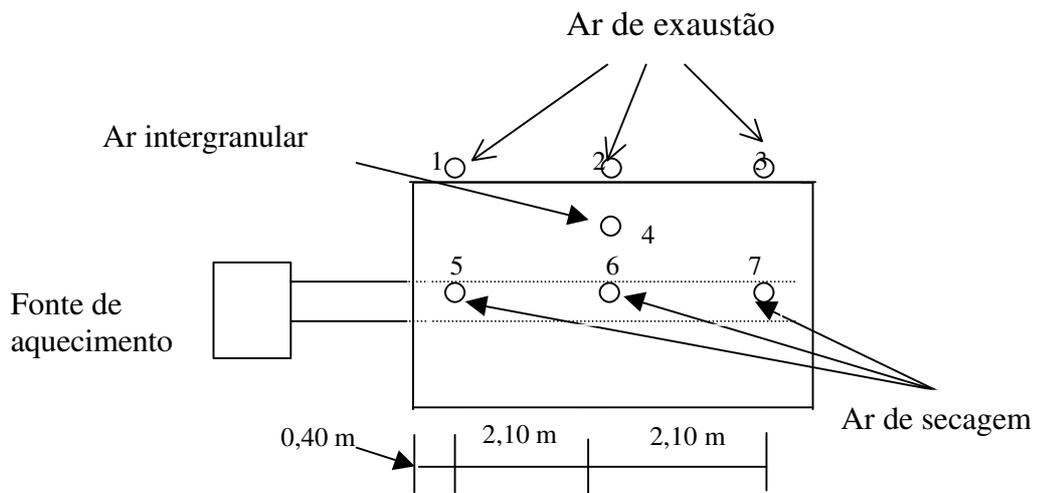


Figura 13 – Pontos de medição de temperaturas na massa de café, do ar de secagem e de exaustão no secador horizontal rotativo.

No secador intermitente, de colunas, de fluxos cruzados foram estabelecidos cinco pontos para medir a temperatura do ar intergranular, sendo quatro na câmara de secagem e um na câmara de descanso do produto no secador. Considerando-se a espessura da camada de café, foram demarcados dois pontos (2 e 4) distantes de 0,08 m em relação ao duto de ar quente e dois a 0,36 m distância da periferia do secador (pontos 1 e 3) e um outro ponto, (o de número 6), na câmara de descanso do secador. As leituras foram feitas após a parada total do rotor do ventilador. A temperatura do ar de secagem foi determinada somente no ponto 5 (Figura 14).

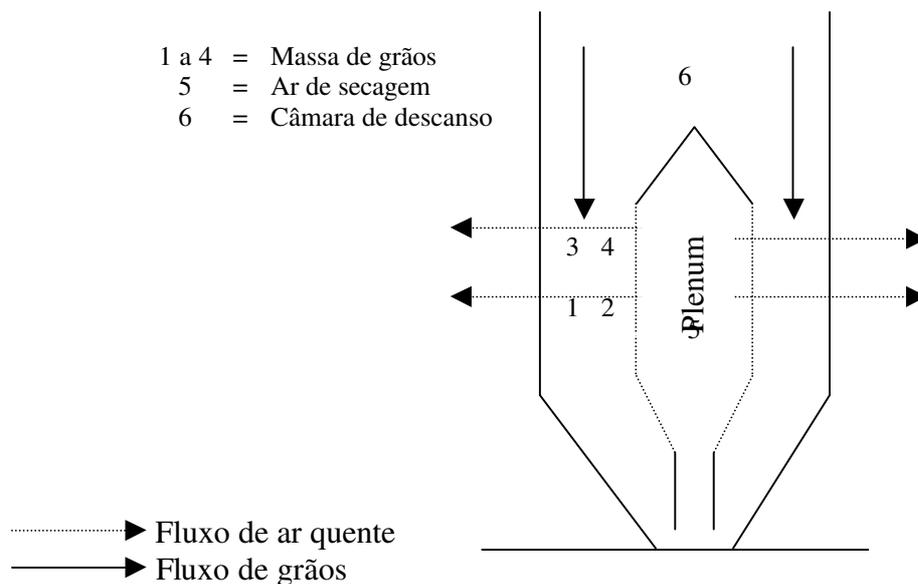


Figura 14 – Localização dos pontos de leitura de temperatura no secador intermitente, de colunas, de fluxos cruzados

3.3.7. Análise da qualidade do produto após a secagem

A análise da qualidade final do produto seco, 12% bu, e beneficiado foi feita por técnicos especializados da empresa Caldas Café Ltda., localizada em Manhuaçu, MG. Foram determinados o tipo e a bebida do café dos diversos lotes estudados.

3.3.8. Parâmetros relativos ao combustível

Determinaram-se o poderes caloríficos superior e inferior e a umidade da madeira.

Para determinação do poder calorífico superior, foram obtidas 15 amostras de madeira em forma de discos, com diâmetros variando entre 0,10 e 0,20 m e espessuras igual a 0,025 m. Os discos foram cortados com motosserra e embalados em sacos plásticos. No laboratório foram cortados, palitados, moídos e levados à estufa a 100 °C durante 24 horas. Depois desse período, foram medidos os poderes caloríficos superiores das amostras, em bomba calorimétrica no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG. O poder calorífico inferior (PCI) da lenha foi calculado por meio da equação 1.

Para medir a umidade da madeira, o procedimento de coleta de amostras foi semelhante àquele feito na determinação do poder calorífico superior. Cada disco foi dividido em quatro partes, sendo uma destas levada à estufa à temperatura igual a 102 ± 2 °C, durante 2 horas. Decorrido este tempo, foram novamente pesadas objetivando medir a massa seca.

A umidade foi calculada pela equação 32.

$$U = \frac{Mu - Ms}{Ms} \quad (32)$$

em que

U : umidade da madeira, dec. bs;

Mu : massa da amostra úmida, g; e

Ms : massa da amostra seca, g.

Para medir a massa de lenha, fez-se o uso de uma balança com capacidade igual a 200 quilos e precisão igual a 0,5 kg. Utilizou-se lenha com diâmetro variando entre 0,10 e 0,20 m e comprimento entre 1,0 e 1,5 m. O sistema de produção de vapor trabalhou sempre com o alimentador de combustível fechado, com exceção à entrada de ar necessária à combustão. Para o GLP, utilizou-se o valor do poder calorífico inferior tabelado, fornecido pela Minasgás S.A. A massa de GLP consumida durante a secagem foi medida indiretamente, relacionando-se o volume observado no caminhão-tanque no momento do reabastecimento e a massa específica do gás. As leituras foram feitas no início e final de cada teste.

3.3.9. Energia elétrica para movimentar o ar de secagem e o produto

O consumo de energia elétrica foi estimado com base na fatura mensal de energia elétrica fornecida pela empresa contratante da energia.

3.3.10. Avaliação do sistema de secagem

O consumo específico de energia dos sistemas de secagem foi avaliado conforme a metodologia proposta por BAKKER-ARKEMA (1978). Os resultados experimentais foram comparados entre si e com os estimados em simulações do processo. Os modelos utilizados na simulação foram propostos por THOMSPON (1968).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O experimento, caracterizado como um estudo de caso, consistiu de quatro tratamentos, com três testes por tratamento. Apesar da uniformidade do produto, as características operacionais de secagem, em nível de campo, foram diferentes. A natureza dos testes e dos procedimentos experimentais impede a possibilidade de repetições e portanto a obtenção de testes de média. Diante disso, os três testes foram analisados individualmente para cada tratamento. Esta metodologia foi proposta por BAKKER-ARKEMA (1978), que recomendou a realização de três testes consecutivos em sistemas de secagem em lotes; nos sistemas contínuos, deve-se operar durante 24 horas ininterruptas.

4.1. Parâmetros relativos ao ar de secagem e ar ambiente

A seguir, foram estudados os parâmetros temperatura do ar aquecido e temperatura e umidade relativa do ar ambiente.

4.1.1. Temperatura do ar intergranular

A temperatura do ar na massa de grãos apresentou valores máximos na faixa compreendida entre 46 °C e 48 °C, nos testes realizados em secadores horizontais e verticais, respectivamente. As Figuras de 15 a 20 apresentam os resultados obtidos para temperaturas do ar de exaustão, ar intergranular e de secagem. Apesar de apresentarem valores superiores a 45 °C, conforme CORDEIRO, (1982), não influenciaram na qualidade da bebida do café quando comparada à do produto secado em terreiro (testemunha).

Em todos os testes realizados no secador intermitente, de colunas, de fluxos cruzados, observou-se que a temperatura do ar de secagem no *plenum* foi uniforme, razão pela qual optou-se por apenas um ponto de leitura.

Nos testes realizados em secador horizontal, houve gradiente de até 12 °C entre os pontos 5 e 7, Figura 15 e Figuras 20. Essa diferença de temperatura é decorrente da diminuição da massa de café e conseqüentemente, do seu volume, ocasionando diminuição da coluna de secagem na parte superior do secador. Devido a esse fato, há maior facilidade para o ar de secagem sair por essa região do secador, proporcionando, inclusive, variações da velocidade do ar nessa região.

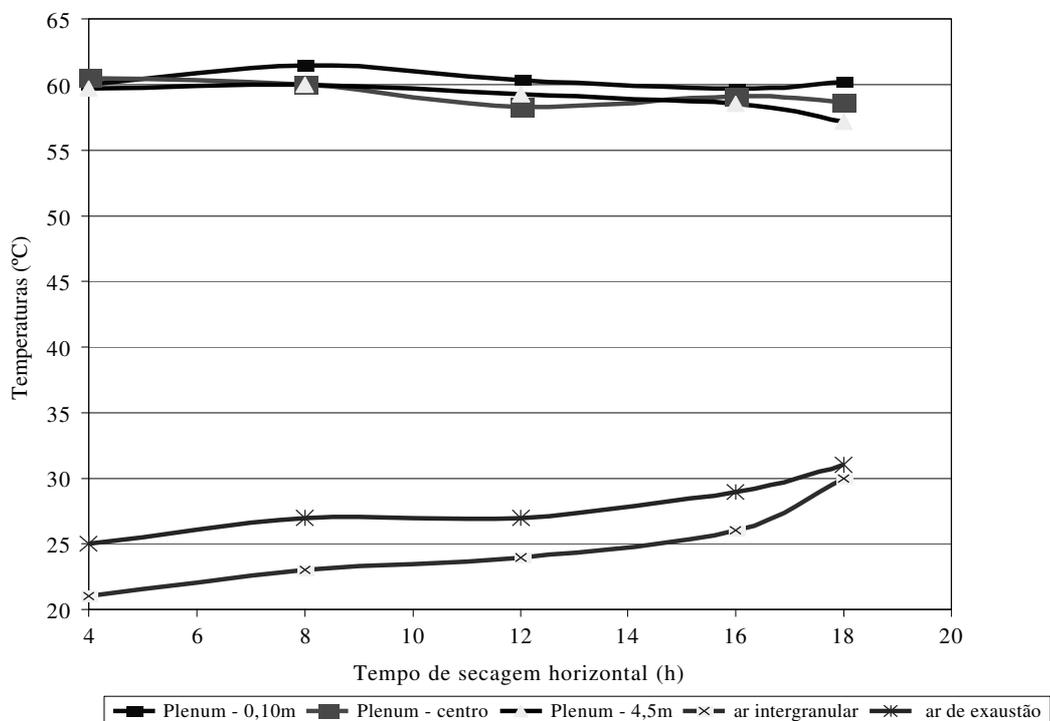


Figura 15 – Temperaturas do ar de exaustão, ar intergranular e ar de secagem em função do tempo de secagem, observadas no secador horizontal durante a pré-secagem, teste 1 – Tratamento 1.

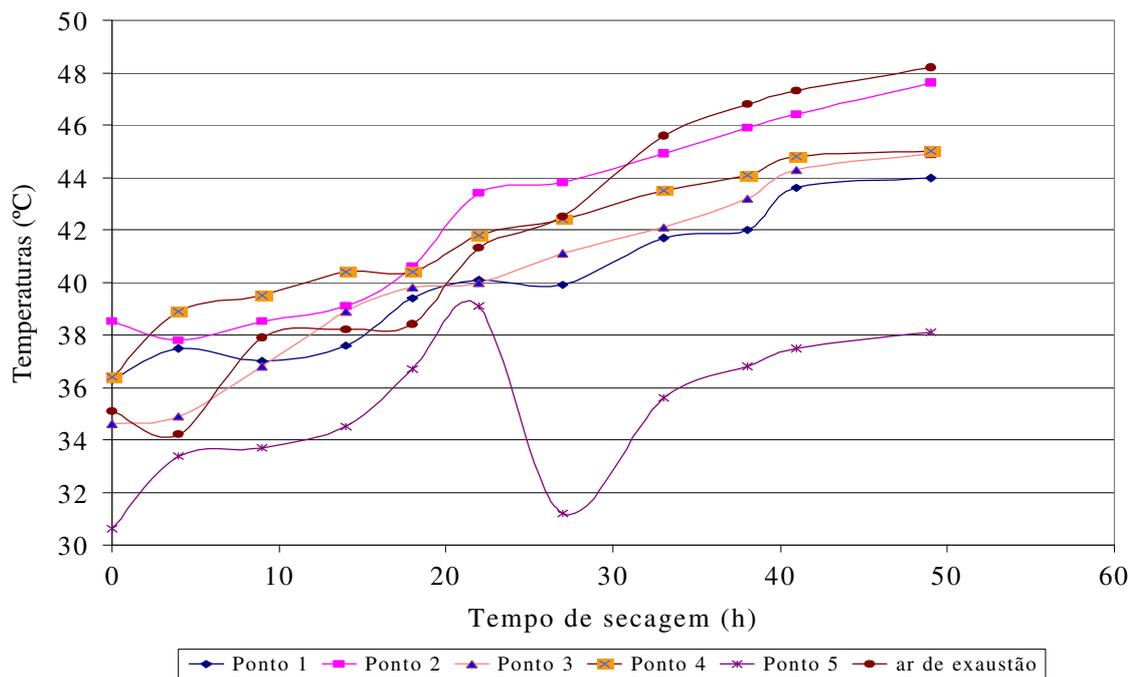


Figura 16 – Temperaturas do ar de exaustão e do ar secagem e ar intergranular durante a complementação da no secador intermitente, de colunas, de fluxos cruzados no teste 1 – Tratamento 1.

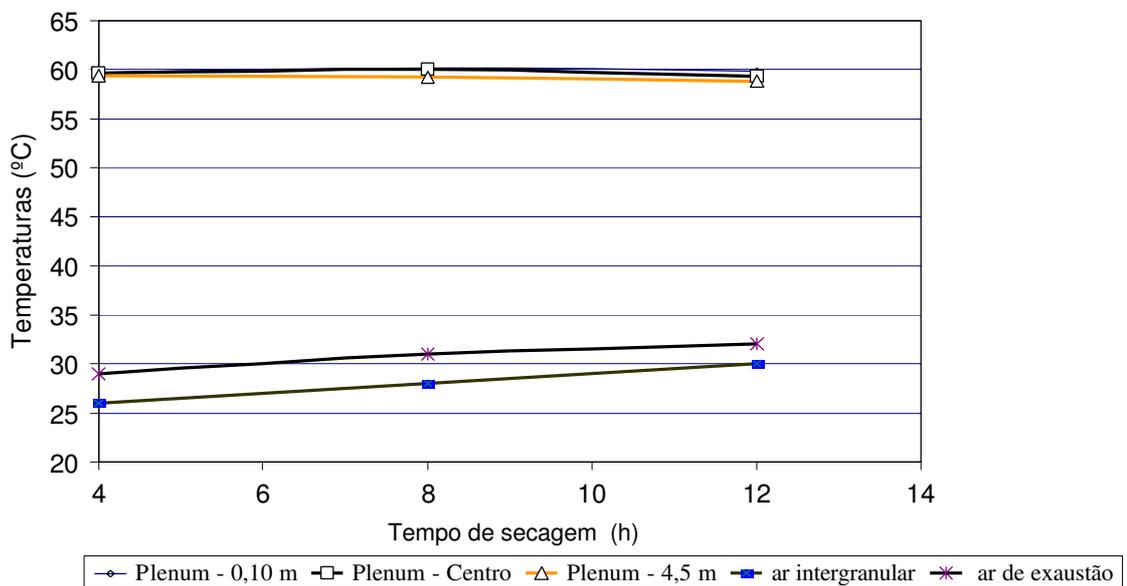


Figura 17 – Temperaturas do ar de exaustão, ar intergranular e ar de secagem em função do tempo de secagem, observadas no secador horizontal durante a pré-secagem, teste 2 – Tratamento 2.

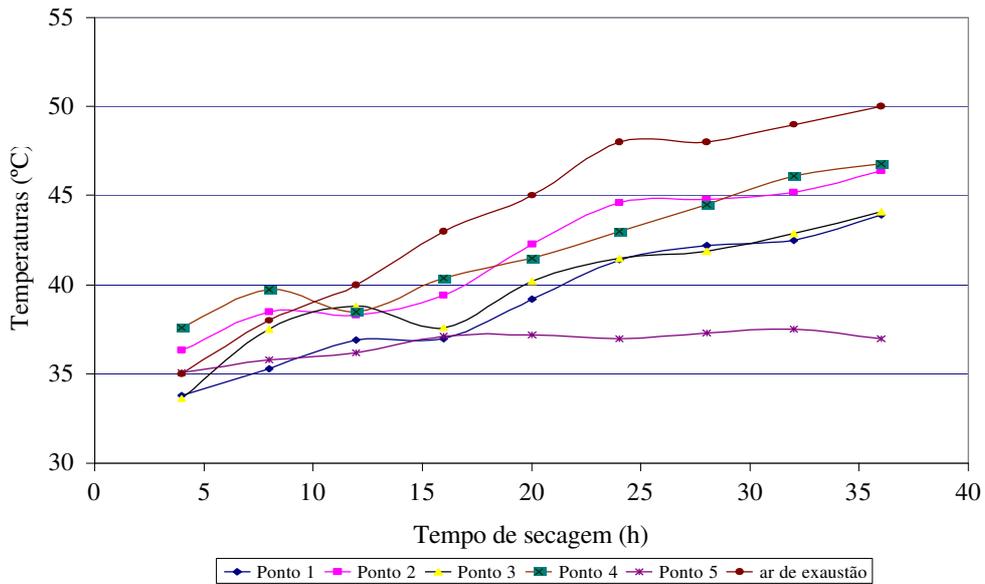


Figura 18 – Temperaturas do ar de exaustão, ar intergranular e ar de secagem no secador intermitente, de colunas, de fluxos cruzados no teste 2 – Tratamento 2.

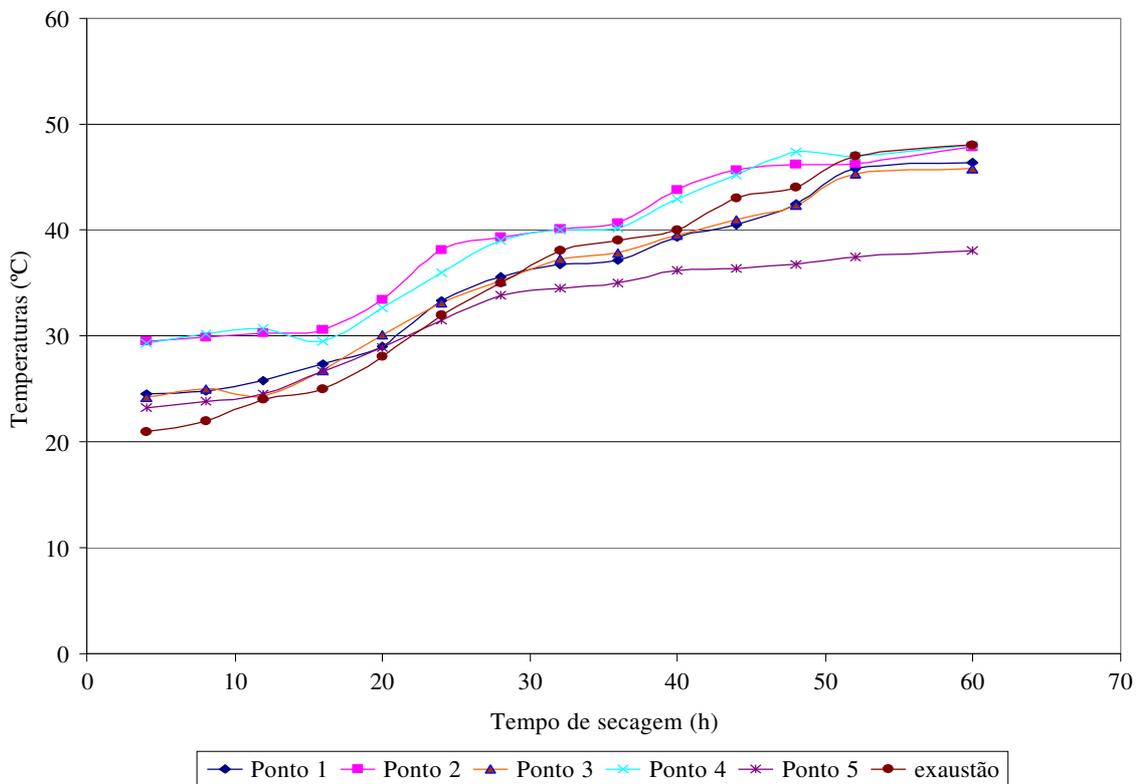


Figura 19 – Temperaturas do ar de exaustão, ar intergranular e ar de secagem no secador intermitente, de colunas, de fluxos cruzados, teste 1 – Tratamento 3.

