

DOUGLAS ROMEU DA COSTA

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA SECAGEM DE MILHO EM
SECADORES ROTATIVOS

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL

2006

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

T

C837a
2006

Costa, Douglas Romeu da, 1980-

Análise técnica e econômica da secagem de milho em
secadores rotativos / Douglas Romeu da Costa – Viçosa :
UFV, 2006.

viii, 64f. : il. ; 29cm.

Orientador: Adílio Flauzino de Lacerda Filho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 50-53.

1. Equipamento de secagem - Avaliação. 2. Milho -
Secagem. 3. Milho - Secagem - Custos. 4. Milho - Qua-
lidade. Universidade Federal de Viçosa. II.Título.

CDD 22.ed. 631.3

DOUGLAS ROMEU DA COSTA

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA SECAGEM DE MILHO EM
SECADORES ROTATIVOS

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

Aprovada em 28 de setembro de 2006.

Prof. Evandro de Castro Melo

Dr. Sérgio Maurício Lopes Donzeles

Prof. Juarez de Sousa e Silva
(Co-orientador)

Prof. Paulo Marcos de Barros Monteiro

Prof. Adílio Flauzino de Lacerda Filho
(Orientador)

À minha família, pelo apoio incondicional, respeito, confiança, honestidade.

Especialmente aos meus pais, pelo amor, exemplo de vida, trabalho, confiança, respeito e honestidade.

À minha noiva Rosana C. Santos, pelo amor, carinho, confiança, amizade, paciência e compreensão.

dedico

AGRADECIMENTO

À DEUS, pela vida.

À Universidade Federal de Viçosa, por permitir a realização deste curso.

Ao professor Adílio Flauzino de Lacerda Filho, pela orientação, amizade, respeito, estímulo e pela dedicação no desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Juarez de Sousa e Silva e Daniel Marçal de Queiroz, pelo apoio, pela amizade e pelas sugestões e ensinamentos.

Aos professores Delly Oliveira Filho, José Helvécio Martins e Paulo Marcos de Barros Monteiro, pelo apoio, amizade, e pelos ensinamentos.

Aos professores do DEA, que contribuíram diretamente pelo sucesso deste trabalho.

Aos meus amigos de infância, pela convivência e pela amizade durante o Programa.

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

Aos funcionários do DEA, pela amizade e pelo apoio, especialmente os funcionários da Área de Pré-processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas.

Aos meus colegas e amigos da Pós Graduação, pela ajuda, pelo apoio e pela amizade.

Aos estagiários, pela ajuda, pelo apoio e pela amizade.

À Empresa Rio Branco Alimentos (Pif-Paf), por ter cedido o milho para a realização do experimento.

À Drumond Tubulações, por ter fornecido o sistema de aquecimento a gás utilizado no experimento.

À SHV Gás Brasil, por ter colaborado com o fornecimento de gás para a realização do experimento.

BIOGRAFIA

DOUGLAS ROMEU DA COSTA, filho de Expedito Natividade da Costa e Izabel Maria da Silva Costa, nasceu em Viçosa, Minas Gerais, em 09 de junho de 1980.

Em abril de 1999, ingressou no curso de Engenharia Agrícola transferindo-se em abril de 2000 para o curso de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal de Viçosa, MG, concluindo-o em julho de 2004.

Em agosto de 2004, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado em Engenharia Agrícola, defendendo tese em setembro de 2006.

SUMÁRIO

Página

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Secador rotativo	4
2.2. Sistema de aquecimento	5
2.2.1. Combustão	5
2.2.2. Gerador de calor a gás	5
2.2.3. Gás liquefeito de petróleo (GLP)	6
2.3. Análise energética dos sistemas de secagem	7
2.4. Qualidade de grãos	9
2.5. Análise do custo operacional de secagem	11
3. MATERIAL E MÉTODOS	15
3.1. Descrição dos tratamentos	16
3.2. Condições operacionais do experimento	17
3.2.1. Movimentação dos grãos	17
3.2.2. Movimentação do ar	18
3.3. Sistemas de secagem	18
3.3.1. Descrição do secador comercial	18
3.3.2. Secador rotativo modificado	19
3.3.3. Gerador de calor a gás	20
3.4. Análise do custo operacional dos sistemas de secagem	21
3.5. Monitoramento das variáveis experimentais	22
3.5.1. Umidade	22
3.5.1.1. Umidade relativa	22
3.5.1.2. Teor de água dos grãos	22
3.5.2. Tempo	23
3.5.3. Amostragem do produto	23
3.5.4. Temperatura	23
3.5.5. Vazão e pressão estática do ar	24
3.6. Energia	24
3.6.1. Consumo específico de energia do secador	24
3.6.2. Uso de eletricidade	25
3.6.3. Uso de combustível	26