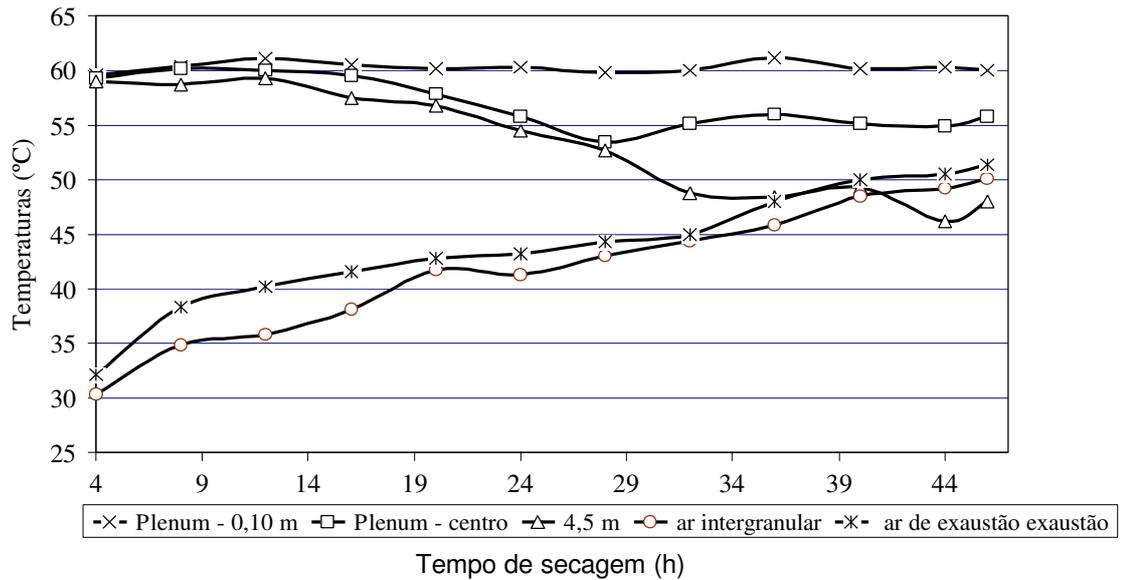


Figura 20 – Temperaturas do ar de exaustão, ar intergranular e ar de secagem no secador horizontal no teste 1 – Tratamento 4.

4.1.2. Temperatura do ar de exaustão

A representação gráfica da temperatura do ar de exaustão encontra-se nas Figuras 15 a 20. Durante a realização dos testes, nos quatro tratamentos e nos diferentes sistemas de aquecimentos, a temperatura do ar de exaustão chegou até 51 °C na fase final da operação, Figura 20. Isso ocorreu porque na fase final de secagem a troca de calor entre o ar e o produto é muito baixa, com isso, diminui a queda de temperatura do ar de secagem ao passar pelo café a ser secado.

4.1.3. Temperatura e umidade relativa do ar ambiente

As temperaturas e umidades relativas do ar ambiente estão apresentadas nas Tabelas 1, 2 e 3, correspondentes aos tratamentos 1, 2, 3 e 4. A temperatura do ar ambiente ficou entre 20 e 25 °C e a umidade relativa média do ar ambiente, entre 68,7 e 91,9%. Apesar das oscilações constatadas no ar ambiente durante os quatro tratamentos, a temperatura do ar de secagem manteve-se próxima da desejada 60 °C. Estes valores são típicos para a região, para a época do ano em que se realizou o experimento.

Tabela 1 – Resultados médios das temperaturas do ar de secagem, e da temperatura e umidade relativa do ar ambiente, observados durante a fase experimental dos testes 1, 2 e 3, dos tratamentos 1 e 2

	Teste 1		Teste 2		Teste 3	
	H	V	H	V	H	V
Tratamento 1						
Temperatura de secagem, °C	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
Temperatura ambiente, °C	21,0	21,4	20,5	21,3	20,5	20,0
Umidade relativa ambiente, %	74,7	74,3	70,8	71,5	77,2	78,7
Tratamento 2						
Temperatura de secagem, °C	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
Temperatura ambiente, °C	21,3	20,8	22,0	21,1	20,0	21,4
Umidade relativa ambiente, %	70,3	73,1	72,0	71,2	70,9	72,0

H : Pré-secagem em secador horizontal

V : Secador intermitente, de coluna, de fluxos cruzados

Tabela 2 – Resultados médios das temperaturas do ar de secagem, e da temperatura e umidade relativa do ar ambiente, observados durante a fase experimental dos testes 1, 2 e 3, do tratamento 3

Tratamento 3	Teste 1	Teste 2	Teste 3
	V	V	V
Temperatura de secagem, °C	60,0	60,0	60,0
Temperatura ambiente, °C	20,3	24,1	25,0
Umidade relativa ambiente, %	71,3	69,3	68,7

V : Secador intermitente, de coluna, de fluxos cruzados

Tabela 3 – Resultados médios das temperaturas do ar de secagem, e da temperatura e umidade relativa do ar ambiente, observados durante a fase experimental dos testes 1, 2 e 3, do tratamento 4

Tratamento 4	H	H	H
Temperatura de secagem, °C	60,0	60,0	60,0
Temperatura ambiente, °C	23,0	21,0	21,0
Umidade relativa ambiente, %	69,7	89,9	91,9

H : Secador horizontal

4.2. Parâmetros relativos ao produto

4.2.1. Umidade dos grãos

Para os tratamentos realizados no secador horizontal, não se observou gradiente de umidade do produto dentro do secador durante a secagem, entretanto no secador intermitente, de coluna, de fluxos cruzados sim, verificando-se que os grãos estavam mais secos na região próxima do *plenum* e úmidos quando localizados na periferia, na mesma altura do secador (Figuras 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 27). Pôde-se verificar, ainda, variação da umidade em produtos localizados em diferentes pontos

localizados longitudinalmente no secador intermitente, de colunas, e de fluxos cruzados conforme mostrado nas Figuras 25, 26 e 27. Essas diferenças apresentadas na umidade do produto quando secado no secador intermitente, de colunas, de fluxos cruzados ocorreram em virtude de o ar e o produto fluírem em direções perpendiculares. Com isso, grãos de café próximos da entrada do ar quente tendem a atingir maiores temperaturas e, conseqüentemente, secarem mais rapidamente, enquanto aqueles localizados na saída (periferia do secador) tendem a permanecer úmidos. Essa é uma característica dos secadores de fluxos cruzados. O gradiente de umidade através da coluna de 0,44 m, secador intermitente, de colunas, de fluxos cruzados, atingiu quatro pontos percentuais de umidade. Tal variação dependeu dos parâmetros de secagem envolvidos, podendo-se, noutras condições de secagem, obter-se outros resultados diferentes daqueles apresentados no presente trabalho, Figuras 21 a 27.

Fez-se avaliação do desempenho dos secadores horizontais e os verticais de fluxos cruzados, mediante o manejo dos seus parâmetros, a saber: tempo de residência do café no secador, fluxo e temperatura do ar de secagem.

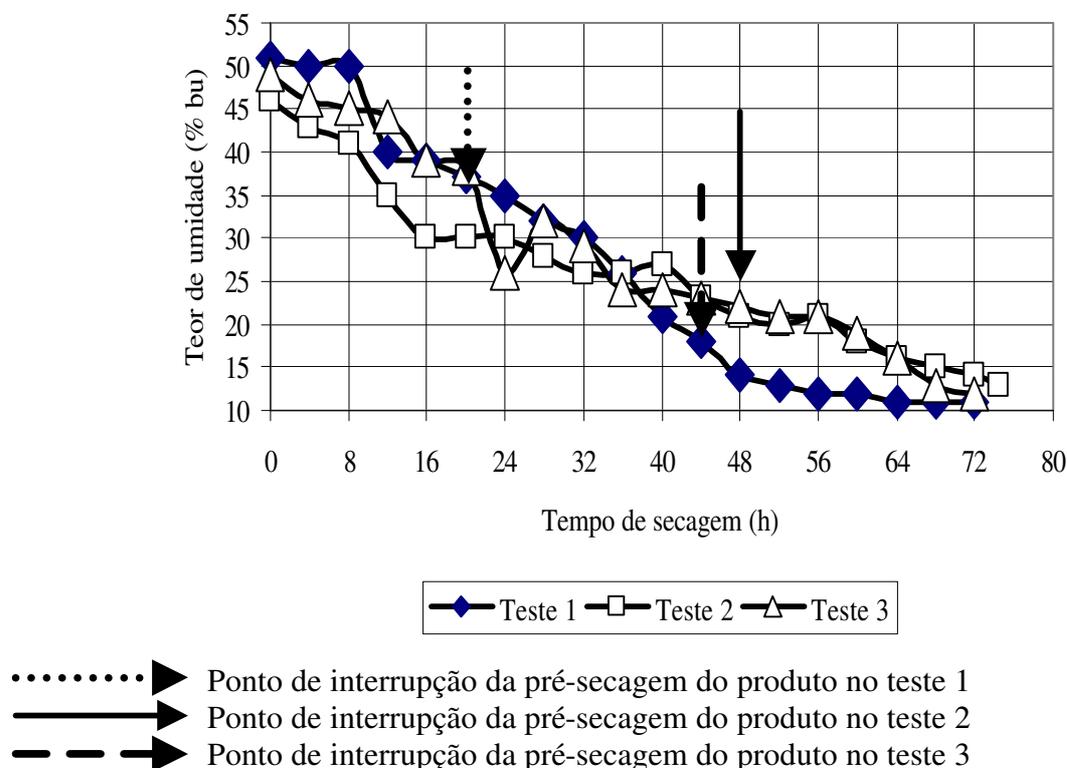


Figura 21 – Curvas de secagem do café no tratamento 1.

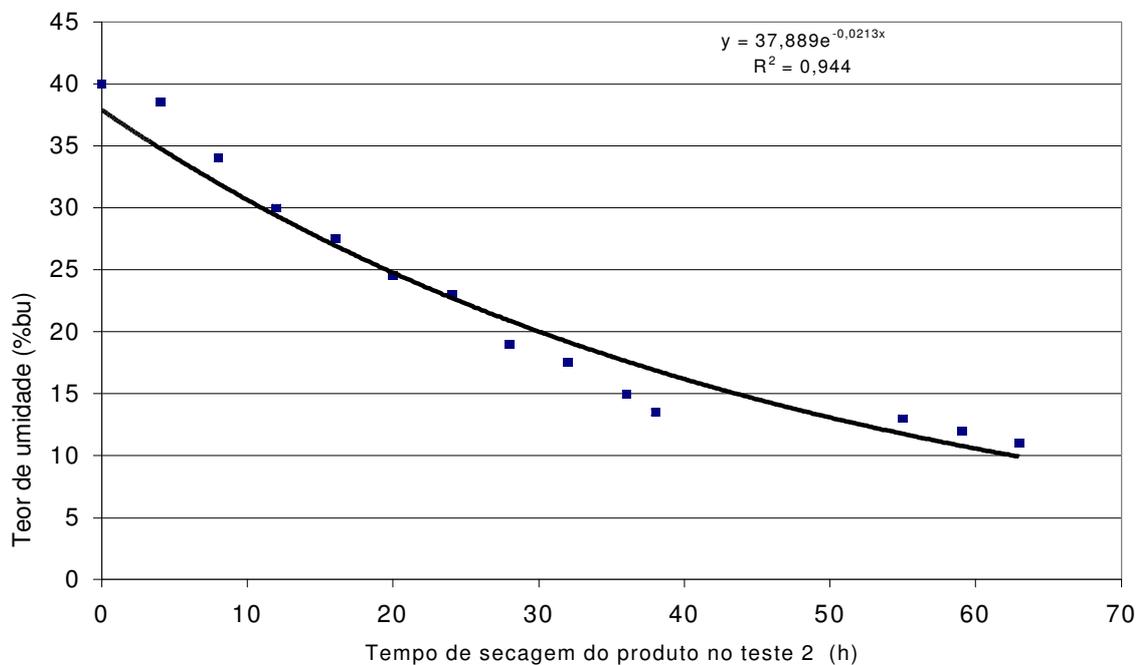


Figura 22 – Curva de secagem do café obtida no teste 2 – Tratamento 2.

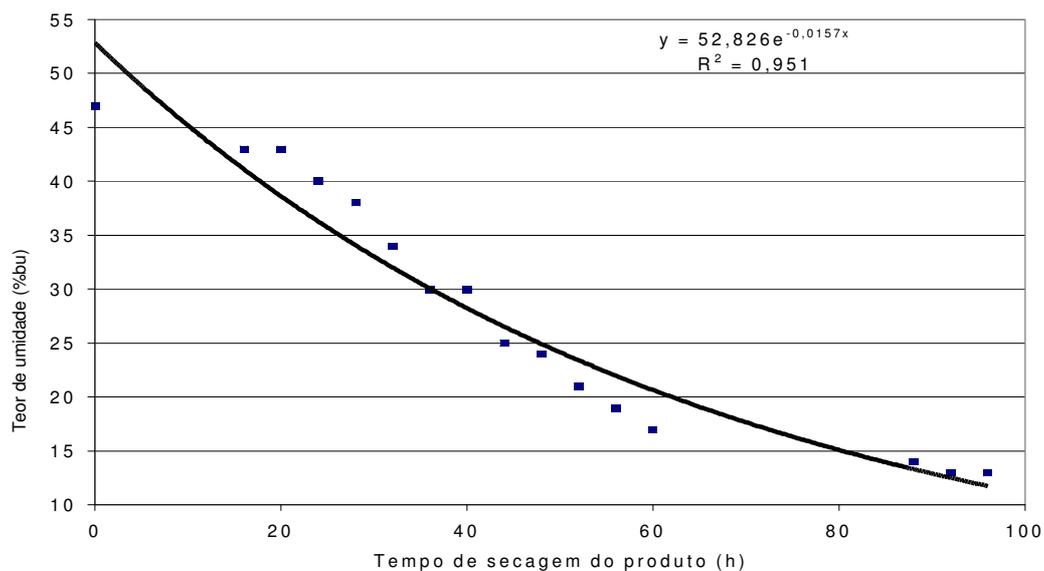


Figura 23 – Curva de secagem do café obtida no teste 1 – Tratamento 3.

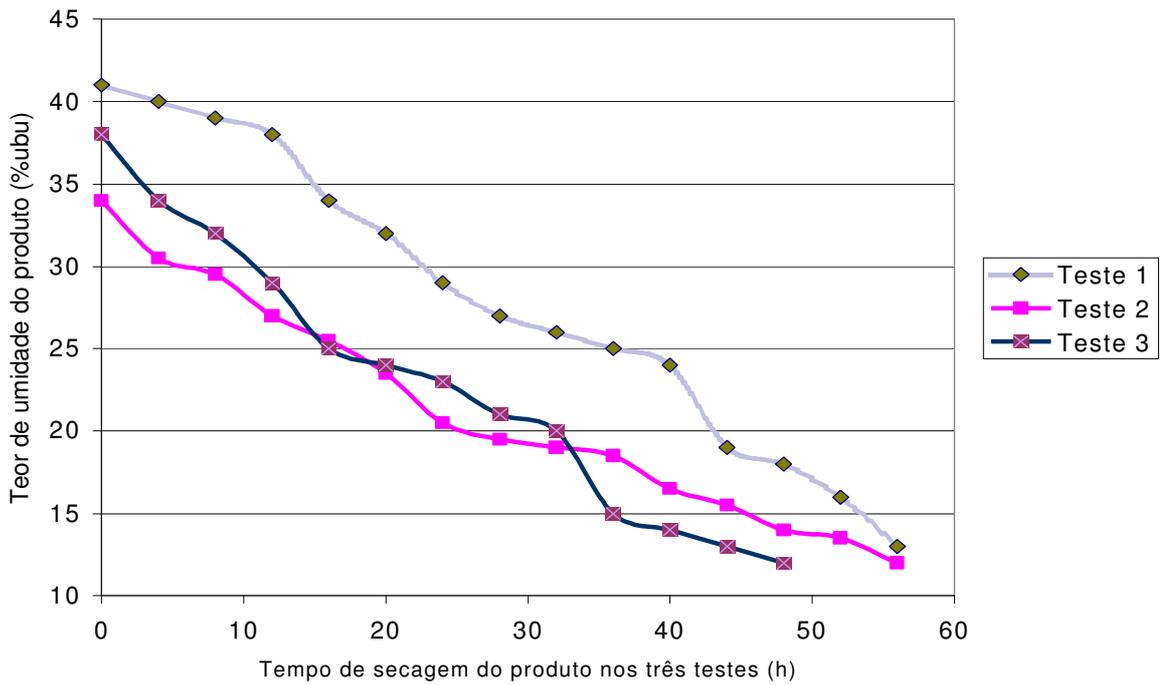


Figura 24 – Curvas de secagem do café para os três testes do tratamento 4.

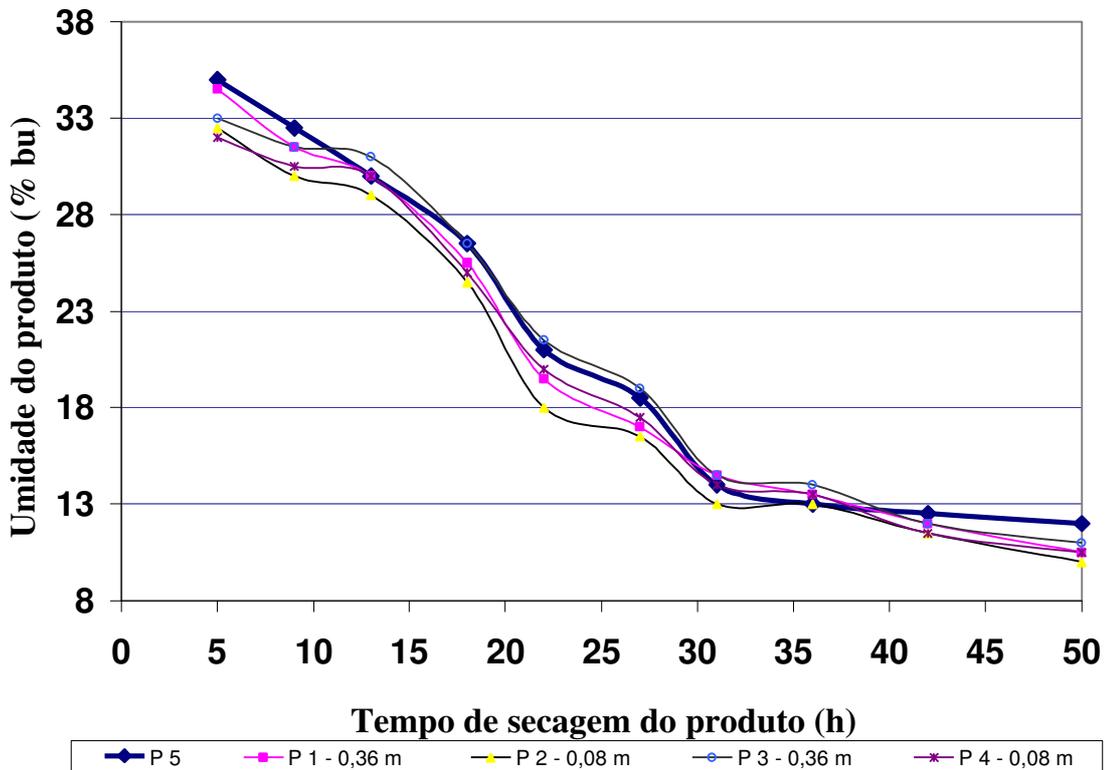


Figura 25 – Variação da umidade do café em função do tempo, na fase complementar de secagem, conforme a localização do produto na coluna de secagem e na câmara de repouso no secador intermitente, de colunas, de fluxos cruzados (teste1-Tratamento1).

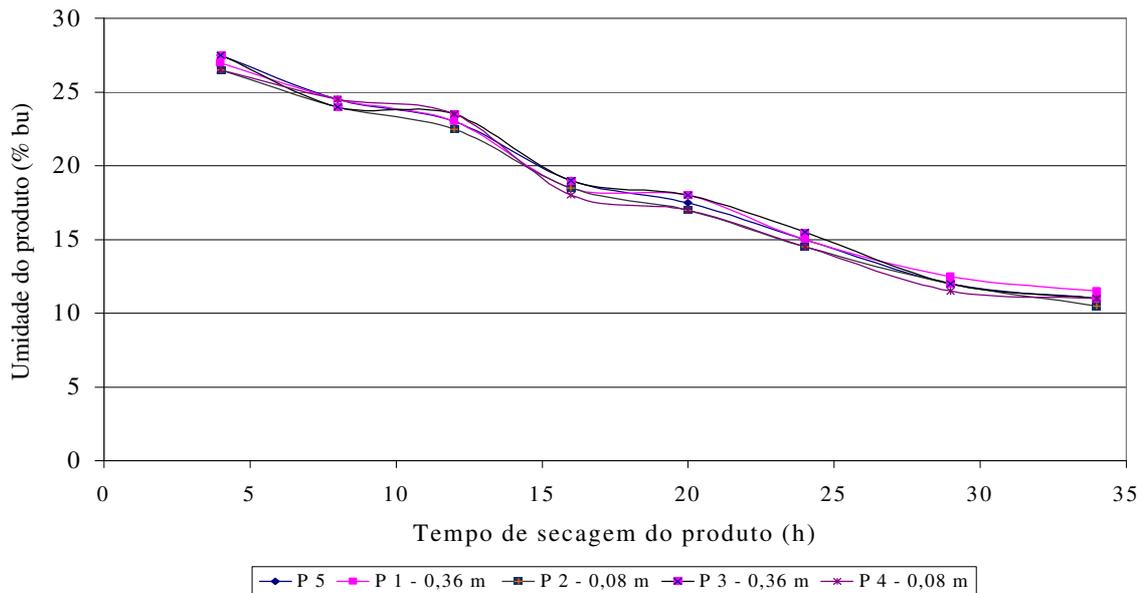


Figura 26 – Variação da umidade do café em função do tempo, na fase complementar de secagem, conforme a localização do produto na coluna de secagem e na câmara de repouso no secador intermitente, de colunas, de fluxos cruzados (teste 2 – Tratamento 2).