3.7.	Análise de qualidade do milho.....	26
3.7.1.	Massa específica aparente	26
3.7.2.	Índice de susceptibilidade à quebra.....	26
3.7.3.	Porcentagem de trincas.....	27
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1.	Temperatura do ar de secagem, do ar de exaustão, do ar ambiente, da massa de grãos e umidade relativa ambiente	28
4.2.	Teor de água e massa específica aparente.....	32
4.3.	Análise do desempenho energético dos sistemas de secagem	35
4.3.1.	Consumo de energia elétrica	41
4.3.2.	Consumo de GLP	42
4.4.	Análise de qualidade do produto após a secagem.....	42
4.4.1.	Susceptibilidade à quebra (SQ).....	42
4.4.2.	Índices de trincas.....	43
4.5.	Análise de custo	45
5.	CONCLUSÕES	49
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
7.	APÊNDICE.....	54

RESUMO

COSTA, Douglas Romeu da, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, setembro de 2006. **Análise técnica e econômica da secagem de milho em secadores rotativos.** Orientador: Adílio Flauzino de Lacerda Filho. Co-orientadores: Juarez de Sousa e Silva e Daniel Marçal de Queiroz.

Objetivou-se com este trabalho, analisar a viabilidade do uso de secadores rotativos, com distribuição radial de ar, utilizados na cafeicultura, para a secagem de milho. Avaliou-se o consumo de energia, o custo de secagem e a qualidade final do produto. A temperatura do ar de secagem foi controlada em 80 e 100 °C. Os sistemas de secagem foram compostos por um secador rotativo comercial e um secador rotativo modificado. Utilizou-se o GLP para aquecimento complementar do ar de secagem. O milho em grãos (*Zea mays L.*), com teor inicial de água de aproximadamente 19,5% b.u., foi usado no experimento. Para a avaliação da eficiência energética dos sistemas de secagem, foram determinados o consumo específico de energia, os consumos de combustível e de energia elétrica. Pelos resultados, verificou-se menor consumo específico de energia no secador rotativo modificado. As modificações técnicas realizadas no gerador de calor a gás, proporcionaram redução média no consumo de combustível em aproximadamente 50%. A susceptibilidade à quebra do produto foi inferior a 5%. A percentagem média de trinca total do milho no secador comercial (SC 80 e SC 100) foi 17,6% superior àquela obtida com secador modificado (SM 80 e SM 100). O custo de secagem foi 2,2% menor no secador modificado que no secador comercial.

ABSTRACT

COSTA, Douglas Romeu da, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, September 2006.
Technical and economic analysis of corn drying in rotary dryers. Adviser: Adílio Flauzino de Lacerda Filho. Co-advisers: Juarez de Sousa e Silva and Daniel Marçal de Queiroz.

The objective of this work was to analyze the feasibility of rotary dryers with radial air distribution, which is used in coffee processing, for corn drying. Energy consumption, drying cost and final quality of the product were evaluated. The drying air temperature was maintained at 80 and 100 °C. The drying systems consisted of a commercial rotary dryer and a modified rotary dryer. LPG was used for complementing heating of the drying air. Corn grains (*Zea mays* L.) with initial moisture content of approximately 19.5% b.u. were used in the experiment. The specific energy consumption and consumption of fuel and electric energy were determined for the evaluation of the energy efficiency of the drying systems. The results showed lower specific energy consumption for the modified rotary dryer. The technical modifications carried out in the gas heat generator provided mean reduction in the fuel consumption of approximately 50%. The breakage susceptibility of corn grains was below 5%. The mean percentage of total corn cracking in the commercial dryer (SC 80 and SC 100) was 17.6% higher than the obtained with the modified dryer (SM 80 and SM 100). The drying cost in the modified dryer was 2.2% lower than in the commercial dryer.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de milho, superado pelos Estados Unidos e China que são, também, os principais consumidores (CONAB, 2006). A estimativa de produção de milho no Brasil, safra 2005/2006, foi de aproximadamente 40,8 milhões de toneladas, com área plantada de 12,55 milhões de hectares. Os estados do Paraná e Minas Gerais são os que mais contribuem para esta produção, com 10,57 e 5,5 milhões de toneladas, respectivamente. Estima-se que do total de grãos produzidos no país, na safra 2005/2006, o milho contribuiu com 33,7%, superado apenas pela produção de soja, 45,6% (CONAB, 2006).