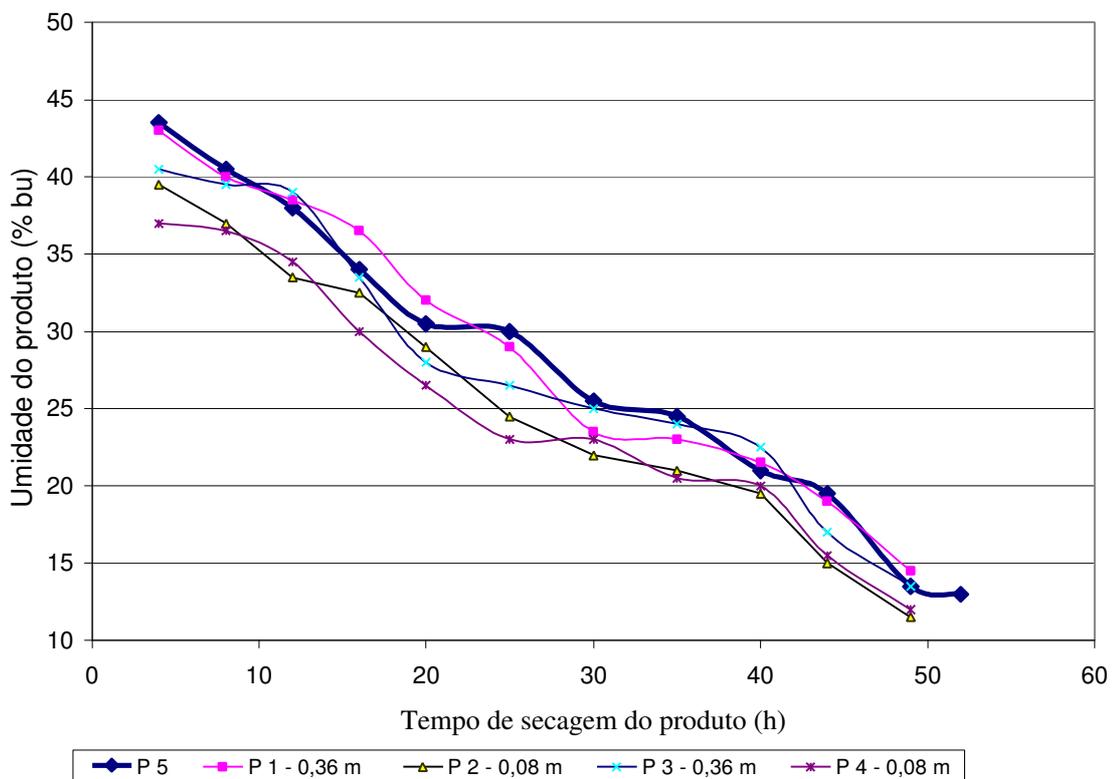


Figura 27 – Variação da umidade do café em função do tempo, na fase complementar de secagem, conforme a localização do produto na coluna de secagem e na câmara de repouso no secador intermitente, de colunas, de fluxos cruzados (teste 1 – Tratamento 3).

4.2.2. Massa específica global

A massa específica aparente ou global de uma massa de grãos é a razão entre sua massa por unidade de volume, incluindo os espaços vazios. É influenciada pela umidade do produto, pela quantidade de produto danificado e pelo índice de impurezas.

Neste experimento, objetivou-se avaliar duas unidades de secagem, nas quais não foi realizada qualquer padronização do produto em relação às suas condições iniciais. Apesar disso, determinou-se a variação da massa específica aparente do produto em função do tempo de secagem e de sua umidade. Verificou-se que houve decréscimo da massa específica aparente do café à medida que ele perdeu umidade (Figuras 28 a 35).

Essas variações estavam associadas à propriedade de o café reduzir seu volume à medida que está sendo secado, porque seus espaços vazios são preenchidos por ar, que é mais leve que a água, levando, conseqüentemente, o produto final a apresentar menor densidade que a inicial.

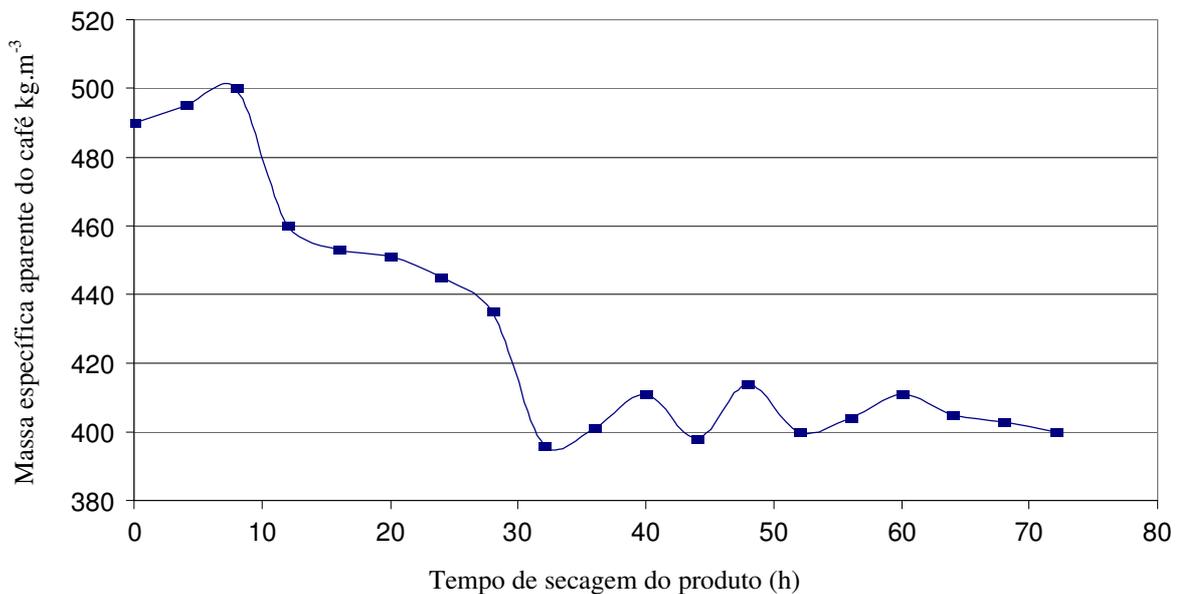


Figura 28 – Resultados experimentais da variação da massa específica aparente em função da umidade dos grãos durante a fase complementar de secagem do teste 1 – Tratamento 1.

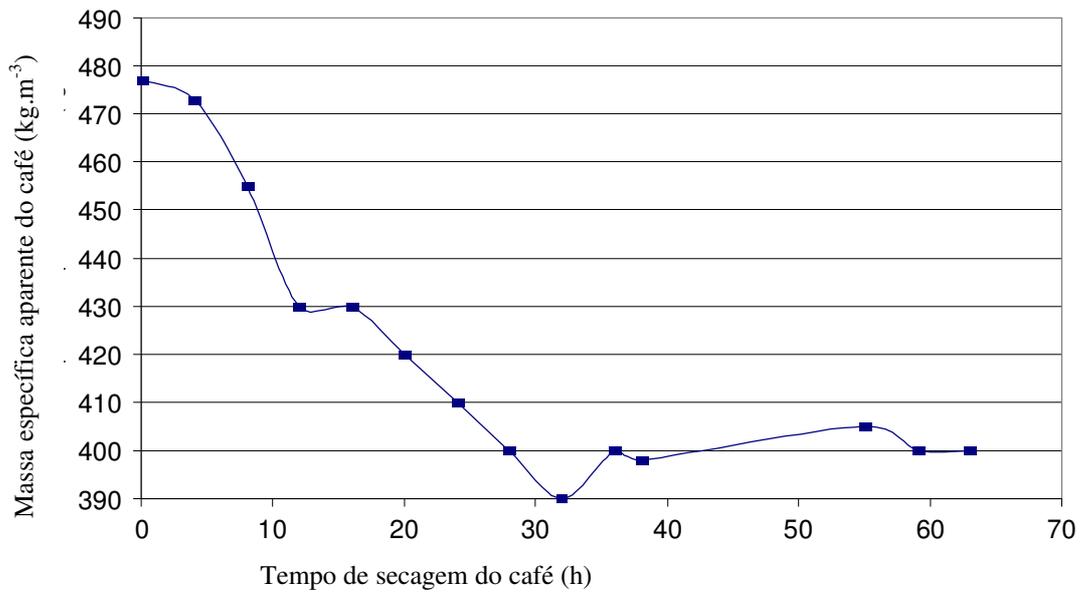


Figura 29 – Resultados experimentais da variação da massa específica aparente em função da umidade dos grãos durante a fase complementar de secagem do teste 2 – Tratamento 2.

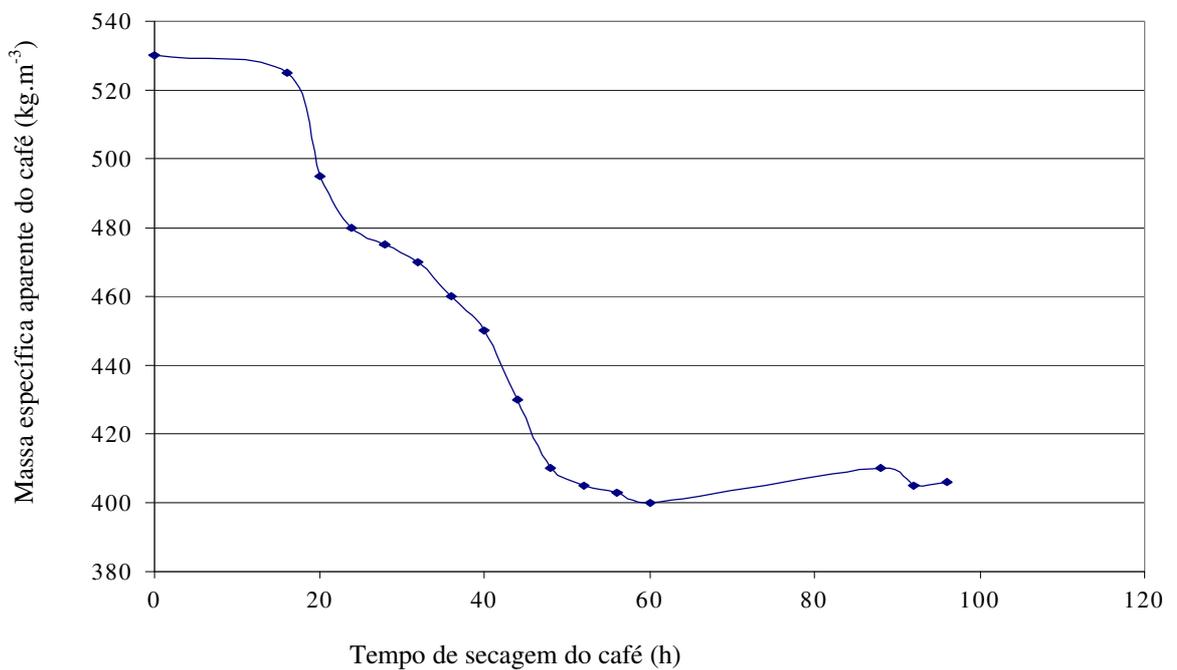


Figura 30 – Variação da massa específica aparente do café em função do tempo de secagem (teste 1 – Tratamento 3).

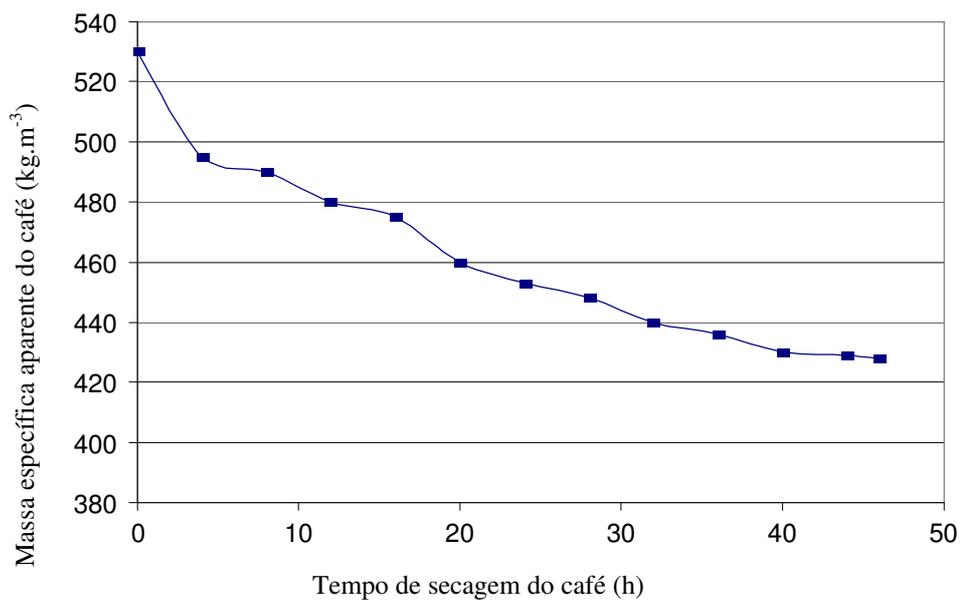


Figura 31 – Massa específica aparente do produto em função do tempo de secagem (teste 1 – Tratamento 4).

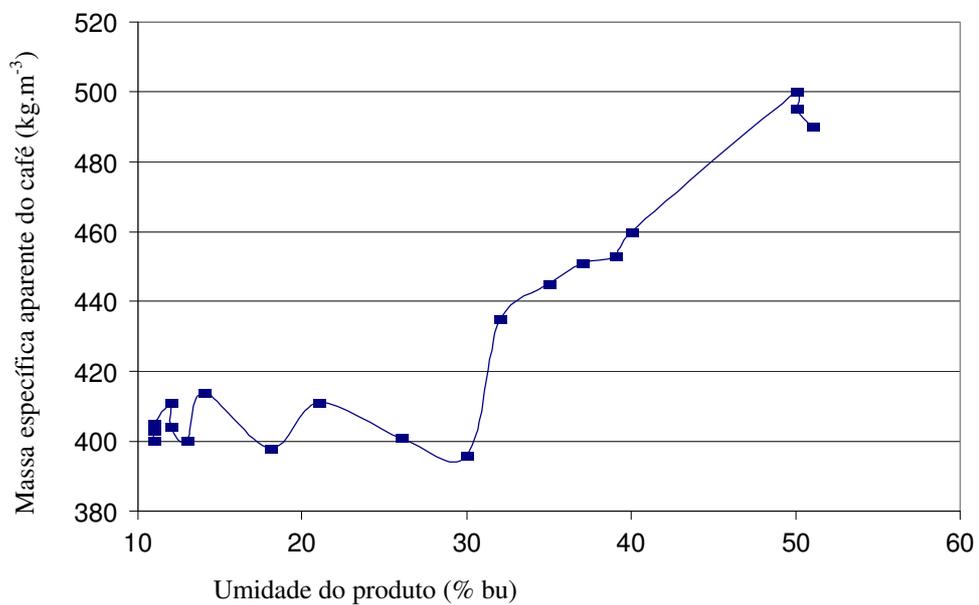


Figura 32 – Massa específica aparente do café em função da umidade dos grãos nas fases de pré-secagem e secagem, durante a realização do teste 1 – Tratamento 1.

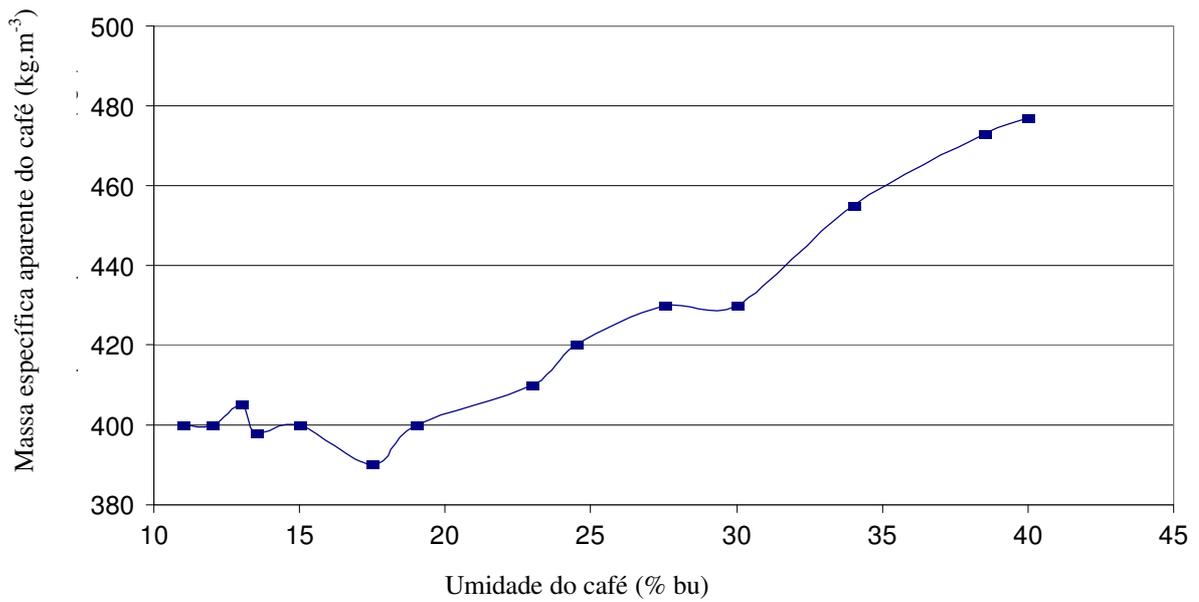


Figura 33 – Massa específica aparente do café em função da umidade dos grãos nas fases de pré-secagem e secagem, durante a realização do teste 2 – Tratamento 2.

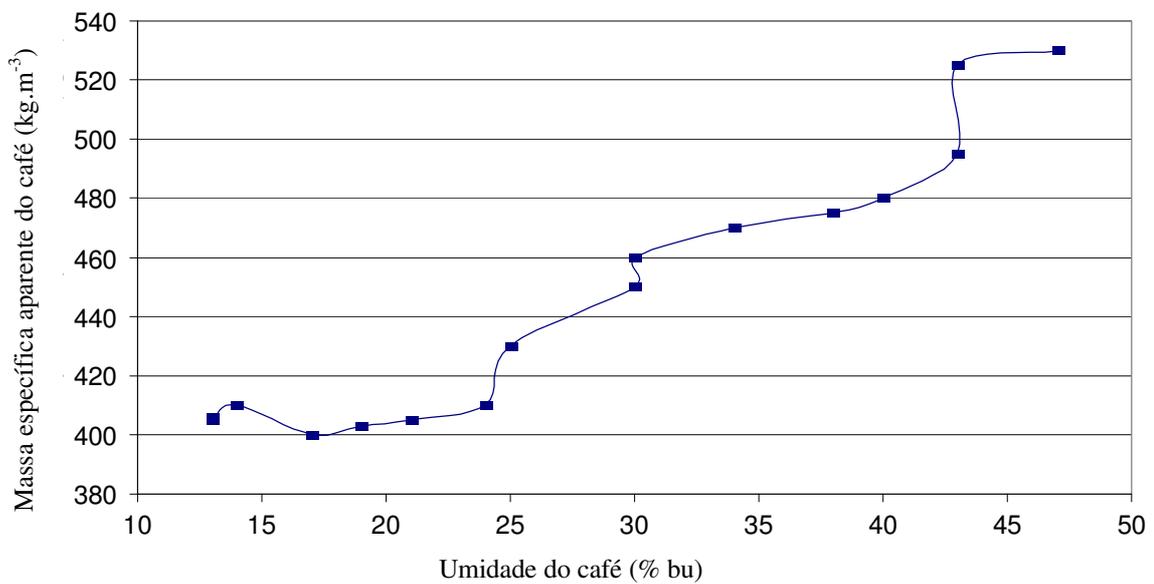


Figura 34 – Massa específica aparente do café em função da umidade dos grãos nas fases de pré-secagem e secagem, durante a realização do teste 1 – Tratamento 3.

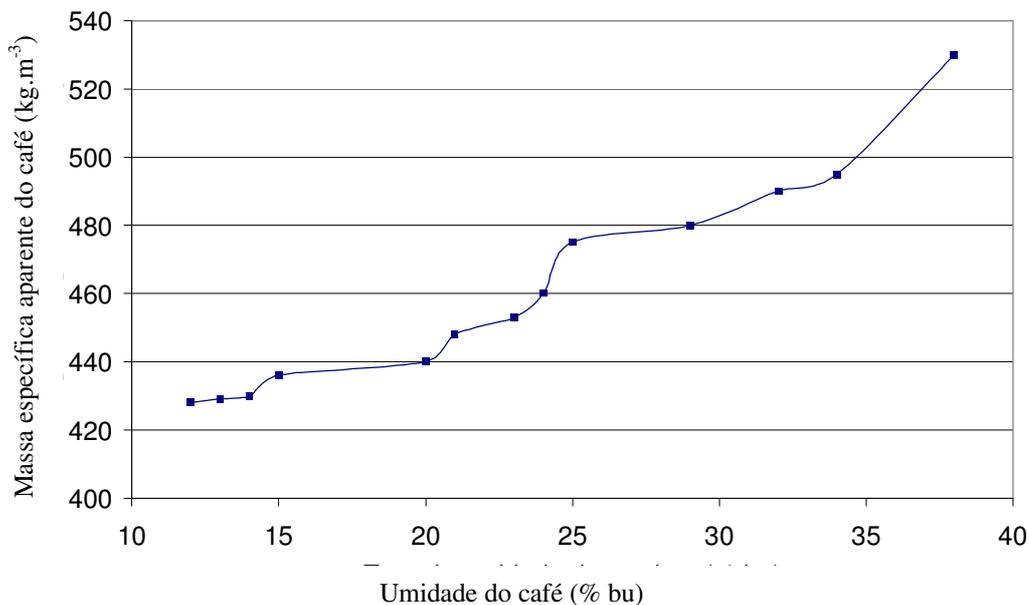


Figura 35 – Massa específica aparente do café em função da umidade dos grãos nas fases de pré-secagem e secagem, durante a realização do teste 1 – Tratamento 4.

4.2.3. Análise da qualidade do produto após a secagem

A qualidade do café depende da origem do produto, procedimentos operacionais de secagem, beneficiamento e armazenamento do produto antes de ser comercializado.