Segundo Santos e Mantovani, citados por SANTOS et al. (1997), o milho é um produto nobre e de essencial importância, principalmente para o pequeno agricultor. De toda produção brasileira, aproximadamente 45,7% permanecem armazenadas nas propriedades, em paióis, na forma de milho na espiga com palha, para alimentação de animais domésticos ou posterior comercialização.

Com o crescimento da produção desse cereal e com a exigência, cada vez maior, da qualidade do produto no mercado nacional e internacional, torna-se necessário o desenvolvimento de sistemas de secagem eficientes e que mantenham a qualidade dos grãos.

A secagem artificial é o processo mais econômico para manutenção da qualidade de grãos agrícolas. O sistema de secagem natural é muitas vezes dificultado devido às condições do ambiente, fazendo com que se elevem o período de secagem e as chances de deterioração do produto. Desta forma, este processo torna-se ineficiente e pode proporcionar perdas de qualidade do produto (CARDOSO SOBRINHO, 2001).

A importância da secagem de produtos agrícolas cresce com o incremento da produção, pois permite antecipar a colheita e o armazenamento dos produtos sem o risco de deterioração; conserva o poder germinativo das sementes durante longo período; auxilia no controle de microrganismos e insetos; e minimiza a perda do produto no campo (SILVA, 2000).

Os secadores rotativos com distribuição radial do fluxo de ar existentes no mercado foram projetados para a secagem de café. Porém, muitos cafeicultores são também produtores de milho, e devido ao desconhecimento da possibilidade de uso desses secadores para a secagem do milho e por este produto apresentar menor valor unitário, não têm utilizado esse secador para esse cereal. Deve-se ressaltar que nenhum trabalho até o momento mostrou a utilização do secador rotativo para a secagem desse produto.

O GLP (gás liquefeito de petróleo) tem sido utilizado na secagem de grãos por ser um combustível altamente energético e proporcionar vantagens como o melhor ajuste na vazão de combustível, permitindo melhor controle da temperatura do ar de secagem. O principal problema quanto ao uso desse combustível reside-se na adaptação dos mecanismos de queima, considerando-se que, em muitos casos, os sistemas secador-gerador de calor não apresentam desempenhos satisfatórios.

Baseando-se nestas considerações, objetivou-se com esse trabalho avaliar um secador amplamente utilizado na cafeicultura (tipo rotativo), para a secagem de milho. Especificamente objetivou-se:

- a) avaliar um secador rotativo, com modificação no sistema radial de distribuição de ar, em comparação com o sistema original de fábrica;
- b) avaliar o sistema modificado, operando com intermitência;
- c) avaliar os sistemas com a queima de GLP e propor alterações, se necessárias;
- d) avaliar a qualidade final do produto;
- e) estimar o custo operacional dos sistemas em estudo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Os sistemas de secagem, basicamente se dividem em dois processos: natural e artificial.

No sistema natural, a secagem do produto ocorre na própria planta, sem a interferência do homem. Este processo de secagem começa logo após a maturação fisiológica dos grãos, quando estes apresentam elevado teor de água. A movimentação do ar é feita pela ação do vento e a energia para a evaporação de umidade provém da incidência da energia solar. Embora com o passar do tempo, alcance o teor de água adequado para a armazenagem, o produto fica sujeito à infestação por pragas, ao tombamento de plantas e às intempéries, que contribuem para acarretar grandes perdas quali-quantitativas.

O sistema de secagem artificial se caracteriza pela utilização de processos manuais ou mecânicos. Este sistema de secagem possibilita reduzir o tempo de operação, além de permitir a manutenção da qualidade do produto (SILVA, 2000).

Dentre os métodos utilizados para conservação de grãos, a secagem é o mais econômico, não só sob o ponto de vista de processamento, mas também por permitir a preservação do produto, em ambiente natural, durante longo período de tempo (LACERDA FILHO, 1998).

Brooker et al. (1992), afirmaram que, na seqüência de colheita, secagem, armazenagem, manuseio e transporte durante o processamento de grãos, a secagem é a operação crítica. Os autores consideraram que, quando inadequada, a secagem constitui a principal causa de deterioração dos grãos. Especificamente, ela pode ser responsável pelo aumento da susceptibilidade de quebra no milho e na soja, e pelo decréscimo na qualidade de moagem do trigo e arroz. Concluíram que a secagem requer mais de 60,0% do total de energia utilizada na produção, enquanto os tratos culturais consomem 16,0%, o plantio e cultivos 12,0%, a colheita 6,0% e o transporte 6,0%.