Na Tabela 4, verifica-se que a qualidade final do produto não foi alterada, quer pela secagem no secador horizontal rotativo, quer no secador intermitente, de colunas, de fluxos cruzados. Independente da existência ou não do período de repouso do produto, todos os resultados, dentro de um mesmo tratamento, foram similares entre si e, também, similares à amostra testemunha. Em relação ao aspecto comercial, o produto apresentou boa classificação, visto que o tipo 6 é considerado como referência comercial do Brasil. Verificou-se que a qualidade de bebida e tipo do produto foram alterados durante a realização do experimento. Isto ocorreu porque no tratamento 1 o café estava com a maioria dos frutos na forma de cereja, e ao longo do experimento o produto ficou exposto na lavoura, acarretando perdas na sua qualidade final, conforme verifica-se nos tratamentos 3 e 4, Tabela 4.

Nas análises do produto, não foram detectados odores residuais, oriundos da presença de incombustos (materiais não queimados) ou fumaça no ar de secagem, o que indica que o sistema de aquecimento indireto do ar está bem dimensionado.

A passagem do produto pela tulha de descanso, “repouso”, durante a secagem não proporcionou melhoria na qualidade de bebida do café, conforme mostra a Tabela 4.

Durante o beneficiamento do café seco a unidade misturava os cafés secos oriundos de diferentes glebas. Isto depreciou a qualidade final do produto, pois o café na lavoura, devido às características climáticas da região, não apresentou maturação uniforme.

Tabela 4 – Resultados da análise do tipo e da qualidade da bebida do café

Tratamentos	Secagem Realizada em Secadores			Testemunha	
	Testes	Tipo	Bebida	Tipo	Bebida
Tratamento 1 Queima de lenha em fôrnalha a fogo indireto – sem repouso do produto	1	6	Dura	6	Dura
	2	6	Dura	7	Dura
	3	6	Dura	6	Dura
Tratamento 2 Vapor de água – com repouso do produto	1	6/7	Dura	6	Dura
	2	6	Dura	6	Dura
	3	6	Dura	6	Dura
Tratamento 3 Queima de GLP – com repouso do produto	1	7/8	Dura/riada/rio	7	Dura/riada
	2	7/8	Dura/riada	7	Dura
	3	6/7	Dura/riada/rio	7	Dura/riada
Tratamento 4 Queima de lenha em fôrnalha a fogo indireto – sem repouso do produto	1	7/8	Dura	7	Dura/fermentada
	2	6	Dura/fermentada	6	Dura/riada
	3	7/8	Dura/fermentada	6	Dura/fermentada

4.3. Parâmetros relativos ao combustível

A umidade média da lenha utilizada para aquecer o ar de secagem na fôrnalha a fogo indireto ou no gerador de calor – caldeira foi de $0,282 \pm 0,037$ bs. O seu poder calorífico inferior igual a $14.320,00 \pm 760,00$ kJkg⁻¹. O poder calorífico do gás liquefeito de petróleo foi 47.301,80 kJkg⁻¹.

O consumo médio de lenha por secador ligado à caldeira foi igual a 46 quilogramas por hora; na fôrnalhas a fogo indireto (ar-ar) acopladas à secadores com as mesmas características foi de 49,5 quilogramas por hora. Esperava-se menor consumo de combustível na operação em que o ar era aquecido por vapor gerado na caldeira; uma vez que o consumo médio desta foi de 1 m cúbico de lenha por hora nos 20 secadores que estavam a ela ligados. Entretanto, devido a problemas operacionais relacionados ao sistema, somente 60% dos secadores estavam em funcionamento durante a coleta de dados, determinando, com isso maior consumo médio de combustível em cada secador.

As fornalhas a fogo indireto, com trocador de calor ar/ar, operaram com o registro de abastecimento de combustível aberto. Este procedimento permitiu que o sistema trabalhasse com excesso de ar de combustão acima do limite, reduzindo a temperatura do sistema, consumindo mais combustível e piorando a qualidade da queima, conforme a Figura 36.



Figura 36 – Vista frontal da combustão da lenha de eucalipto na fornalha a fogo indireto.

Em cada trocador de calor acoplado ao secador a vazão era de 200 kg vapor de vapor por hora. Foram aquecidos 6150 kg de ar por hora da temperatura de $22,5 \pm 3$ °C até a 60 °C.

O consumo de GLP variou entre 5,5 e 7,91 quilogramas por hora. A variação no consumo foi associado a problemas relativos ao uso do queimador, porque no teste 2 do tratamento 3 o controle automático foi danificado, continuando-se a secagem com o queimador regulado manualmente, fato que, possivelmente, contribuiu para o maior consumo desse combustível. Nos testes 1 e 3, tratamento 3, o equipamento não apresentou problemas, determinando-se o consumo de 6,61 quilogramas por hora no teste 1 e de 5,5 quilogramas por hora no teste 3, Tabela 5.

Tabela 5 – Consumo de combustível, em quilogramas por hora, nos tratamentos, nos secadores horizontais (H) e intermitente, de colunas, de fluxos cruzados (V)

Forma de aquecimento do ar de secagem	Teste 1		Teste 2		Teste 3	
	H	V	H	V	H	V
Tratamento 1 Queima de lenha em fonalha a fogo indireto	48,2	48,1	49,5	48,6	49,3	48,6
Tratamento 2 Vapor de água	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0	46,0
Tratamento 3 Queima de GLP		6,61		7,91		5,5
Tratamento 4 Queima de lenha em fonalha a fogo indireto	49,3		48,0		49,0	

4.4. Avaliação dos sistemas de secagem

Verifica-se, nas Tabelas de 7 a 10, que os parâmetros associados ao produto, ar ambiente e de secagem, do secador e da energia apresentaram variações de um teste para outro, e conseqüentemente ocorreram consumos específicos de energia variados.

Durante a secagem no secador horizontal observou-se que café com umidades elevadas requer menos energia para evaporar uma unidade de massa de água, ou seja, os secadores são mais eficientes, em termos de consumo específico de energia.

Na operação realizada em secador intermitente, de colunas, de fluxos cruzados observou-se a tendência de que nos testes em que a redução da umidade do café foi menor o consumo específico de energia foi maior (Figuras 36, 37, 38 e 39). Isso evidencia que o desempenho do equipamento foi inferior àquele apresentado pelo secador horizontal, porque na operação realizada no secador vertical a umidade inicial do café era inferior (Tabelas 7, 8, 9 e 10).

Na tabela 6, mostra-se o consumo horário médio estimado de combustível caso estivessem funcionando um número diferente de secadores, sendo considerado o consumo médio da caldeira de 540 kg.h^{-1} , o que correspondeu a 1 m^3 de lenha, segundo as condições em que o experimento foi realizado.

Tabela 6 – Estimativa do consumo de combustível por secador ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)(tratamento 2)

N. secadores funcionando	13	14	15	16	17	18	19	20
Consumo médio/secador	41,00	38,00	36,00	34,00	32,00	30,00	28,00	27,00

Verifica-se na Tabela 6 que o consumo médio de combustível por secador diminuía à medida que aumentava o número de secadores em funcionamento. O ideal seria que a caldeira trabalhasse na sua capacidade plena, fornecendo energia para os secadores em funcionamento, o que levaria a uma melhor eficiência do sistema.

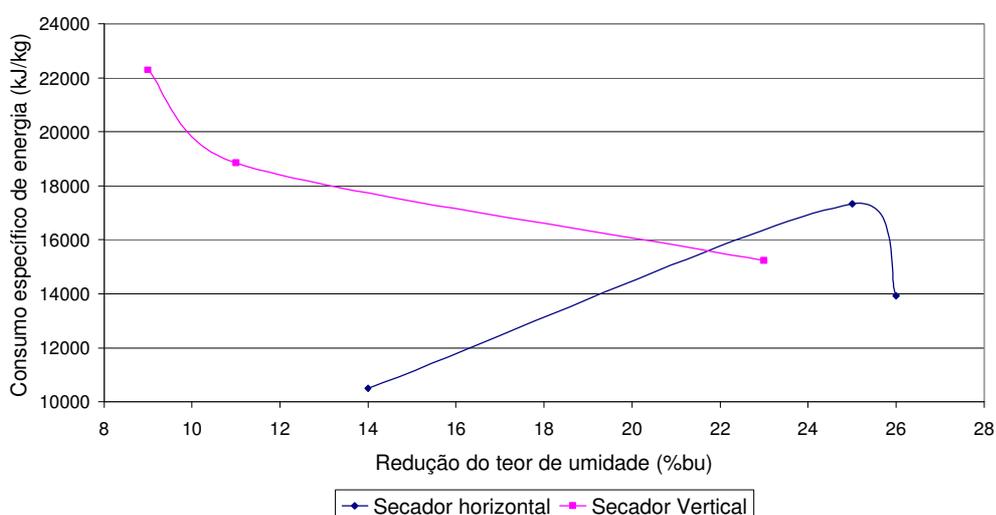


Figura 36 – Consumo específico de energia em função da redução do teor de umidade do produto – Tratamento 1.

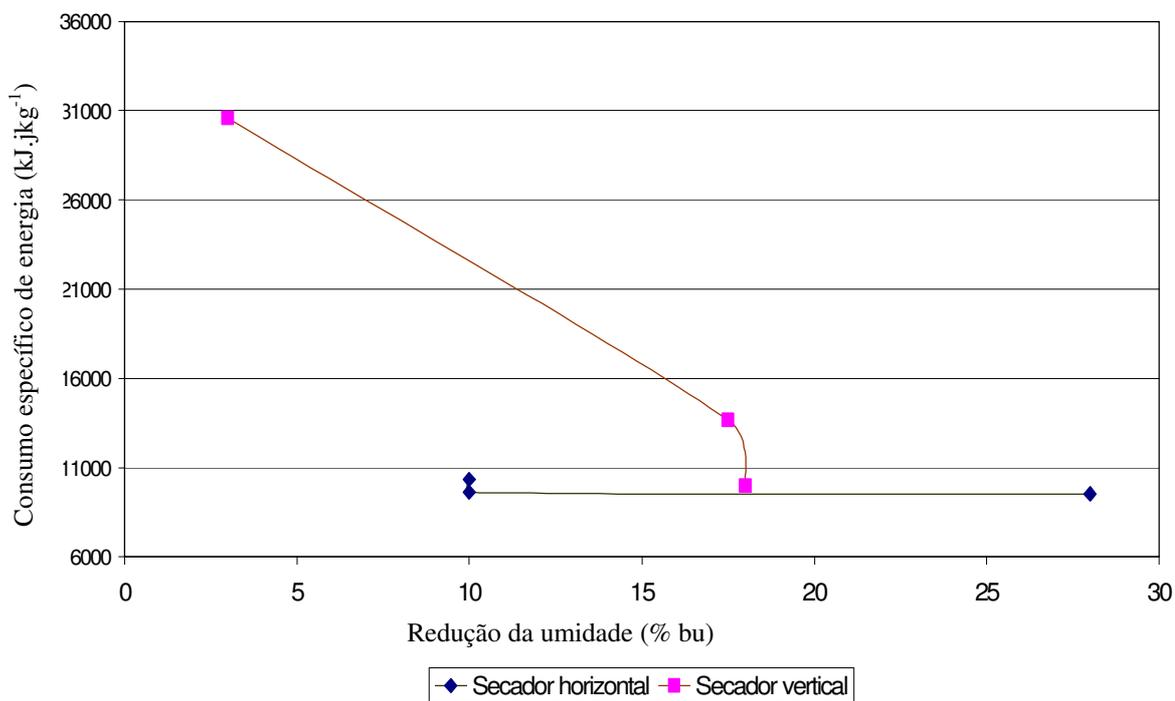


Figura 37 – Consumo específico de energia em função da redução da umidade do produto – Tratamento 2.

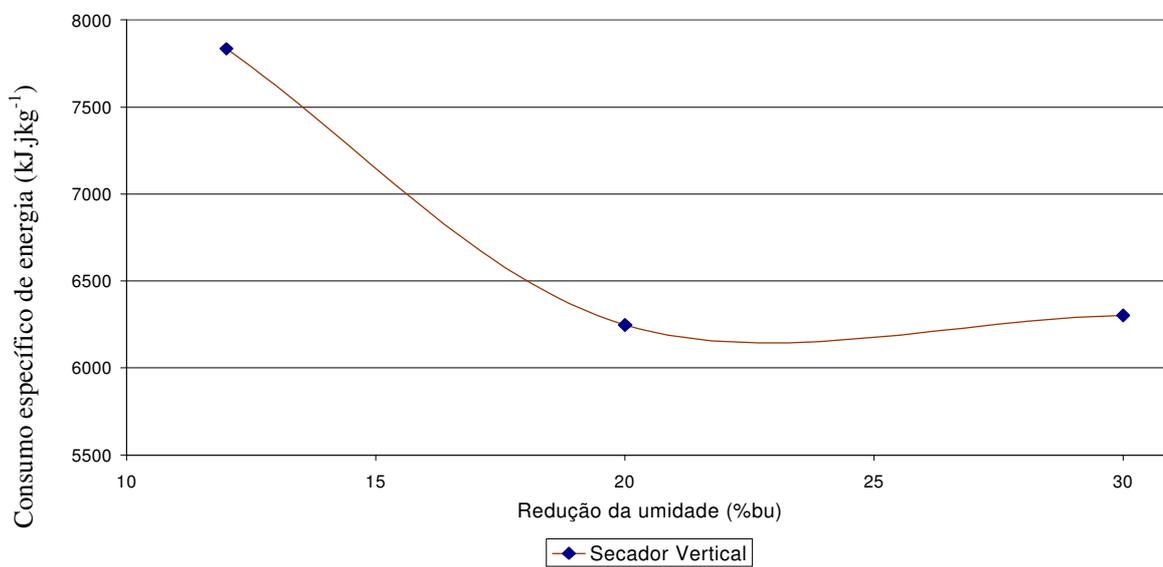


Figura 38 – Consumo específico de energia em função da redução de umidade do produto – Tratamento 3.

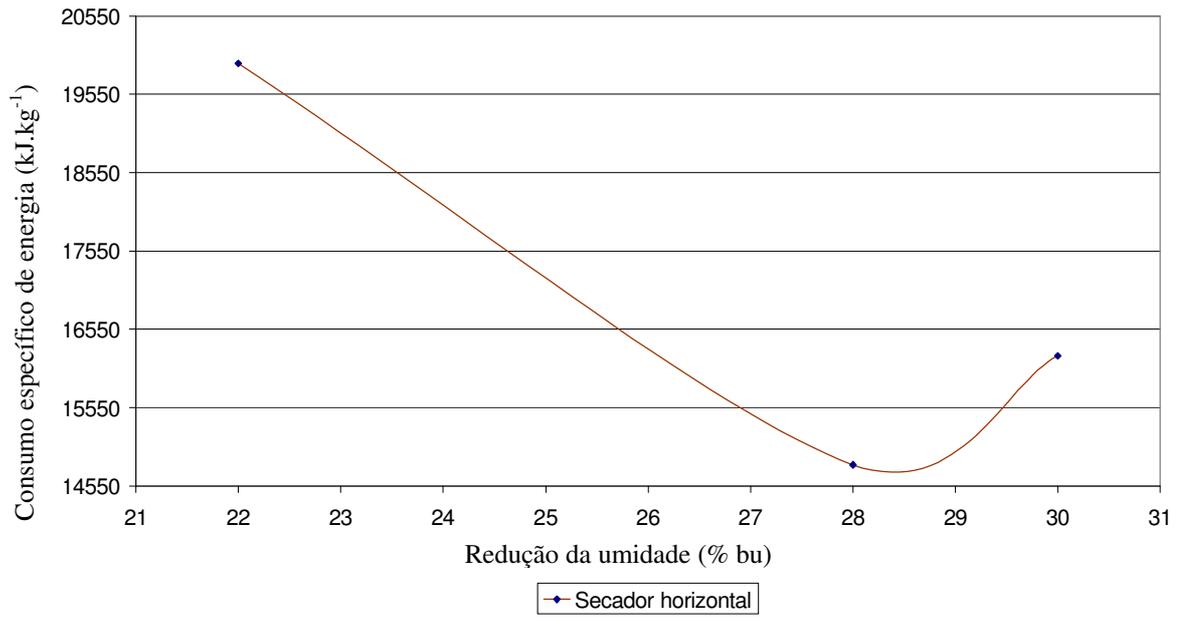


Figura 39 – Consumo específico de energia em função da redução do teor de umidade do produto – Tratamento 4.

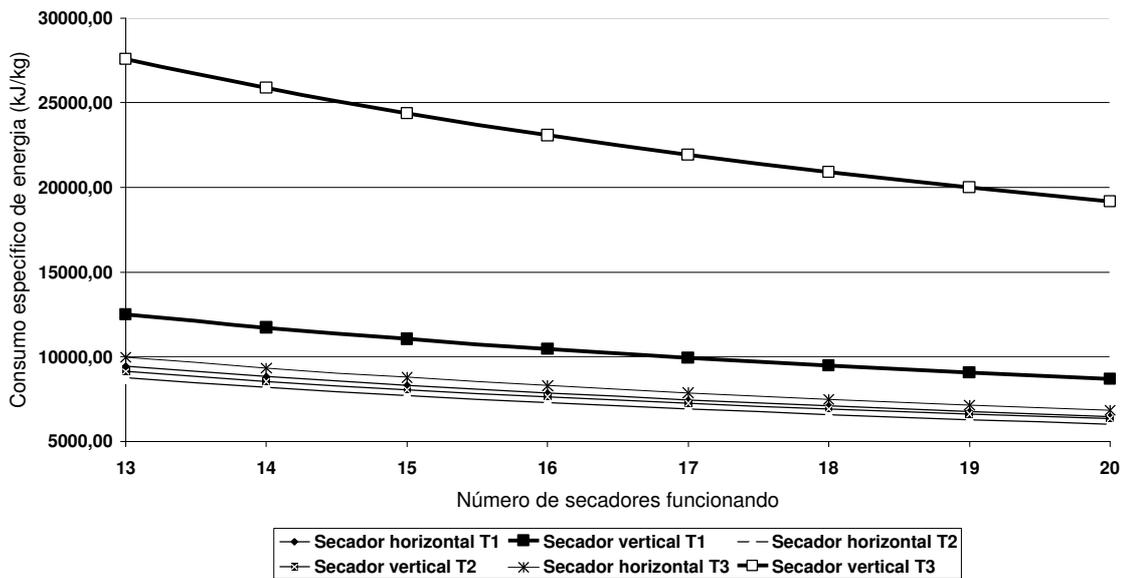


Figura 40 – Variação do consumo específico de energia em função do número de secadores em funcionamento.

Na Figura 40, pode-se verificar que aumentando o número de secadores em funcionamento para o sistema cujo aquecimento é feito com vapor, o consumo específico de energia diminui, o que proporcionará aumento da quantidade de produto secado e, conseqüentemente, queda no custo de produção.

A Figura 41 apresenta o custo de secagem e consumo de custo de operação, conforme o tipo de aquecimento do ar de secagem. Na Tabela 9, verifica-se que o GLP apresentou menor consumo específico de energia, 6.247,7 kJkg⁻¹ de água evaporada. Apesar de mais eficiente a operação com GLP foi mais onerosa que as demais, custando R\$17,78 o saco de 60 quilos de café seco e beneficiado. Na secagem em que o vapor de água gerado na caldeira foi utilizado para aquecer o ar de secagem, o consumo específico de energia foi de 12.416,65 kJkg⁻¹ de água vaporada e custo de secagem de R\$13,66 o saco de 60 quilos de café seco e beneficiado considerando que o sistema a vapor trabalhou com 12 secadores em funcionamento (horizontal + vertical). Quando o ar ambiente foi aquecido pela queima de lenha de eucalipto numa fôrnelha a fogo indireto o consumo de energia foi de 13.434,01 kJkg⁻¹ de água evaporada e custo de R\$8,46 o saco de 60 quilos do produto beneficiado. Diante destes resultados constata-se que apesar da secagem em que o GLP foi utilizado como combustível ter sido mais eficiente, do ponto de vista da energia, o custo de

produção foi superior aos demais. Cerca de 110% em relação à fornalha a fogo indireto e 30,13% maior que o apresentado quando o ar de secagem foi aquecido pelo vapor de água.

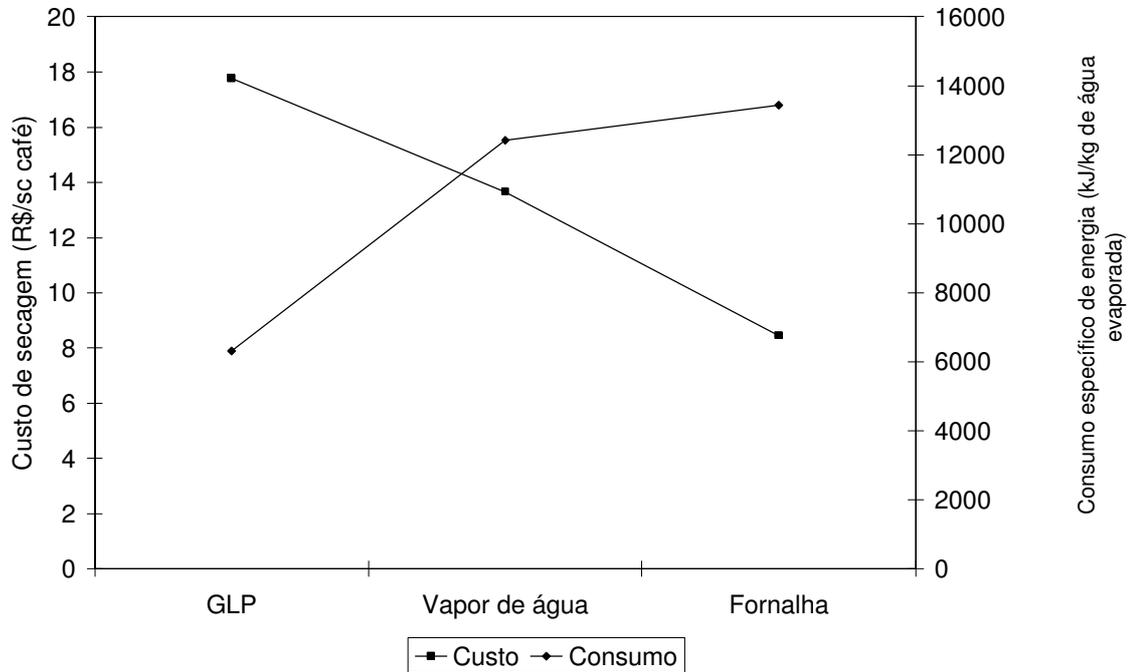


Figura 42 – Variação do custo de secagem e consumo específico de energia para o aquecimento do ar de secagem pela queima de GLP, vapor de água e queima de lenha de eucalipto numa fornalha a fogo indireto.

Tabela 7 – Resultados observados experimentalmente nos três testes referentes ao tratamento 1, no secador rotativo (H) e no secador intermitente, de colunas de fluxos cruzados (V)

Parâmetros	Teste 1		Teste 2		Teste 3	
	H	V	H	V	H	V
1) Do produto						
Teor de umidade inicial, % bu	51,0	35,0	46,0	21,0	49,0	23,0
Teor de umidade final, % bu	37,0	12,0	21,0	12,0	23,0	12,0
Temperatura inicial, °C	22,0	21,7	21,4	22,0	22,0	20,5
Temperatura final, °C	30,0	38,0	37,0	38,8	35,2	38,9
Massa específica aparente inicial, kg.m ⁻³	490,0	450,0	500,0	470,0	490,0	420,0
Massa específica aparente final, kg.m ⁻³	450,0	405,0	470,0	420,0	420,0	410,0
Massa inicial, kg	6.370,0	9.600,0	6.500,0	8.886,0	6.890,0	9.087,3
Massa final, kg	4.954,0	7.090,1	4.443,0	7.977,2	4.543,6	7.951,4
2) Do ar						
Temperatura de secagem, °C	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
Temperatura ambiente, °C	21,0	21,4	20,5	21,3	20,5	20,0
Umidade relativa ambiente, %	74,7	74,3	70,8	71,5	77,2	78,7
3) Do secador						
Fluxo de ar, m ³ .min ⁻¹ .m ⁻²	17,0	9,5	17,0	9,5	17,0	9,5
Espessura da camada, m	0,6	0,44	0,6	0,44	0,6	0,44
Área de secagem, m ²	5,0	9,0	5,0	9,0	5,0	9,0
Pressão estática, mmca	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0
4) De energia						
Tipo de combustível	Lenha/FI	Lenha/FI	Lenha/FI	Lenha/FI	Lenha/FI	Lenha/FI
Massa de combustível, kg	960,0	2.400,0	2.304,5	1.272,0	2.112,0	1.344,0
Poder calorífico inferior, kJ.kg ⁻¹	14.348,1	14.348,1	14.348,1	14.348,1	14.348,1	14.348,1
Energia elétrica, kWh	300	1050	720	556,5	660,0	588,0
5) Do desempenho						
Duração do teste, h	20,0	50,0	48,0	26,5	44,0	28,0
Redução de umidade, % bu	14,0	23,0	25,0	9,0	26,0	11,0
Eficiência energética, kJ.kg ⁻¹ :						
com energia elétrica	10.490,2	15.225,9	17.334,5	22.286,7	13.927,4	18.840,3
sem energia elétrica	9.727,5	13.719,9	16.074,5	20.082,3	12.914,8	16.976,8

Tabela 8 – Resultados observados experimentalmente nos três testes referentes ao tratamento 2, no secador rotativo (H) e no secador intermitente, de colunas, de fluxos cruzados (V)

Parâmetros	Teste 1		Teste 2		Teste 3	
	H	V	H	V	H	V
1) Do produto						
Teor de umidade inicial, % bu	40,5	30,5	40,0	29,0	42,0	14,0
Teor de umidade final, % bu	30,5	13,0	30,0	11,0	14,0	11,0
Temperatura inicial, °C	22,0	29,0	23,0	35,0	22,1	36,2
Temperatura final, °C	28,0	36,5	30,0	37,0	35,2	37,8
Massa específica aparente inicial, kg.m ⁻³	475,0	430,0	475,0	430,0	550,0	420,0
Massa específica aparente final, kg.m ⁻³	430,0	415,0	430,0	408,0	420,0	400,0
Massa inicial, kg	6.175,0	9.460,0	6.650,0	11.386,3	7.150,0	9.160,0
Massa final, kg	5.286,5	7.557,9	5.693,1	8.700,0	4.580,0	8.851,0
2) Do ar						
Temperatura de secagem, °C	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0	60,0
Temperatura ambiente, °C	21,3	20,8	22,0	21,1	20,0	21,4
Umidade relativa ambiente, %	70,3	73,1	72,0	71,2	70,9	72,0
3) Do secador						
Fluxo de ar, m ³ .min ⁻¹ .m ⁻²	17,0	9,5	17,0	9,5	17,0	9,5
Espessura da camada, m	0,6	0,44	0,6	0,44	0,6	0,44
Área de secagem, m ²	5,0	9,0	5,0	9,0	5,0	9,0
Pressão estática, mmca	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0
4) De energia						
Tipo de combustível	Lenha/V P	Lenha/VP	Lenha/VP	Lenha/V P	Lenha/V P	Lenha/V P
Massa de combustível, kg	552,0	1518,0	552,0	1.564,0	1.472,0	552,0
Poder calorífico inferior, kJ.kg ⁻¹	15.085,6	15.085,6	15.085,6	15.085,6	15.085,6	15.085,6
Energia elétrica, kWh	240	858	240,0	884,0	640,0	312,0
5) Do desempenho						
Duração do teste, h	12,0	33,0	12,0	34,0	32,0	12,0
Redução de umidade, % bu	10,0	17,5	10,0	18,0	28,0	3,0
Eficiência energética, kJ.kg ⁻¹ :						
com energia elétrica	10.344,7	13.662,2	9.605,2	9.967,6	9.537,0	30.583,9
sem energia elétrica	9.372,3	12.039,3	8.702,3	8.783,0	8.640,5	26.949,0

Tabela 9 – Resultados observados experimentalmente nos três testes referentes ao tratamento 3, no secador intermitente, de colunas, de fluxos cruzados (V)

Parâmetros	Teste 1	Teste 2	Teste 3
	Secador vertical	Secador vertical	Secador vertical
1) Do produto			
Teor de umidade inicial, % bu	43,0	25,0	32,0
Teor de umidade final, % bu	13,0	13,0	12,0
Temperatura inicial, °C	23,1	28,2	32,3
Temperatura final, °C	38,0	37,0	36,9
Massa específica aparente inicial, kg.m ⁻³	530,0	425,0	468,0
Massa específica aparente final, kg.m ⁻³	405,0	410,0	410,0
Massa inicial, kg	9.561,7	8.627,5	9.965,1
Massa final, kg	6.210,9	7.193,9	7.700,0
2) Do ar			
Temperatura de secagem, °C	60,0	60,0	60,0
Temperatura ambiente, °C	20,3	24,1	25,0
Umidade relativa ambiente, %	71,3	69,3	68,7
3) Do secador			
Fluxo de ar, m ³ .min ⁻¹ .m ⁻²	9,5	9,5	9,5
Espessura da camada, m	0,44	0,44	0,44
Área de secagem, m ²	9,0	9,0	9,0
Pressão estática, mmca	75,0	75,0	75,0
4) De energia			
Tipo de combustível	GLP	GLP	GLP
Massa de combustível, kg	344,0	190,0	220,0
Poder calorífico inferior, kJ.kg ⁻¹	47.301,8	47.301,8	47.301,8
Energia elétrica, kWh	1.352,0	624,0	1.040,0
5) Do desempenho			
Duração do teste, h	52,0	24,0	40,0
Redução de umidade, % bu	30,0	12,0	20,0
Eficiência energética, kJ.kg ⁻¹ :			
com energia elétrica	6.302,2	7.835,9	6.247,7
sem energia elétrica	4.855,8	6.269,0	4.594,8

Tabela 10 – Resultados observados experimentalmente nos três testes referentes ao tratamento 4, no secador rotativo horizontal (H)

Parâmetros	Teste 1	Teste 2	Teste 3
	Secador horizontal	Secador horizontal	Secador horizontal
1) Do produto			
Teor de umidade inicial, % bu	39,0	41,0	34,0
Teor de umidade final, % bu	11,0	11,0	12,0
Temperatura inicial, °C	30,3	32,1	33,8
Temperatura final, °C	50,1	48,5	50,1
Massa específica aparente inicial, kg.m ⁻³	530,0	525,0	520,0
Massa específica aparente final, kg.m ⁻³	428,0	420,0	420,0
Massa inicial, kg	6.890,0	6.825,0	6.760,0
Massa final, kg	4.722,0	4.474,0	5.265,0
2) Do ar			
Temperatura de secagem, °C	60,0	60,0	60,0
Temperatura ambiente, °C	23,0	21,0	21,0
Umidade relativa ambiente, %	69,7	89,9	91,9
3) Do secador			
Fluxo de ar, m ³ .min ⁻¹ .m ⁻²	17,0	17,0	17,0
Espessura da camada, m	0,6	0,6	0,6
Área de secagem, m ²	5,0	5,0	5,0
Pressão estática, mmca	75,0	75,0	75,0
4) De energia			
Tipo de combustível	Lenha/FI	Lenha/FI	Lenha/FI
Massa de combustível, kg	2.269,0	2.690,0	2.108,0
Poder calorífico inferior, kJ.kg ⁻¹	13.044,4	13.044,4	13.044,4
Energia elétrica, kWh	690	840	645,0
5) Do desempenho			
Duração do teste, h	46,0	56,0	43,0
Redução de umidade, % bu	28,0	30,0	22,0
Eficiência energética, kJ.kg ⁻¹ :			
com energia elétrica	14.817,8	16.211,5	19.946,0
sem energia elétrica	13.652,0	14.925,3	18.393,0

4.5. Parâmetros relativos à avaliação econômica das unidades de secagem

Nas Tabelas de 11 a 17, têm-se os parâmetros econômicos obtidos na Fazenda Barracão, em Martins Soares, MG e na Fazenda Progresso, no município de Iúna, ES. A renda bruta total, segundo o item 2.14, da Fazenda Barracão, foi igual a R\$462.000,00 e a da Fazenda Progresso, de R\$330.000,00. A determinação do custo total foi realizada com os dados apresentados nas Tabelas 11, 12 e 13. Ao preço da mão-de-obra foram

acrescentados 72%, relacionados a encargos sociais decorridos durante as operações de secagem.

Tabela 11 – Valores utilizados no cálculo das estimativas de custo de produção nas unidades de secagem de Martins Soares-MG e Laranja da Terra, ES

Variáveis	Local do ensaio		
	Martins Soares, MG		Laranja da Terra, ES
	Vapor de água	GLP	Fornalha a fogo indireto
1. Temperatura, °C			
- Ambiente	20,1	23,3	20,8
- Secagem	60,0	60,0	60,0
2. UR ambiente, %	71,6	69,7	74,5
3. PCI do comb. kJ.kg ⁻¹	15.085,6	47.301,8	14.348,1
4. Vazão de ar			
- Volumétrica, m ³ .h ⁻¹	5.100,0	5.100,0	5.100,0
- Mássica, kg.h ⁻¹	6.150,0	6.150,0	6.150,0
5. Área de secagem, m ²			
- Secador horizontal	5,0	-	5,0
- Secador vertical	9,0	9,0	9,0
6. Espessura da camada, m			
- Secador horizontal	0,8	-	0,8
- Secador vertical	0,43	0,43	0,43
7. Pot. do ventilador, kW			
- Secador horizontal	20	-	15
- Secador vertical	26	20	21
8. Preços			
- Lenha de eucalipto, R\$.m ⁻³	15,0	-	15,0
- GLP, R\$.kg ⁻¹	-	0,96	-
- Mão-de-obra, R\$.h ⁻¹	12,0	6,0	12,0
9. Duração do teste, h	45,0	38,0	70,0

Na Tabela 12, tem-se o demonstrativo dos investimentos. O sistema da Fazenda Barracão em Martins Soares, MG possuía oito secadores horizontais e 12 intermitentes, de coluna e de fluxos cruzados. No levantamento de preços dos secadores, desconsiderou-se a fornalha, e cada secador teve o seu preço estimado em R\$18.000,00; tanto no sistema em que o ar de secagem era aquecido com vapor de água quanto no aquecido com gás liquefeito de petróleo. O sistema de secagem da Fazenda Progresso, no distrito de Laranja,

município de Iúna, ES, possuía cinco secadores horizontais e intermitentes, de coluna e de fluxos cruzados. Nos sistemas equipados com fornalha a lenha, em razão da fornalha, considerou-se o preço de cada secador igual a R\$22.000,00. Naquelas em que se estimaram os parâmetros econômicos, caso todas as fornalhas fossem substituídas por queimadores a gás, desconsiderou-se o preço delas, e cada secador teve o seu preço estimado em R\$18.000,00. O preço de cada queimador, segundo as condições de mercado, foi de R\$2.500,00.

Na Tabela 13, têm-se os valores gastos anualmente em combustíveis, eletricidade, manutenção e mão-de-obra nas duas unidades de secagem. Para obtenção desses valores, considerou-se o custo por saco de 60 quilos de produto seco (Tabela 19) multiplicado pela quantidade produzida anualmente em cada unidade de secagem. A produção média estimada para a unidade de Martins Soares foi de 35.000 sacas de 60 quilos de café beneficiado e para a de Iúna, de 25.000 sacas.

Conforme descrito no item 2.13., nas Tabelas 14, 15, 16 e 17 são apresentados os fluxos de caixa das duas unidades de secagem estudadas. Nas Tabelas 14 e 16, em que se estudou a unidade em operação tradicional, sem a opção do gás, os fluxos de caixa exibiram valor negativo no ano 0 (ano de investimentos) e positivo e constante em todos os anos do horizonte de planejamento. Nas Tabelas 15 e 17, verifica-se que o fluxo foi negativo em todo o horizonte de planejamento, razão pela qual não se calcularam os parâmetros de rentabilidade com base na teoria de investimentos, sendo os demais itens calculados, (Tabela 19).

Na Tabela 19, tem-se o fluxo de caixa incremental, em que foram consideradas somente aquelas situações nos quais o fluxo de caixa apresentou valor positivo a partir do ano 1 (Tabelas 14 e 16).

Tabela 12 – Demonstrativo dos investimentos nos sistemas de secagem instalados em Martins Soares e Laranja da Terra

INVESTIMENTOS (R\$)							
MARTINS SOARES – MG	Caldeira	Secador horizontal	Secador vertical	Elevadores e fitas	Tulhas	Barracão	Total
Vapor de água	126.000,00	144.000,00	216.000,00	50.000,00	100.000,00	100.000,00	736.000,00
Queima de GLP	Queimador de gás	Secador horizontal	Secador vertical	Elevadores e fitas	Tulhas	Barracão	Total
	50.000,00	144.000,00	216.000,00	50.000,00	100.000,00	100.000,00	660.000,00
LARANJA DA TERRA – IUNA-ES							
		Secador horizontal	Secador vertical	Elevadores e fitas	Tulhas	Barracão	Total
Queima de Lenha		110.000,00	110.000,00	50.000,00	50.000,00	80.000,00	400.000,00
Queima de GLP	Queimador de gás	Secador horizontal	Secador vertical	Elevadores e fitas	Tulhas	Barracão	
	25.000,00	90.000,00	90.000,00	50.000,00	50.000,00	80.000,00	385.000,00

Tabela 13 – Despesas financeiras com as operações dos sistemas de secagens instalados em Martins Soares e em Laranja da Terra

Despesas (R\$.ano ⁻¹)	Martins Soares lenha e Vapor	Martins Soares GLP	Laranja da Terra Lenha e fornalha FI	Laranja da Terra-GLP
Combustível	45.850,00	515.550,00	32.750,00	368.250,00
Eletricidade	68.250,00	68.250,00	48.750,00	48.750,00
Manutenção	58.800,00	25.440,00	30.500,00	15.000,00
Mão-de-obra	7.000,00	3.500,00	7.750,00	3.850,00
Total	179.900,00	612.740,00	119.750,00	435.875,00

Tabela 14 – Fluxo de caixa da Fazenda Barracão, Martins Soares – Ar de secagem aquecido com vapor de água

Descrição	Ano 0	Ano 1	Ano 2	...	Ano 20
Entradas					
Investimentos fixos	736.000,00				
Despesas de operação	-	179.900,00	179.900,00	....	179.900,00
Saídas					
Receitas	-	462.000,00	462.000,00	....	462.000,00
Fluxo	-736.000,00	282.100,00	282.100,00	....	282.100,00

Tabela 15 – Fluxos de caixa da Fazenda Barracão, Martins Soares – Ar de secagem aquecido com gás liquefeito de petróleo

Descrição	Ano 0	Ano 1	Ano 2	...	Ano 20
Entradas					
Investimentos fixos	660.000,00				
Despesas de operação	-	612.740,00	612.740,00	....	612.740,00
Saídas					
Receitas	-	462.000,00	462.000,00	....	462.000,00
Fluxo	- 660.000,00	-150.740,00	-150.740,00	....	-150.740,00

Tabela 16 – Fluxos de caixa da Fazenda Progresso, Iuna – Ar de secagem aquecido pela queima da lenha de eucalipto numa fornalha a fogo indireto

Descrição	Ano 0	Ano 1	Ano 2	...	Ano 20
Entradas					
Investimentos fixos	400.000,00				
Despesas de operação	-	119.750,00	119.750,00	....	119.750,00
Saídas					
Receitas	-	330.000,00	330.000,00	....	330.000,00
Fluxo	-400.000,00	210.250,00	210.250,00	....	210.250,00

Tabela 17 – Fluxo de caixa da Fazenda Progresso, Iuna, Ar de secagem aquecido com gás liquefeito de petróleo

Descrição	Ano 0	Ano 1	Ano 2	...	Ano 20
Entradas					
Investimentos fixos	385.000,00				
Despesas de operação	-	435.875,00	435.875,00	....	435.875,00
Saídas					
Receitas	-	330.000,00	330.000,00	....	330.000,00
Fluxo	-385.000,00	-105.875,00	-105.875,00	....	-105.875,00

Tabela 18 – Fluxo de caixa incremental

Tabela 16 (1)	(R\$)	Tabela 14 (2)	(R\$)	Fluxo de caixa incremental $\Delta(2-1)$	(R\$)
	-400.000		-736.000		-336.000
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
	210.250		282.100		71.850
TIR	53%		38%		21%
VPL	R\$1.263.615,25		R\$1.514.251,20		R\$250.635,96

Na Tabela 18 são apresentados o valor presente líquido e a taxa interna de retorno do fluxo de caixa incremental, e obtiveram-se, respectivamente, os valores de R\$250.635,96 e 21% a.a. Esses valores apontaram favoravelmente para o sistema em que o ar de secagem foi aquecido com vapor de água, apesar do seu maior custo total médio por saca de 60 kg de café beneficiado, R\$13,66, Tabela 18.

Os indicadores de rentabilidade de custos dos investimentos são apresentados na Tabela 19.

Com base nos resultados, verificou-se que o capital empregado na implantação do sistema, capital de formação, foi recuperado, como mostrado no TRCI, em 2,61 anos, nos investimentos realizados na Fazenda Barracão, em Martins Soares, MG; e 1,90 anos na Fazenda Progresso, no Distrito de Laranja da Terra, município de Iúna, ES. Para cada R\$1,0 investido houve retorno de R\$7,67 para a Fazenda Barracão e R\$10,51 para a Fazenda Progresso, dentro do horizonte de planejamento de 20 anos. O valor presente foi relativamente alto nas duas situações. O indicativo mais importante de

rentabilidade do investimento, a TIR, evidenciou que a alocação de recursos nas unidades de secagem, destinadas a secagem de 35.000 e 25.000 sc de 60 quilos de café beneficiado, respectivamente nas duas fazendas, promoveu um retorno líquido de 38% na unidade de Martins Soares-MG e 53% na unidade de Iúna-ES. Tomando como referência os 10% a.a., fornecidos pela caderneta de poupança, pode-se concluir que essas unidades são rentáveis.

O custo total médio de secagem nas Barracão e Progresso foi de R\$ 13,66 e R\$ 8,46 respectivamente. Dos pontos de vista da renda e do custo, na análise de rentabilidade se destacaram os seguintes aspectos:

- a) A RBT atribuível à secagem era R\$13,2 por saca de 60 quilos de produto secado e beneficiado nas duas unidades.
- b) O valor $MBT = RBT - CV$ correspondente a $R\$9,90.sc^{-1}$ e $R\$9,83.sc^{-1}$ nas duas unidades de secagem permitiu concluir que a exploração estava remunerando seus custos variáveis e gerando saldos para remuneração dos demais itens ($MBT > 0$). Caso os sistemas de aquecimento do ar fossem substituídos por GLP, a MBT seria negativa, indicando que os ganhos gerados não cobrem os custos variáveis, mostrando que a atividade é antieconômica.
- c) O valor positivo da renda líquida operacional RLOp apresentado pelos sistemas de aquecimento a vapor de água e queima de lenha de eucalipto indicou que as unidades geram renda suficiente para repor todo o capital consumido (depreciação mais despesas de operação). Caso o GLP fosse utilizado nos sistemas, verificou que a RLOp seria negativa, valor relacionado a uma situação em que as rendas geradas pelo sistema não foram suficientemente elevadas para repor o capital empregado, indicando a inviabilidade de longo prazo do sistema.
- d) Com o valor $RLT = RBT - CT$ correspondente a R\$1,23 e R\$6,02 por saca de 60 quilos de café beneficiado para a secagem nas unidades das Fazendas Barracão e Progresso, afirmou-se que a atividade realizada na primeira apresentou prejuízo econômico. Nos resultados das duas unidades a RLT foi maior que zero, o que proporciona uma situação de lucro econômico supernormal, indicando sua viabilidade com retornos superiores aos que seriam conseguidos se os mesmos recursos fossem utilizados no uso alternativo. Nos sistemas alternativos, uso do GLP como combustível, a RLT foi negativa, o que indicou prejuízo econômico da operação.

O custo médio em $R\$.sc^{-1}$ de café beneficiado obtido pela equação 20 apresentou valores superiores àqueles obtidos pela equação 5, porque na primeira se

consideraram os custos da mão-de-obra e manutenção na sua forma integral, enquanto na segunda os parâmetros estavam embutidos nos custos fixos (equação 4).

Tabela 19 – Indicadores de rentabilidade dos sistemas de secagem estudados

Parâmetros Econômicos	Martins Soares		Laranja da Terra	
	Secagem a vapor	Secagem a gás	Secagem com lenha	Secagem a gás
I. Rentabilidade sob a ótica da teoria de investimentos				
Tempo de retorno do capital investido (anos)	2,61		1,90	
Relação receita-custo	7,67		10,51	
Valor presente (R\$)	1.514.251,20		1.263.615,25	
Taxa interna de retorno (%a.a.)	38%		53%	
II. Rentabilidade sob a ótica da renda e custo				
Renda bruta total (R\$.sc ⁻¹)	13,2	13,2	13,2	13,2
Margem bruta total (R\$.sc ⁻¹)	9,90	3,67	9,83	-2,93
Renda líquida operacional (R\$.sc ⁻¹)	8,92	2,78	9,09	-3,64
Renda líquida total (R\$.sc ⁻¹)	1,23	-3,83	6,02	-6,61
Índice de rentabilidade total (IRT)	1,10	0,78	1,84	0,67
III. Custos totais da secagem do café seco e beneficiado				
Custo fixo total (R\$.ano ⁻¹)	362.321,46	288.803,91	127.294,00	107488,95
Custo variável total (R\$.ano ⁻¹)	115.634,86	333.640,12	84.219,20	403.229,51
Custo total (R\$.ano ⁻¹)	477.956,31	622.444,03	211.513,20	510.718,46
Custo operacional total (R\$.ano ⁻¹)	149.934,86	364.640,12	102.719,20	420.979,51
IV. Custos médios				
Custo fixo total médio (R\$.sc ⁻¹)	10,35	8,25	5,09	4,30
Custo variável total médio (R\$.sc ⁻¹)	3,30	9,53	3,37	16,13
Custo total médio (R\$.sc ⁻¹)*	13,66	17,78	8,46	20,43
Custo total médio (R\$.sc ⁻¹)**	11,97	17,03	7,18	19,81
Diferença *** (%)	14,05	4,43	17,83	3,11
Custo operacional total médio (R\$.sc ⁻¹)	4,28	10,42	4,11	16,84

* Custos estimados pela equação 20

** Custos estimados pela equação 5.

*** Variação entre o custo médio estimado pelas duas equações.

Na Figura 43, ilustra-se a simulação da equivalência de custos gás/lenha, tomando-se por base os equipamentos e as condições nas quais se fez o experimento. Verificou-se que, considerando o preço atual de R\$1,10.kg⁻¹ de GLP, o preço da lenha para equivalente custo deveria ser de R\$55,00 o metro cúbico, aproximadamente. Considerando-se que se consegue, na região, lenha a R\$15,00 o metro cúbico, a secagem a gás apresenta custo aproximadamente quatro vezes maior que a lenha. Essa simulação indica que os custos de secagem lenha/GLP são equivalentes quando o preço do GLP foi de aproximadamente R\$ 0,27 por quilo.

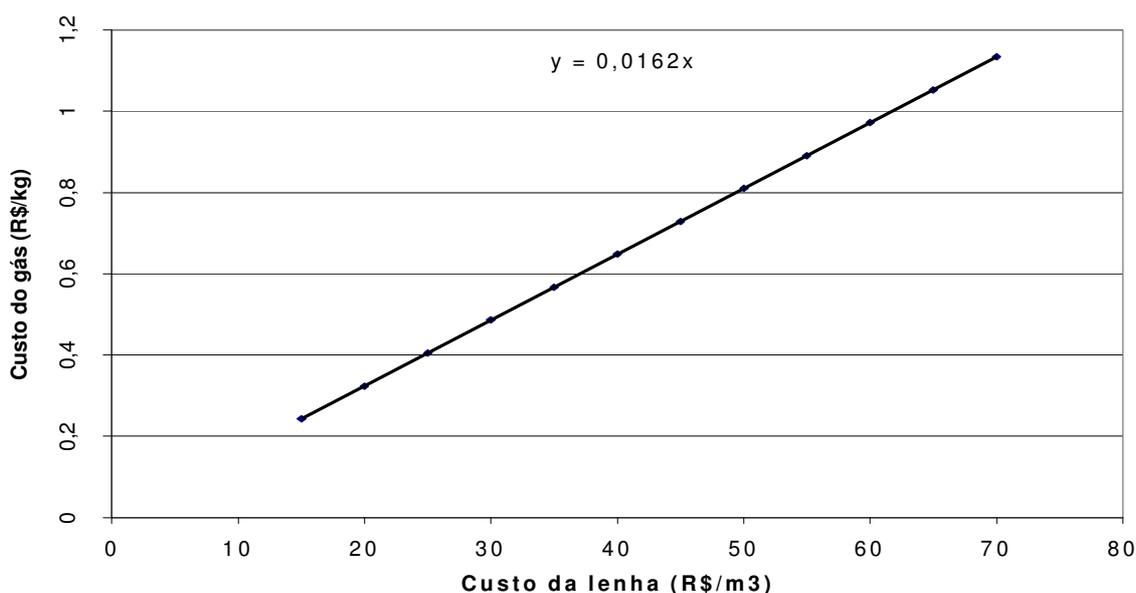


Figura 43 – Equivalência entre os preços do gás e da lenha para a secagem de café

Visando determinar o número de secadores em funcionamento que justificassem a aquisição de uma caldeira do porte da avaliada no presente trabalho procedeu-se a análise econômica considerando que seriam adquiridos somente secadores horizontais. Em outra análise a estrutura seria composta, além da caldeira, de secadores horizontais e intermitente, de colunas, de fluxos cruzados.

Secadores horizontais

A capacidade de secagem do secador horizontal foi de 35 sacas de café beneficiado a cada 60 horas de funcionamento do equipamento. O tempo de duração da safra foi de 2.880 horas. Considerando estes parâmetros estimou-se a produção total para a unidade, conforme o número de secadores em funcionamento. A Tabela 20 apresenta os valores do investimento total e a produção, conforme o número de secadores horizontais instalados.

Tabela 20 – Valores de investimento totais e produção de café, conforme o número de secadores em horizontais em funcionamento

Número de secadores	Caldeira	Secador	Elevadores	Tulha	Total	PE
1	126.000,00	18.000,00	20.000,00	15.000,00	179.000,00	1.680
2	126.000,00	36.000,00	20.000,00	15.000,00	197.000,00	3.360
3	126.000,00	54.000,00	30.000,00	25.000,00	235.000,00	5.040
4	126.000,00	72.000,00	30.000,00	25.000,00	253.000,00	6.720
5	126.000,00	90.000,00	35.000,00	30.000,00	281.000,00	8.400
6	126.000,00	108.000,00	35.000,00	30.000,00	299.000,00	10.080
7	126.000,00	126.000,00	40.000,00	35.000,00	327.000,00	11.760
8	126.000,00	144.000,00	40.000,00	35.000,00	345.000,00	13.440
9	126.000,00	162.000,00	45.000,00	40.000,00	373.000,00	15.120
10	126.000,00	180.000,00	45.000,00	40.000,00	391.000,00	16.800

PE : Produção estimada em sacos de 60 quilos de café seco e beneficiado

A estimativa de custos para cada situação, considerando-se o número de secadores em funcionamento, foi obtida segundo a equação 5.

Tabela 21 – Custo de secagem de café ($R\$.sc^{-1}$) conforme o número de secadores horizontais em funcionamento

Despesas	Número de secadores em funcionamento									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Combustível	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
Energia elétrica	4,89	3,30	2,77	2,51	2,35	2,24	2,16	2,11	2,06	2,03
Fixo	6,78	6,98	7,41	7,61	7,92	8,12	8,43	8,63	8,94	9,14
Total	12,66	11,27	11,17	11,11	11,26	11,35	11,58	11,73	11,99	12,16

Na Tabela 21 verifica-se que o custo de combustível foi constante, porque a caldeira, nesta faixa de funcionamento, consome um metro cúbico de madeira por hora. O custo de energia elétrica foi decrescente; conforme prevê a equação 3, a potência despendida pelo ventilador é dada em $kW.m^{-3}$, e à medida que se aumenta o número de secadores a capacidade de secagem em m^3 cresce em maior proporção que a potência exigida pelos motores. O custo fixo aumenta proporcionalmente ao aumento do número de secadores horizontais. Pela Tabela 25, verifica-se que o mesmo aconteceu quando os secadores intermitente, de colunas e de fluxos cruzados fizeram parte da linha de secagem juntamente com horizontais.

Tabela 22 – Despesas de operação do sistema caldeira/secadores horizontais

Despesas (R\$ano ⁻¹)	Número de secadores em funcionamento					
	1	2	3	4	5	6
Combustível	43.200,00	43.200,00	43.200,00	43.200,00	43.200,00	43.200,00
Energia elétrica	8.215,00	11.088,00	13.960,80	16.867,00	19.740,00	22.579,20
Manutenção	14.320,00	15.760,00	18.800,00	20.240,00	22.480,00	23.920,00
Mão-de-obra	7.000,00	7.000,00	7.000,00	7.000,00	7.000,00	7.000,00
Total	62.735,00	77.048,00	82.960,80	87.307,00	92.420,00	96.699,20

...Continuação da tabela 22

Despesas (R\$ano-1)	Número de secadores em funcionamento			
	7	8	9	10
Combustível	43.200,00	43.200,00	43.200,00	43.200,00
Energia elétrica	25.401,60	28.358,40	31.147,20	34.104,00
Manutenção	26.160,00	27.600,00	29.840,00	31.280,00
Mão-de-obra	7.000,00	7.000,00	7.000,00	7.000,00
Total	101.761,60	106.158,40	111.187,20	115.584,00

A Tabela 23 apresenta a taxa interna de retorno e valor presente líquido, para a caldeira operando com diferentes quantidades de secadores horizontais em funcionamento. Verifica-se que a aquisição de uma caldeira com valor de R\$ 126.000,00, é justificável somente quando o produtor tem condições de comprar 6 secadores horizontais e os coloque em funcionamento na sua capacidade máxima produtiva. Devido ao fato de o fluxo líquido de caixa ter sido implementado conforme o aumento de secadores horizontais em funcionamento a TIR e VPL também cresceram.

Tabela 23 – Análise de investimento para a unidade de secagem com a caldeira operando com diferentes quantidade de secadores horizontais em funcionamento

Número de secadores horizontais em funcionamento							
	4	5	6	7	8	9	10
Investimento inicial (R\$)							
Ano	-253.000,00	-281.000,00	-299.000,00	-327.000,00	-345.000,00	-373.000,00	-391.000,00
Fluxo líquido de caixa (R\$ano ⁻¹)							
1	1.397,00	18.460,00	36.358,80	53.470,40	71.249,60	95.866,80	106.176,00
2	1.397,00	18.460,00	36.358,80	53.470,40	71.249,60	95.866,80	106.176,00
3	1.397,00	18.460,00	36.358,80	53.470,40	71.249,60	95.866,80	106.176,00
4	1.397,00	18.460,00	36.358,80	53.470,40	71.249,6	95.866,80	106.176,00
5	1.397,00	18.460,00	36.358,80	53.470,40	71.249,60	95.866,80	106.176,00
6	1.397,00	18.460,00	36.358,80	53.470,40	71.249,60	95.866,80	106.176,00
7	1.397,00	18.460,00	36.358,80	53.470,40	71249,60	95866,80	106.176,00
8	1.397,00	18.460,00	36.358,80	53.470,40	71.249,60	95866,80	106.176,00
9	1.397,00	18.460,00	36.358,80	53.470,40	71.249,60	95866,80	106.176,00
10	1.397,00	18.460,00	36.358,80	53.470,40	71.249,60	95866,80	106.176,00
11	1.397,00	18.460,00	36.358,80	53.470,40	71.249,60	95866,80	106.176,00
12	1.397,00	18.460,00	36.358,80	53.470,40	71.249,60	95866,80	106.176,00
13	1.397,00	18.460,00	36.358,80	53.470,40	71.249,60	95866,80	106.176,00
14	1.397,00	18.460,00	36.358,80	53.470,40	71.249,60	95866,80	106.176,00
15	1.397,00	18.460,00	36.358,80	53.470,40	71.249,60	95866,80	106.176,00
16	1.397,00	18.460,00	36.358,80	53.470,40	71.249,60	95866,80	106.176,00
17	1.397,00	18.460,00	36.358,80	53.470,40	71.249,60	95866,80	106.176,00
18	1.397,00	18.460,00	36.358,80	53.470,40	71.249,60	95866,80	106.176,00
19	1.397,00	18.460,00	36.358,80	53.470,40	71.249,60	95866,80	106.176,00
20	1.397,00	18.460,00	36.358,80	53.470,40	71.249,60	95866,80	106.176,00
TIR	-	3%	11%	15%	20%	25%	27%
VPL	- 223.563,00	65.345,00	111.351	270.096	445.497	685.457	780.029

Secadores intermitente, de colunas, de fluxos cruzados

Para a análise de investimentos da unidade operando com secadores intermitente, de colunas, de fluxos cruzados considerou-se a realização da pré-secagem em secadores horizontais.

A capacidade de secagem foi de 60 sacas de café beneficiado a cada 60 horas de funcionamento do equipamento. O tempo de duração da safra foi de 2.880 horas.

Considerando estes parâmetros estimou-se a produção total para a unidade, conforme o número de secadores em funcionamento. A Tabela 24 apresenta os valores do investimento total e a produção, conforme o número de secadores horizontais e intermitente, de colunas, de fluxos cruzados instalados.

Tabela 24 – Valores de investimento totais e produção de café, conforme o número de secadores em horizontais e intermitente, de coluna e de fluxos cruzados em funcionamento

SH	SV	Caldeira R\$	Secador R\$	Elevadores R\$	Tulha R\$	Total R\$	PE
2	4	126.000,00	108.000,00	25.000,00	20.000,00	279.000,00	11.520
3	6	126.000,00	162.000,00	25.000,00	25.000,00	338.000,00	17.280
4	8	126.000,00	216.000,00	30.000,00	30.000,00	402.000,00	23.040
5	10	126.000,00	270.000,00	35.000,00	35.000,00	466.000,00	28.800
6	12	126.000,00	324.000,00	35.000,00	35.000,00	520.000,00	34.560
7	14	126.000,00	378.000,00	40.000,00	40.000,00	584.000,00	40.320
8	16	126.000,00	432.000,00	40.000,00	40.000,00	638.000,00	46.080
9	18	126.000,00	486.000,00	45.000,00	45.000,00	702.000,00	51.840
10	20	126.000,00	540.000,00	45.000,00	45.000,00	756.000,00	57.600

SH : secadores horizontais em funcionamento

SV : secadores intermitente, de colunas, de fluxos cruzados em funcionamento

PE : produção estimada em sacas de 60 quilos de café seco e beneficiado

Na Tabela 25 tem-se o custo de secagem conforme o número de secadores horizontais e verticais, intermitente de fluxos cruzados em funcionamento

Tabela 25 – Custo de secagem de café (R\$.sc⁻¹) conforme o número de secadores horizontais e intermitente, de colunas de fluxos cruzados em funcionamento

Despesas	Secadores horizontais em funcionamento									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	Secadores intermitente, de coluna de fluxos cruzados em funcionamento									
	4	6	8	10	12	14	16	18	20	
Combustível	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	
Energia elétrica	1,42	1,14	1,00	0,91	0,86	0,81	0,75	0,76	0,71	
Fixo	5,93	6,42	6,95	7,48	7,93	8,47	8,92	9,45	9,90	
Total	8,33	8,54	8,94	9,38	9,78	10,26	10,65	11,20	11,60	

O custo de energia elétrica foi decrescente; conforme prevê a equação 3, a potência despendida pelo ventilador é dada em kW.m⁻³, e à medida que se aumenta o número de secadores a capacidade de secagem em m³ cresce em maior número que a potência exigida pelos motores. O custo fixo aumenta proporcionalmente ao aumento do número de secadores em funcionamento.

Tabela 26 – Despesas de operação do sistema caldeira/secadores horizontais/secador intermitente, de colunas e de fluxos cruzados.

Despesas	Secadores horizontais em funcionamento					
	2	3	4	5	6	7
	Secadores intermitente, de coluna de fluxos cruzados em funcionamento					
	4	6	8	10	12	14
Combustível	43.200,00	43.200,00	43.200,00	43.200,00	43.200,00	43.200,00
Energia elétrica	16.358,40	19.699,20	23.040,00	26.323,20	29.617,92	32.659,20
Manutenção	22.320,00	27.040,00	32.160,00	37.280,00	41.600,00	46.720,00
Mão-de-obra	7.000,00	7.000,00	7.000,00	7.000,00	7.000,00	7.000,00
Total	88.878,40	96.939,20	105.400,00	113.803,20	121.417,92	129.579,20

...Continuação da tabela 26

Despesas	Secadores horizontais em funcionamento		
	8	9	10
	Secadores intermitente, de coluna de fluxos cruzados em funcionamento		
	16	18	20
Combustível	43.200,00	43.200,00	43.200,00
Energia elétrica	34.467,84	39.398,40	40.896,00
Manutenção	51.040,00	56.160,00	60.480,00
Mão-de-obra	7.000,00	7.000,00	7.000,00
Total	135.707,80	145.758,40	151.576,00

A Tabela 27 apresenta a taxa interna de retorno e valor presente líquido, para a caldeira operando com diferentes quantidades de secadores intermitente, de colunas, de fluxos cruzados em funcionamento. Salienta-se que o número de secadores intermitente, de colunas com fluxos cruzados deve ser o dobro da quantidade de secadores horizontais. Verifica-se na Tabela 27 que a aquisição de uma caldeira com valor de R\$ 126.000,00 é justificável somente quando o produtor tem condições de comprar dois secadores horizontais e quatro intermitente, de colunas com fluxos cruzados.

Tabela 27 - Análise de investimento para a unidade de secagem com a caldeira operando com diferentes quantidades de secadores secador intermitente, de colunas, de fluxos cruzados em funcionamento.

Ano	Número de secadores intermitente, de coluna e de fluxos cruzados em funcionamento								
	4	6	8	10	12	14	16	18	20
	Investimento inicial (R\$)								
	-279.000,00	-338.000,00	-402.000,00	-466.000,00	-520.000,00	-584.000,00	-638.000,00	-702.000,00	-756.000,00
1	63.185,60	131.156,80	198.728,00	266.356,80	334.774,08	402.644,80	472.548,16	538.529,60	608.744,00
2	63.185,60	131.156,80	198.728,00	266.356,80	334.774,08	402.644,80	472.548,16	538.529,60	608.744,00
3	63.185,60	131.156,80	198.728,00	266.356,80	334.774,08	402.644,80	472.548,16	538.529,60	608.744,00
4	63.185,60	131.156,80	198.728,00	266.356,80	334.774,08	402.644,80	472.548,16	538.529,60	608.744,00
5	63.185,60	131.156,80	198.728,00	266.356,80	334.774,08	402.644,80	472.548,16	538.529,60	608.744,00
6	63.185,60	131.156,80	198.728,00	266.356,80	334.774,08	402.644,80	472.548,16	538.529,60	608.744,00
7	63.185,60	131.156,80	198.728,00	266.356,80	334.774,08	402.644,80	472.548,16	538.529,60	608.744,00
8	63.185,60	131.156,80	198.728,00	266.356,80	334.774,08	402.644,80	472.548,16	538.529,60	608.744,00
9	63.185,60	131.156,80	198.728,00	266.356,80	334.774,08	402.644,80	472.548,16	538.529,60	608.744,00
10	63.185,60	131.156,80	198.728,00	266.356,80	334.774,08	402.644,80	472.548,16	538.529,60	608.744,00
11	63.185,60	131.156,80	198.728,00	266.356,80	334.774,08	402.644,80	472.548,16	538.529,60	608.744,00
12	63.185,60	131.156,80	198.728,00	266.356,80	334.774,08	402.644,80	472.548,16	538.529,60	608.744,00
13	63.185,60	131.156,80	198.728,00	266.356,80	334.774,08	402.644,80	472.548,16	538.529,60	608.744,00
14	63.185,60	131.156,80	198.728,00	266.356,80	334.774,08	402.644,80	472.548,16	538.529,60	608.744,00
15	63.185,60	131.156,80	198.728,00	266.356,80	334.774,08	402.644,80	472.548,16	538.529,60	608.744,00
16	63.185,60	131.156,80	198.728,00	266.356,80	334.774,08	402.644,80	472.548,16	538.529,60	608.744,00
17	63.185,60	131.156,80	198.728,00	266.356,80	334.774,08	402.644,80	472.548,16	538.529,60	608.744,00
18	63.185,60	131.156,80	198.728,00	266.356,80	334.774,08	402.644,80	472.548,16	538.529,60	608.744,00
19	63.185,60	131.156,80	198.728,00	266.356,80	334.774,08	402.644,80	472.548,16	538.529,60	608.744,00
20	63.185,60	131.156,80	198.728,00	266.356,80	334.774,08	402.644,80	472.548,16	538.529,60	608.744,00
TIR	22%	39%	49%	57%	64%	69%	74%	77%	81%
VPL	R\$ 420.504	R\$ 1.100.338	R\$ 1.771.127	R\$ 2.442.539	R\$ 3.131.917	R\$ 3.805.947	R\$ 4.511.406	R\$ 5.164.993	R\$ 5.873.817

4.6. Custo de inadequação operacional do sistema

A fim de determinar a influência do custo de inadequação na composição do custo total do sistema, determinou-se, segundo a equação 11, o custo total da secagem do café secado e beneficiado nas unidades de Martins Soares, MG, e Iúna, ES. Denominou-se custo de inadequação operacional aquele causado por operações indevidas durante os processos. Apesar da falta de manutenção preventiva das instalações e dos equipamentos, essa discussão considerou apenas os resultados decorrentes do custo de supersecagem, causado por falta de calibração do determinador de umidade, utilizado no monitoramento do teor de umidade do café, durante a secagem.

Na Tabela 27, apresentam-se os resultados dos custos variáveis, estimados com base nas condições experimentais e na composição do custo total. Verifica-se que o custo de inadequação foi mais representativo, refletindo a impossibilidade de se completarem as operações de campo, previstas em programações antecipadas, bem como a ociosidade do sistema, causada por falhas mecânicas, falta de manutenção preventiva e imprevistos técnico-operacionais. As características de programação das unidades, para colheita e recebimento do produto úmido, basearam-se no sistema de programação balanceada. Devido à falta de parâmetros adequados ao café utilizou-se o fator de inadequação do milho para a realização dos cálculos do custo de inadequação do sistema, representado pela equação 11

Tabela 27 – Composição de custo variável de secagem e sua participação em relação ao total, nas duas unidades de secagem testadas

Unidade	Parâmetros de custo				
	Combustível (R\$.h ⁻¹)	Eletricidade (R\$.h ⁻¹)	Mão-de-obra (R\$.h ⁻¹)	Inadequação (R\$.h ⁻¹)	Total (R\$.h ⁻¹)
Martins Soares	0,44	4,07	2,4	214,77	221,68
% do total	0,19	1,83	1,08	96,88	100
Laranja da Terra	0,47	4,07	2,4	153,40	160,35
% do total	0,29	2,53	1,49	95,66	100

Na Tabela 28, apresenta-se o custo total, considerando a composição dos custos variável, fixo e de quebra técnica. Este último refletiu as perdas de matéria seca, o excesso de secagem ou a secagem incompleta e a depreciação geral do produto. O custo horário é proveniente da estimativa de 2.880 horas de operação na unidade de Martins Soares e 3.200 horas na unidade de Iuna, ES, com custo de quebra técnica

representando 4,57% e 4,12% nas respectivas unidades, o que, possivelmente, foi devido a ocorrência de supersecagem.

Tabela 28 – Custo horário e anual de secagem observados durante a realização dos ensaios

Unidade	Parâmetros de custos totais							
	Variável		Fixo		Quebra técnica		Total	
	R\$.h ⁻¹	R\$.ano ⁻¹	R\$.h ⁻¹	R\$.ano ⁻¹	R\$.h ⁻¹	R\$.ano ⁻¹	R\$.h ⁻¹	R\$.ano ⁻¹
Martins Soares	192,43	554.213,54	35,77	103.040,00	10,94	31.500,00	239,15	688.753,55
% do total	-	80,47	-	14,96	-	4,57	100,00	100
Laranja da Terra	146,16	467.723,77	17,5	56.000,00	7,03	22.500,00	170,70	546.223,78
% do total	-	85,62	-	10,25	-	4,12	100	100

Na Tabela 29, apresentam-se a capacidade e o tempo de secagem observado, e umidade reais e verificados durante a realização do experimento. A umidade e o tempo de secagem, denominados reais, referem-se àqueles em que a secagem poderia ter sido encerrada, caso o determinador de umidade estivesse calibrado. A capacidade de secagem foi obtida a partir do volume final de café beneficiado e do tempo consumido para executá-la; e considerando-se as condições experimentais, a capacidade de secagem das unidades era de 3.500 m³ e 2.500 m³ de café secado e beneficiado, nas unidades de Martins Soares, MG, e Iuna, ES, respectivamente.

Tabela 29 - Capacidade e tempo de secagem observado, teores de umidade reais e observados durante a realização do experimento

Unidade	Teor de Umidade			Tempo de Secagem		Capacidade de Secagem	
	Inicial	Final	Real	Observado	Real	Horária (m ³ .h ⁻¹)	Anual (m ³ .ano ⁻¹)
Martins Soares	40	11	13	46	36	1,4	4.032,00
Laranja da Terra	51	12	13	70	55	0,86	2.742,50

Na Tabela 30, apresenta-se a variação no custo decorrente da inadequação operacional durante a secagem, nos dois locais onde foi realizado o experimento. A estimativa dos prejuízos refere-se a valores estimados, anualmente, com base nos resultados observados no decorrer do experimento. O custo real refere-se às operações cuja secagem teria sido concluída no tempo correspondente àquele necessário para redução do teor de umidade do café ao nível de 13%. Os resultados experimentais evidenciaram que houve excedente de 10 horas de secagem na unidade de Martins Soares, MG; caso a secagem fosse interrompida no momento correto durante toda a

safra, a economia estimada com base no custo seria de R\$116.724,31. Na unidade de Laranja da Terra, município de Iuna – ES o tempo excedente de secagem foi de 15 horas; se a operação fosse interrompida no momento correto durante toda a safra, a economia estimada com base no custo seria de R\$95.884,47. Indiretamente, o excesso de secagem elevou os custos de transporte, encargos sociais e impostos, além de reduzir o potencial de comércio do produto e a capacidade de processamento, bem como retardar a colocação do produto no mercado, dentre outros.

Tabela 30 – Variação no custo decorrente da inadequação operacional durante a secagem nos dois locais onde foi realizado o experimento

Variável	Martins Soares	Laranja da Terra
1. Teor de umidade final % bu		
Observado	11	12
Indicada	13	13
2. Tempo de secagem, h		
Observado	46	70
Real	36	55
Excedente	10	15
3. Custo anual		
3.1. Horário R\$.h ⁻¹		
Observado	239,15	170,697
Real	198,62	140,735
Prejuízos	40,53	29,96
3.2. Custo total R\$.ano ⁻¹		
Custo total observado	688.753,54	546.223,78
Real	572.029,23	450.338,30
4. Prejuízos (R\$.ano ⁻¹)	116.724,31	95.885,47

4.7 – Comparação entre os resultados observados e simulados.

4.7.1. Curvas de secagem e temperatura

Devido à grande variação de volume de café ocorrida na secagem realizada em secador rotativo horizontal, a simulação foi realizada somente no secador intermitente, de colunas e de fluxos cruzados. Neste a variação de volume do produto na parte superior do secador não causou problemas porque a câmara de secagem estava sempre cheia de grãos.

Ao se utilizar o modelo de THOMPSON et al. (1968), assumiu-se que os grãos têm a mesma temperatura do ar que os circunda, durante a secagem, após a ocorrência

dos efeitos da umidade evaporativa e da diferença inicial de temperatura entre os grãos e o ar. Fizeram-se estas considerações baseando-se em pesquisas de Henderson e Pabis, que estudaram a relação entre as temperaturas do ar de secagem e dos grãos de milho.

As variáveis que permitem estimar a temperatura final das sementes, em qualquer etapa do processo, são: temperatura inicial, temperatura final, calor específico, entalpia de vaporização, variação na umidade das sementes e variações na razão de mistura e temperatura inicial do ar. Com estes resultados procura-se mostrar como variam a temperatura e umidade dos grãos, durante a secagem, uma vez que a perda de água tende a equilibrar a temperatura do produto com a do ar que o circunda.

De acordo com os resultados experimentais e simulados, ocorreu aumento na temperatura dos grãos durante a secagem do produto. No início da secagem, com a umidade elevada, os valores experimentais da umidade do café foram inferiores aos simulados. Esta condição, manteve-se, até o final do processo.

A Figura 44 apresenta a comparação entre os valores observados e simulados para temperatura e umidade do grão no secador intermitente, de coluna, de fluxos cruzados

Os valores simulados obtidos na temperatura do ar intergranular na primeira hora de secagem foram superiores aos observados. Na vigésima hora de secagem apresentaram valores aproximados. A partir deste momento a temperatura observada apresentou valores superiores aos simulados, chegando a um máximo, 50 °C na trigésima nona hora de secagem. Apesar deste valor ter sido relativamente alto, a qualidade do café não foi alterada, pois ele suporta, sem que sejam alteradas suas características sensoriais, temperatura de até 60 °C, desde que seja exposto a tal temperatura do ar intergranular por pouco tempo.

Verifica-se na Figura 44 que os valores da simulação superestimaram a umidade do produto do início da operação até a trigésima nona hora de secagem. A partir deste momento as curvas tornaram-se paralelas. A simulação apresentou resultados excelentes no que se refere ao momento de interromper a secagem, tendo valor de umidade simulado aproximado do observado quando o café estava com umidade em torno de 13 %bu.

THOMPSON et al. (1968), ao desenvolverem o modelo, consideraram a temperatura do ar de secagem como a principal variável no processo. Não atentaram para a importância dos efeitos do fluxo de ar e da velocidade do produto sobre a taxa de secagem. Estas variáveis podem ter influência direta sobre o coeficiente de difusão de

umidade que, reconhecidamente, não é constante durante o processo, variando com a temperatura e a umidade do produto.

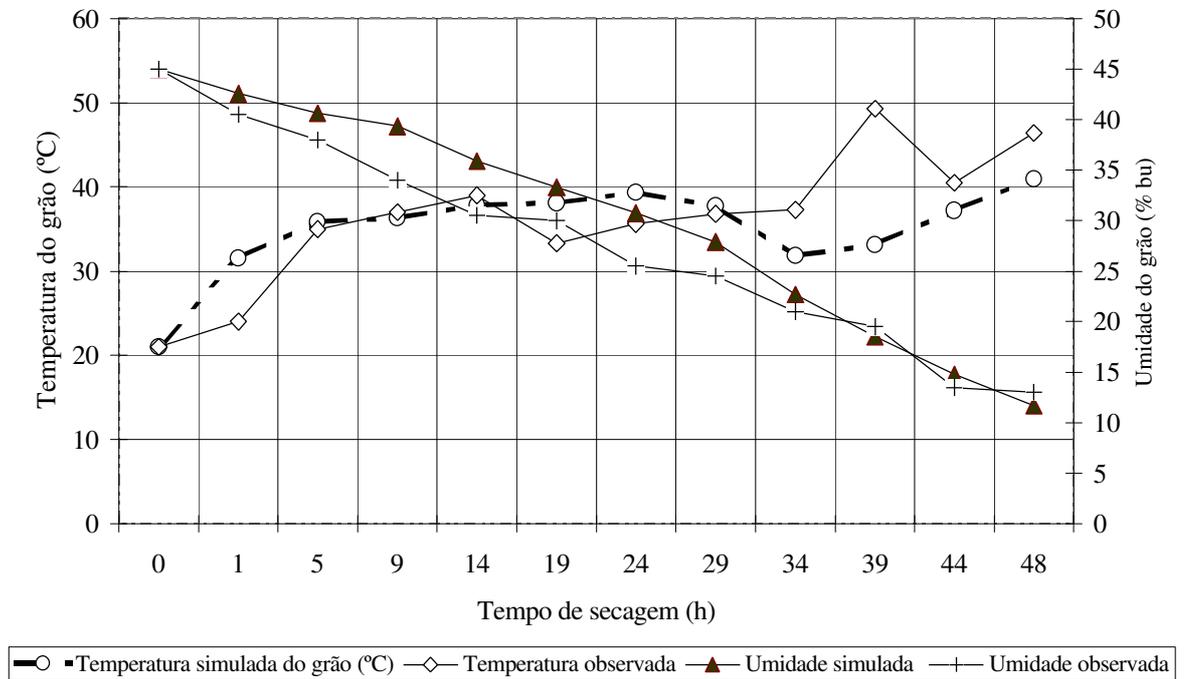


Figura 44 – Comparação entre os valores observados e simulados para temperatura e umidade do grão no secador vertical intermitente de fluxos cruzados.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

O presente trabalho foi desenvolvido no período entre maio e agosto de 1999, nas unidades de secagem da Fazenda Heringer Ltda., em Martins Soares, MG, e no Distrito de Laranja da Terra, município de Iúna, ES.

Fizeram-se avaliações de consumo de energia e de custos em três sistemas de secagem: um em que o ar foi aquecido diretamente pela queima de gás liquefeito de petróleo (GLP), noutro indiretamente pela queima da lenha de eucalipto numa fornalha a fogo indireto e, finalmente num terceiro, também pela queima da lenha de eucalipto, porém numa caldeira, a qual forneceu vapor de água para aquecimento do ar de secagem em um trocador de calor ar-água.

Café com umidade inicial igual a 60% bu foi secado durante oito horas no terreiro até aproximadamente 47% bu e colocado, posteriormente, no secador para completar a secagem. Uma secagem para cada teste foi feita em terreiro (testemunha) até atingir umidade final igual a 13% bu, visando à comparação de qualidade do produto. A tomada de dados foi realizada em quatro tratamentos, cada um com três testes, conforme a seguir:

Tratamento 1 – Consistiu na pré-secagem em secadores horizontais rotativos e na secagem em secadores verticais intermitentes de fluxos cruzados, queimou lenha de eucalipto numa fornalha a fogo indireto para o aquecimento do ar de secagem, não sendo realizada a homogeneização do produto durante a secagem em tulhas.

Tratamento 2 – Consistiu na pré-secagem em secadores horizontais rotativos e na secagem em secadores intermitentes, de coluna e de fluxos cruzados, em que se queimou lenha de eucalipto numa caldeira e com o vapor de água gerado, aqueceu-se o

ar de secagem via trocador de calor, e foi realizada a homogeneização do produto em tulhas durante a secagem.

Tratamento 3 – Neste, o produto passou direto do terreiro para o secador intermitente, de coluna e de fluxos cruzados, o ar de secagem foi aquecido diretamente com calor gerado pela queima do gás liquefeito de petróleo (GLP), e foi realizada a homogeneização do produto em tulhas durante a secagem.

Tratamento 4 – Neste tratamento, o produto foi secado somente no secador horizontal rotativo, em que se queimou lenha de eucalipto numa fornalha a fogo indireto para o aquecimento do ar de secagem e não foi realizada a homogeneização do produto em tulhas durante a secagem .

Nos tratamentos 2 e 3, durante a secagem no secador intermitente, de coluna e de fluxos cruzados o café foi transportado para uma tulha, onde permaneceu por períodos que variaram entre 10 e 50 horas. A vazão, pressão estática e temperatura do ar de secagem foram, respectivamente, $85 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, 75 mmca e $60 \text{ }^\circ\text{C}$.. Monitoraram-se a umidade, a massa específica aparente do produto e a temperatura do ar intergranular em intervalos regulares de quatro horas durante cada teste.

Para a análise econômica foram considerados quatro projetos. Os investimentos de cada unidade de secagem, Martins Soares, MG, e Laranja da Terra, ES, foram estudados de duas formas: uma conforme o funcionamento adotado pelo gerente da unidade e outra considerando que todo o sistema de aquecimento será substituído pelo gás liquefeito de petróleo, segundo os dados obtidos na avaliação obtida no tratamento 3.

Considerando as condições em que foram feitos os experimentos, pode-se concluir que:

1 – A secagem com diferentes tipos de combustíveis não alterou a qualidade do café seco.

2 – A taxa de secagem do café, em pontos percentuais de água retirada por hora, foi maior na operação realizada no secador horizontal, na fase de pré-secagem.

3 – O consumo médio de lenha, em quilos por hora, por secador, foi o mesmo para a operação em que foi utilizada a fornalha a fogo direto e a caldeira.

4 – Na fase de pré-secagem, no secador horizontal, o sistema apresentou menor consumo específico de energia.

5 – O tempo de retorno do capital investido em anos foi de 2,61 para o sistema de aquecimento do ar com vapor de água e 1,90 ano para o sistema em que o ar foi aquecido pela queima da lenha numa fornalha a fogo indireto.

6 – O valor presente líquido e a taxa interna de retorno foram iguais a R\$1.514.251,20 e 38% a.a., no sistema de aquecimento do ar com vapor de água, e R\$1.263.615,25 e 53% a.a., na unidade em que o ar foi aquecido pela queima da lenha de eucalipto.

7 – As duas unidade de secagem, se operadas com o combustível que estão utilizando apresentaram alto valor presente líquido e taxa interna de retorno maior do que aquela apresentada pelo mercado.

8 – A análise do fluxo de caixa incremental indicou que o sistema de aquecimento do ar de secagem com vapor de água, em Martins Soares, MG, é economicamente mais viável que o da Laranja da Terra, Iúna, ES, aquecido pela queima da lenha de eucalipto.

9 – Na unidade do município mineiro de Martins Soares, onde o ar de secagem foi aquecido com vapor de água, a operação de secagem teve custo médio de R\$13,66 a saca de 60 quilos de café beneficiado; se o sistema de aquecimento do ar for substituído por queimadores de gás liquefeito de petróleo, o custo passará a ser de R\$17,78 a saca de 60 quilos de café beneficiado.

10 – A unidade do distrito de Laranja da Terra no município de Iúna, ES, teve o custo de secagem de R\$8,46 a saca de 60 quilos de café beneficiado. Nesta o ar foi aquecido com queima da lenha de eucalipto numa fornalha a fogo indireto; se as fornalhas fossem substituídas por queimadores de gás o custo estimado passaria a R\$20,43 a saca de 60 quilos de café beneficiado.

11 – A secagem de café utilizando gás liquefeito de petróleo mostrou-se inviável economicamente nas duas unidades avaliadas, nas condições em que se desenvolveram os testes.

12 – A aquisição da caldeira utilizada no experimento só é viável quando o produtor tem condições de adquirir seis secadores horizontais, com a secagem realizada somente nestes equipamentos. Outra alternativa seria adquirir dois secadores horizontais para a pré-secagem e quatro intermitentes, de coluna e de fluxos cruzados para realizar a secagem do produto.

6. SUGESTÕES

Com base nos dados obtidos, as seguintes sugestões são apresentadas:

- Substituição dos atuais secadores horizontais e intermitente, de colunas e com fluxos cruzados, nas duas unidades, por secadores mais eficientes do ponto de vista de energia e de custo, os de fluxos concorrentes.
- Utilização da caldeira na sua capacidade máxima, fornecendo vapor a 30 secadores simultaneamente e não apenas aos 20 instalados na unidade de Martins Soares, MG. Isto promoverá diminuição do custo de secagem, pois a unidade terá sua capacidade produtiva ampliada.
- Receber a lenha de eucalipto com seis a oito meses de antecedência (setembro/outubro) e acondicioná-la em camadas mais finas para melhor redução do seu teor de umidade. O combustível com menor umidade terá maior poder calorífico proporcionando menor consumo horário da biomassa.
- Durante a coleta de dados na unidade de Laranja da Terra, Iúna, ES, observou-se que nos secadores que não faziam parte do experimento, a temperatura do ar de secagem chegou algumas vezes até 90 °C, sugere-se a uniformização da temperatura do ar de secagem, evitando com isto altas temperaturas do ar intergranular e proporcionando diminuição do consumo de combustível.
- As fornalhas utilizadas na unidade de Laranja da Terra deverão trabalhar com o dispositivo de abastecimento de combustível sempre fechado.

- Uniformizar o tempo de repouso do produto durante a secagem para 20 ± 2 horas foi o suficiente.
- Com o objetivo de evitar acidentes de trabalho, fazer treinamento de operadores da caldeira e fornalhas, bem como implantar uma comissão interna de prevenção de acidentes, (CIPA).
- Interromper a secagem no momento certo; com isso o custo de inadequação do sistema será minimizado.
- O beneficiamento do café deverá ser realizado por lote, ou seja, não misturar produtos oriundos de diferentes glebas na hora do beneficiamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHÃO, I.O, MIRANDA, L.R.F. de, ABRAHÃO, J.T.M. **Aplicação da cristalização sensível na determinação da qualidade do café**. Piracicaba, Anais da ESALQ, v.33. p567-575, 1976.
- ANDRADE, E. B., SASSERON, J. L., OLIVEIRA FILHO, D. **Princípios sobre combustíveis combustão e fornalhas**. Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 1984. 39p.
- BAKKER-ARKEMA, F.W., LEREW, L.E., BROOK, R.C., BROOKER, D.B. **Energy and capacity performance evaluation of grain dryers**. St. Joseph: ASAE, 1978. 13p. (Paper 78-3523).
- BARROS, W.J.; FABRI, M.A.; VICENTE, J. C. **Estudo de otimização energética em operações pós-colheita de café**. Guarapari, 20º Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras. P.39-41, 1994.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco energético nacional – 1999**. Brasília: MME 153p.
- CHALFOUN, S.M.; CARVALHO, V.D. **Colheita e preparo do café**. Lavras, UFLA/FAEPE, 1997. 49p.
- CORDEIRO, J.A.B. **Influência da temperatura e do tempo de repouso na secagem de café (Coffea arábica L.) em camadas fixas**. Viçosa: UFV, 1982, 60p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1982.
- FIGUEIREDO, R. **Adaptação do modelo de Thompson para simulação de secagem de raspas de mandioca (Manihot esculenta L.)**. João Pessoa: UFPB, 1982, 95p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)- Universidade Federal da Paraíba, 1982.

- FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS – CETEC: **Teoria simplificada da combustão**. Belo Horizonte, MG, 1988. 30p. (Série de publicações técnicas. SPT – 017).
- GITIMU, C.W. Better coffee farming: coffee processing. **Kenya Coffee**, v.60, n.703, p. 1997-1998, 1995.
- INCROPERA, F.P., DEWITT, D. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 3.ed. Rio de Janeiro: Guanabara KOOGAN, 1993. 455p.
- JUNGE, D.C. **Design guideline handbook for industrial spreader boilers fired with wood and bark residue fuels**. Portland: Oregon State University, February, 1979. (Report n.RLO-2227-T22-15).
- 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.
- LEITE, C.A.M., COSTA, F.A., VALE, S.M.R. **Planejamento da empresa rural. Curso de Administração Rural – Módulo 4**. Brasília: ABEAS, 1996. 56p.
- MAHAN, B.H. **Química: um curso universitário**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda. Editora da USP, 1970, 654p.
- MARTINS, H. Uso da madeira como energia: In: PENEDO, W.P., **Uso da madeira para fins energéticos**: Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, CETEC, 1991. p.10-26.
- MATIELLO, J.B. **O café do cultivo ao consumo**. São Paulo, Globo, 1991. 320p.
- MENDES, A.N.G.; ABRAHÃO, E.J.; CAMBRAIA, J.F.; GUIMARÃES, J.R. **Recomendações técnicas para a cultura do cafeeiro no Sul de Minas**. Lavras, UFLA < 1995. 76p.
- NOGUEIRA, V.S. Utilização de caldeira como fonte de calor para secagem de café. **12º Congresso Brasileiro Sobre Pesquisas Cafeeiras**, Caxambu, MG, 1985. p.160.
- NOGUEIRA, V.S. Implantação de unidade de aquecimento central, com vapor, para pré-secagem e secagem de café. **13º Congresso Brasileiro Sobre Pesquisas Cafeeiras**, São Lourenço, MG, 1986. p.157-158.
- OLIVEIRA, G.A. **Desenvolvimento e teste de uma fornalha com aquecimento indireto e autocontrole da temperatura máxima do ar para secagem de produtos agrícolas**. Viçosa: UFV, 69p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 1996.
- OSÓRIO, A.G.S. **Projeto e construção de um secador intermitente de fluxo concorrente e sua avaliação na secagem de café**. Viçosa: 1982. MG: 57p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1982.

- PERA, H. **Perdas de calor e rendimento em caldeiras**, In: Geradores de vapor, São Paulo: FAMA, 1990, 750p.
- PINTO, F. de A. C. **Projeto de um secador de fluxos contracorrente/concorrente e análise de seu desempenho na secagem de café (*Coffea arabica*, L.)**. Viçosa,: UFV, 1993. 57p. 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 do café (*Coffea arabica* L.)**. Viçosa, UFV, 1994. 80p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1994.
- QUEIROZ, D.M., MELO, E.C., SOUSA SILVA, J. **Comparação entre os modelos de secagem de milho de utilizando os modelos de Thopson e de Hukill em computadores IBM-360 e adaptados para calculadora Texas T1-59**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 11, 1981Brasília: Anais [S.l.:s.n., 1981].
- QUEIROZ, D.M.; PEREIRA, J.A.M., MELO, E.C. **Simulação de secagem de grãos – Modelo de Thompsom**. Engenharia na Agricultura. Série: Caderno didático. Viçosa, MG, 2(2): 12p, 1992.
- RENA, A.B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M.;YAMADA, T. **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade**. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa edo Fosfato. Piracicaba, 1986, 447p.
- REZENDE, R.C. **Modelo computacional aplicado a dimensionamento, simulação e análise econômica de unidades pré-processadoras de grãos**, Viçosa UFV, 1997. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1997.
- ROA, G. **Secagem e armazenagem dos principais alimentos brasileiros usando ar natural, coletores solares, sistemas armazenadores de energia solar e gasosênios**. Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 1979. 75p
- SABIONI, P.M. **Projeto e avaliação de um secador de fluxos cruzados, intermitente e com reversão de ar na secagem de milho (*zea mays* L.)**. Viçosa: UFV, 1986. 106p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1986.
- SAGLIETI, J.R.C. **Rendimento térmico de fornalha a lenha de fluxos cruzados**. Botucatu: UNESP, 1991. 102p. Tese (Doutorado em Agronomia)- Universidade Estadual Paulista, 1991.
- SHAFIZADEH, F. **Pyrolisys andcombustion of cellulosic materials**, New York, v.23. p.417 – 474, 1968.

- SILVA, I D., SILVA, J. N. Projeto, construção e teste de uma fornalha a carvão vegetal para secagem de café despulpado/descascado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.n, n.3, p.301-307, 1998.
- SILVA, J. de S. e, AFONSO, A.D.L., LACERDA FILHO, A.F. Secagem e armazenamento de produtos agrícolas. In: SILVA, J.S. **Pré-processamento de produtos agrícolas**. Juiz de Fora: Instituto Maria, 1995. p.145-161.
- SILVA, J. S. de, SABIONE, P.M., AFONSO, A. D. L., CARVALHO PINTO, F. de. Avaliação de secadores e custos de secagem de produtos agrícolas. **Engenharia na Agricultura**, v.2, n.4. p19,1992.
- SILVA, L.C. **Desenvolvimento e avaliação de um secador de café (Coffea arábica L.) intermitente de fluxos contracorrente**. Viçosa, MG: 74p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1991.
- SINÍCIO, R. **Simulação de secagem de milho em camadas espessas e baixas temperaturas**. Viçosa: UFV, 1983. 64p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1983.
- TOMAZIELLO, R.A., OLIVEIRA, E.G. de, FRANCISCO TOLEDO, J.A. de, **Cultura do café**, Campinas, Fundação Cargill, 1996. 69p.
- THOMPSON, T.L., FOSTER, G.H., PEART, R.M. **Mathematical simulation of corn drying – A new model**. Transaction ASAE, Michigan, v.11, n.4, p.582-586, 1968.
- VALARELLI, I.D. **Desenvolvimento e teste de uma fornalha a resíduos agrícolas, de fogo indireto para secadores de produtos agrícolas**. Botucatu: 1991: 123p. Tese (Doutorado em Agronomia) Universidade Estadual Paulista, 1991.
- VANN EE, G.R., CLAAR II, P.W. **Fundamentals of direct combustion and its potential in agricultural applications**. Ames: Iowa State University, 1981. 19p. (Journal Paper, 2325).
- VIEIRA, G. **Secagem intermitente de café (Coffea arabica L.) em secadores de fluxos cruzados e em secador experimental de camada fixa**. Lavras, UFV, 1994. 91p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) Universidade Federal de Lavras. 1994.
- YOUNG, J.H., DICKENS, J.W. Evaluation of costs for drying grain in batch of cross-flow systems. **Transactions of ASAE**, v.18, n.4, p.734-738, 1975.

Quadro 1-A - Variação da massa específica aparente do café conforme o tempo de secagem nos tratamentos 1 e 2

Tratamento 1			Tratamento 2			
Tempo(h)	Teste 2	Teste 3	Tempo (h)	Teste 1	Tempo (h)	Teste 3
0	500	490	0	475	0	555
4	510	495	4	460	4	538
8	513	504	8	445	8	542
12	513	450	12	430	12	526
16	460	500	16	427	16	459
20	465	490	20	425	20	432
24	470	495	24	424	24	411
28	460	440	28	419	28	415
32	450	430	32	418	32	412
36	465	460	36	417	36	410
40	470	415	40	415	40	406
44	468	410	58	406	54	405
48	470	403	62	403	54	400
52	436	405	63	390		
56	427	400				
60	415	415				
64	414	420				
68	420	421				
72	430	423				
74,5	420					

Quadro 2-A - Variação da massa específica aparente do café conforme o tempo de secagem nos tratamentos 3 e 4

Tratamento 3				Tratamento 4			
Tempo (h)	Teste 2	Tempo (h)	Teste 3	Tempo (h)	Teste 2	Tempo (h)	Teste 3
0	425	0	468	0	520	0	525
4	420	4	464	4	514	4	520
8	410	8	415	8	510	8	515
12	415	12	420	12	505	12	510
16	405	16	415	16	502	16	495
20	400	20	410	20	485	20	480
66	403	24	400	24	470	24	460
70	406	28	405	28	465	28	455
72	410	42	403	32	450	32	450
		46	408	36	438	36	446
		50	400	40	430	40	438
		54	410	44	424	44	435
				48	423	48	431
				52	421	52	426
				56	420	56	420

Quadro 3-A - Variação da massa específica aparente do café conforme a umidade do café durante a secagem para os tratamentos 1 e 2

Tratamento 1				Tratamento 2			
Umidade	Teste 2	Umidade	Teste 3	Umidade	Teste 1	Umidade	Teste 3
46	500	49	490	40,5	475	42	555
43	510	46	495	37	475	40	538
41	513	45	504	34,5	475	38,5	542
35	513	44	450	30,5	430	35	526
30	460	39	500	27	427	32,5	459
30	465	38	490	25,5	425	26,5	432
30	470	26	495	24,5	424	21	411
28	460	32	440	20,5	419	17	415
26	450	29	430	17	418	15,5	412
26	465	24	460	16,5	417	14,5	410
27	470	24	415	15,5	415	13,5	406
23	468	23	410	15	406	12	405
21	470	22	403	14	403	11,5	400
20	436	21	405	13,5	390		
21	427	21	400				
18	415	19	415				
16	414	16	420				
15	420	13	421				
14	430	12	423				
13	420						

Quadro 4-A - Variação da massa específica aparente do café conforme a umidade do café durante a secagem para os tratamentos 3 e 4

Tratamento 3				Tratamento 2			
Umidade	Teste 2	Umidade	Teste 3	Umidade	Teste 2	Umidade	Teste 3
25	425	32	468	41	525	34	520
21	420	28	464	40	520	30,5	514
21	410	27	415	39	515	29,5	510
19	415	26	420	38	510	27	505
15	405	23	415	34	495	25,5	502
15	400	19	410	32	480	23,5	485
15	403	19	400	29	460	20,5	470
14	406	17	405	27	455	19,5	465
13	410	16	403	26	450	19	450
		16	408	25	446	18,5	438
		14	400	24	438	16,5	430
		12	410	19	435	15,5	424
		12	405	18	431	14	423
				16	426	13,5	421
				13	420	12	420

Quadro 5-A - Variação da umidade do café, conforme o tempo de secagem para os tratamentos 2 e 3

Tratamento 2				Tratamento 3			
Tempo (h)	Teste 1	Tempo (h)	Teste 3	Tempo (h)	Teste 2	Tempo (h)	Teste 3
0	40,5	0	42	0	25	0	32
4	37	4	40	4	21	4	28
8	34,5	8	39	8	21	8	27
12	30,5	12	35	12	19	12	26
16	27	16	33	16	15	16	23
20	25,5	20	27	20	15	20	19
24	24,5	24	21	66	14	24	19
28	20,5	28	17	70	14	28	17
32	17	32	16	72	13	42	16
36	16,5	36	15			46	16
40	15,5	40	14			50	14
58	15	54	12			54	12
62	14	54	12				12
63	13,5						

Quadro 6-A - Variação da umidade do café durante a secagem em secador de coluna intermitente de fluxos cruzados para o teste 2 do tratamento 1

Tempo de secagem (h)	Câmara de descanso	Posição da coleta de grãos			
		2,30 m da base do secador		2,80 m da base do secador	
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
0	21	22	22	20	23
4	18	21	20	21	20
8	16	19	18	19	17
12	15	17	15	17	14
16	14	14	13	14	13
20	14	13	12	13	13
24	13	14	13	14	12
26,5	12				

Quadro 7-A - Variação da umidade do café durante a secagem em secador de coluna intermitente de fluxos cruzados para o teste 3 do tratamento 1

Tempo de secagem (h)	Câmara de descanso	Posição da coleta de grãos			
		2,30 m da base do secador		2,80 m da base do secador	
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
0	23	23	22	23	22
4	22	22	21	22	21
8	21	21	20	21	20
12	21	21	20,5	21	20
16	19	19	17	18	17
20	16	16	15	16	15
24	13	14	12	14	12
28	12				

Quadro 8-A - Variação da umidade do café durante a secagem em secador de coluna intermitente de fluxos cruzados para o teste 1 do tratamento 2

Tempo de secagem (h)	Posição da coleta de grãos				
	Câmara de descanso	2,30 m da base do secador		2,80 m da base do secador	
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
16	27	27	23	26,5	25
20	25,5	25,5	22,5	25	23,5
24	24,5	25	21	24,5	22
28	20,5	20,5	17,5	21	21
32	17	17	14	16,5	18,5
36	16,5	16	13,5	16	15
40	15,5	15,5	13	15,5	14,5
62	14	13,5	12	13,5	13
63	13,5	13	11	13	12,5

Quadro 9-A - Variação da umidade do café durante a secagem em secador de coluna intermitente de fluxos cruzados para o teste 3 do tratamento 2

Tempo de secagem (h)	Posição da coleta de grãos				
	Câmara de descanso	2,30 m da base do secador		2,80 m da base do secador	
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
36	14,5	14	13,5	14	13,5
40	13,5	13	12,5	12,5	12
50	12	12,5	12	12	11,5

Quadro 10-A - Variação da umidade do café durante a secagem em secador de coluna intermitente de fluxos cruzados para o teste 2 do tratamento 3

Tempo de secagem (h)	Posição da coleta de grãos				
	Câmara de descanso	2,30 m da base do secador		2,80 m da base do secador	
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
0	25				
4	21	21	20	22	21
8	21	20	19	21	20
12	19	19	18	20	19
16	15	16	15	17	14
20	15	17	13	16	14
66	15	15	15	15	15
70	14	12	11	14	11

Quadro 11-A -Variação da umidade do café durante a secagem em secador de coluna intermitente de fluxos cruzados para o teste 3 do tratamento 3

Tempo de secagem (h)	Posição da coleta de grãos				
	Câmara de descanso	2,30 m da base do secador		2,80 m da base do secador	
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
0	31				
4	28	28	26	29	27
8	27	27	24	26	26
12	26	26	24	26	22
16	23	24	21	22	21
20	19	23	21	21	19
24	19	22	19	20	21
46	16	16	14	16	15
50	14	15	13	14	12
54	12	13	11	13	10
	12				

Quadro 12-A - Temperaturas do ar de exaustão, intergranular e ar de secagem em função do tempo de secagem, determinados no secador horizontal, teste 2, tratamento 1

Tempo de secagem (h)	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 4	Ar de exaustão
4	61	59,3	59	25	26
8	60,1	59	58,8	26	28
12	61,2	60,3	60,1	25	29
14	58,9	58,8	57,9	27	31
16	59,3	58,9	58,3	28	30
18	60	59,3	59,2	30	32
20	59,7	59,5	56,2	31	33
24	60,3	58,3	54,7	33	35
28	59,8	57,5	53,2	33	34
32	59,9	54,9	50,4	35	37
39	60,3	53	49,3	36	39
40	60,2	52,9	48,9	38	39
44	60,1	55,9	49,2	37	40

Quadro 13-A - Temperaturas do ar de exaustão, intergranular e ar de secagem em função do tempo de secagem, determinados no secador de coluna intermitente de fluxos cruzados, teste 2, tratamento 1

Tempo de secagem (h)	Posição dos termopares					
	Ponto 6	exaustão	2,30 m da base do secador		2,80 m da base do secador	
			Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
4	35,2	39	42,9	44,5	41,9	46,9
8	36,5	41	42,8	45,7	41,6	45,1
12	36,6	43	43,1	45,8	42,3	44,2
16	37,2	49	44,9	46,4	43,8	46,9
20	37,8	43	44,8	46,8	43,9	47,2
24	37,9	42	45,7	47,9	45,9	48,3
28	38,5	48	45,9	47,3	44,6	48,1
32	38,8	49	46,5	48,6	45,1	48,9

Quadro 14-A - Temperaturas do ar de exaustão, intergranular e ar de secagem em função do tempo de secagem, determinados no secador horizontal, teste 3, tratamento 1

Tempo de secagem (h)	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 4	Ar de exaustão
4	61	59,3	59	25	26
8	60,1	59	58,8	26	28
12	61,2	60,3	60,1	25	29
14	58,9	58,8	57,9	27	31
16	59,3	58,9	58,3	28	30
18	60	59,3	59,2	30	32
20	59,7	59,5	56,2	31	33
24	60,3	58,3	54,7	33	35
28	59,8	57,5	53,2	33	34
32	59,9	54,9	50,4	35	37
39	60,3	53	49,3	36	39
40	60,2	52,9	48,9	38	39
44	60,1	55,9	49,2	37	40

Quadro 15-A - Temperaturas do ar de exaustão, intergranular e ar de secagem em função do tempo de secagem, determinados no secador de coluna intermitente de fluxos cruzados, teste 3, tratamento 1

Tempo de secagem (h)	Posição dos termopares					
	Ponto 6	exaustão	2,30 m da base do secador		2,80 m da base do secador	
			Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
48	35,2	39	42,9	44,5	41,9	46,9
52	36,5	41	42,8	45,7	41,6	45,1
56	36,6	43	43,1	45,8	42,3	44,2
60	37,2	49	44,9	46,4	43,8	46,9
64	37,8	43	44,8	46,8	43,9	47,2
68	37,9	42	45,7	47,9	45,9	48,3
72	38,5	48	45,9	47,3	44,6	48,1
74,5	38,8	49	46,5	48,6	45,1	48,9

Quadro 16-A - Temperaturas do ar de exaustão, intergranular e ar de secagem em função do tempo de secagem, determinados no secador horizontal, teste 1, tratamento 2

Tempo de secagem (h)	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 4	Ar de exaustão
4	59,7	59,6	59,4	26	29
8	60,2	60	59,2	28	31
12	59,9	59,3	58,8	30	32

Quadro 17-A - Temperaturas do ar de exaustão, intergranular e ar de secagem em função do tempo de secagem, determinados no secador de coluna intermitente de fluxos cruzados, teste 1, tratamento 2

Tempo de secagem (h)	Posição dos termopares					
	Ponto 6	exaustão	2,30 m da base do secador		2,80 m da base do secador	
			Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
16	35,1	35	33,8	36,3	33,6	37,6
20	35,8	38	35,3	38,5	37,5	39,7
24	36,2	40	36,9	38,3	38,8	38,5
28	37,1	43	37	39,4	37,6	40,4
32	37,2	45	39,2	42,3	40,2	41,5
36	37	48	41,4	44,6	41,5	43
38	37,3	48	42,2	44,8	41,9	44,5
59	37,5	49	42,5	45,2	42,9	46,1
63	37	50	43,9	46,4	44,1	46,8

Quadro 18-A - Temperaturas do ar de exaustão, intergranular e ar de secagem em função do tempo de secagem, determinados no secador horizontal, teste 3, tratamento 2

Tempo de secagem (h)	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 4	Ar de exaustão
4	61	60,1	59,7	25,1	27
8	60	59,8	59,3	28	30
12	60	59,9	59,5	30,9	32
16	61	60,2	59,6	31,3	33
20	60	59,7	59,3	32,5	35
24	60	57,8	56,8	34,4	36
28	58,6	56,3	53,8	35,3	38
32	58	52,4	50,2	35,2	39

Quadro 19-A - Temperaturas do ar de exaustão, intergranular e ar de secagem em função do tempo de secagem, determinados no secador de coluna intermitente de fluxos cruzados, teste 3, tratamento 2

Tempo de secagem (h)	Posição dos termopares					
	Ponto 6	exaustão	2,30 m da base do secador		2,80 m da base do secador	
			Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
4	36,9	42	36,8	38,3	37,5	39
8	37,4	45	37,5	41,2	38,4	42,8
12	37,8	47	39,6	43,5	40,8	44,7

Quadro 20A - Temperaturas do ar de exaustão, intergranular e ar de secagem em função do tempo de secagem, determinados no secador de coluna intermitente de fluxos cruzados, teste 2, tratamento 3

Tempo de secagem (h)	Posição dos termopares					
	Ponto 6	exaustão	2,30 m da base do secador		2,80 m da base do secador	
			Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
4	28,2	32	33,3	37,2	34,1	38,6
8	31,5	35	37,5	40,9	38,8	39,8
12	34	39	40,8	43,7	40,2	41,5
16	35,2	40	43,2	45,8	43,5	43,2
20	35,4	44	45,1	47,3	44,3	46,3
70	37	46	47,4	48,5	47	47,9

Quadro 21-A -Temperaturas do ar de exaustão, intergranular e ar de secagem em função do tempo de secagem, determinados no secador de coluna intermitente de fluxos cruzados, teste 3, tratamento 3

Tempo de secagem (h)	Posição dos termopares					
	Ponto 6	exaustão	2,30 m da base do secador		2,80 m da base do secador	
			Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4
4	32,3	36	34,8	37,3	33,9	37,5
8	33,2	37	35,6	39,6	35,2	39,7
12	34,5	39	37,4	40,2	37	40,4
16	35	40	38,3	41,3	38,6	41,5
20	35,2	42	39,2	42,4	39,3	42,9
24	36	42	39,7	43,3	39,8	43,8
28	36,8	43	40,3	44,5	40,6	45
46	37	44	43,2	46,2	43,5	47
50	36,8	45	46	47,1	45,8	47,5
54	36,9	47	48,4	48,7	48	48

Quadro 22-A - Temperaturas do ar de exaustão, intergranular e ar de secagem em função do tempo de secagem, determinados no secador horizontal, teste 2, tratamento 4

Tempo de secagem (h)	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 4	Ar de exaustão
4	61,5	60,4	60,1	32,1	34,3
8	61,2	61	59,8	34,8	36,5
12	60,4	59,8	59,6	35,9	37,8
16	61,3	60,1	59,8	36,7	39,4
20	60,1	59,8	57,6	38	41,3
24	59,8	57,8	54,5	39,7	42,8
28	60,3	56,3	52,8	40,3	43,4
32	59,7	54,4	50,2	41,4	44,5
36	60,1	55,2	49,8	43,6	45,8
40	60,4	56,5	46,7	44,1	46,5
44	60	56,8	48,8	45,2	47,1
48	59,8	55,3	49,5	46,2	48,8
52	59,9	54	48,3	48,3	50,3
56	60,1	56,1	47,1	48,5	

Quadro 23-A - Temperaturas do ar de exaustão, intergranular e ar de secagem em função do tempo de secagem, determinados no secador horizontal, teste 3, tratamento 4

Tempo de secagem (h)	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 4	Ar de exaustão
4	61,1	60,4	59,8	33,8	34,5
8	60,3	59,9	60,1	35,7	37,8
12	59,6	59,4	59,3	38,5	39,3
16	60,2	60,1	57,8	40,9	43,4
20	60,3	59,4	56,3	42,7	44,5
24	60,8	56,7	54,9	43,2	45,2
28	60	54,2	53,1	45,8	47
32	59,6	54,8	52,8	47,2	48
36	59,8	52,9	49,3	48,3	49,3
40	60	54	47,1	49,6	50,3
44	60,1	55,3	48,3	50,1	52,8