A secagem de grãos pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem. A remoção do teor de água deve ser feita a nível tal que os grãos permaneçam em equilíbrio com ar do ambiente onde serão armazenados. Além disso, esse processo deve ocorrer de maneira a preservar a aparência e a qualidade nutritiva dos grãos como alimento, e sua viabilidade como semente (SILVA et al., 2000). Informam, também, que o processo de secagem pode ser dividido em um período de razão constante e períodos de razões decrescentes. O período de razão constante ocorre no início da secagem, com produto úmido. A água se escoia na fase líquida sob gradiente hidráulico. Há decréscimo no diâmetro dos poros e capilares e, conseqüentemente, decréscimo no volume do produto, aproximadamente igual ao volume de água evaporada. Este período, que já ocorreu no campo, não é observado nos produtos agrícolas durante o processo de secagem devido os grãos já se encontrarem em algum dos períodos de razão decrescente.

2.1. Secador rotativo

O secador rotativo é formado por um cilindro tubular horizontal ou ligeiramente inclinado que gira em torno de seu eixo longitudinal a uma velocidade angular que varia entre 1 e 15 rpm. O produto, com elevado teor de água, é carregado pela parte mais elevada do secador, por meio de um transportador, e descarregado na parte mais baixa, por gravidade. O ar de secagem é injetado numa câmara situada no centro do cilindro e flui radialmente através da massa de grãos. A utilização deste equipamento para a secagem de produtos agrícolas possibilita as seguintes vantagens: proporciona a pré-limpeza e a secagem, simultaneamente. As desvantagens são a baixa eficiência energética e o alto custo de investimento (SILVA et al., 2000).

Quanto ao carregamento do secador rotativo, é recomendado deixar um espaço vazio na posição superior do cilindro rotativo, entre 0,2 e 0,3 m, para possibilitar a movimentação dos grãos durante o processo de secagem (BÁRTHOLO et al., 1989 e CHALFOUN e CARVALHO, 1997).

MENDES et al. (1995), sem especificar o tipo de café em processamento, comentaram a possibilidade de utilização dos secadores rotativos de diferentes maneiras: a) como pré-secador – trabalha, inicialmente com ar à temperatura ambiente, durante 2 horas, permitindo a evaporação da água superficial; a seguir, aquece o ar até 60 °C e reduz o teor de água do produto até que os grãos adquiram fluidez, permitindo que a secagem seja concluída em secadores verticais (30 a 35 %% b.u.); b) secagem complementar – após a pré-secagem em terreiro, a secagem é concluída no secador

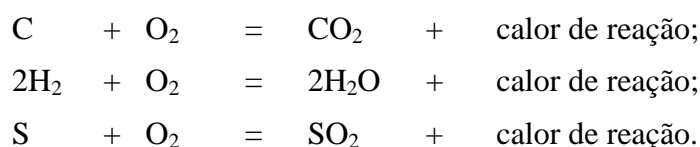
rotativo com o ar à temperatura igual a 90 °C; e c) secagem completa – faz-se a pré-secagem no próprio secador rotativo conforme explicado anteriormente e, em seguida, eleva-se a temperatura do ar até 90 °C, concluindo o processo.

2.2. Sistema de aquecimento

2.2.1. Combustão

A combustão ou queima direta pode ser definida como o processo de reações químicas exotérmicas que envolvem a oxidação completa de um combustível. Para que este processo ocorra devem estar disponíveis, simultaneamente, os seguintes fatores: combustível, comburente e temperatura de ignição. Uma combustão eficiente ocorre quando todos os elementos dos combustíveis resultantes do processo de queima são totalmente transformados em dióxido de carbono, água e calor (SILVA et al., 2000).

A combustão completa ocorre quando, na câmara de combustão, há oxigênio na quantidade suficiente para a oxidação completa de todos os elementos do combustível. Neste caso, os elementos químicos combustíveis reagem com o oxigênio do ar formando os produtos de combustão, segundo as seguintes reações químicas:



Com excesso de ar na câmara de combustão, os produtos de combustão irão conter excesso de oxigênio. Se a quantidade de ar fornecida à câmara de combustão for menor que a necessária, a combustão será incompleta. A falta de ar influi a reação da queima do carbono e aparecerá monóxido de carbono nos produtos de combustão. O monóxido de carbono é um gás combustível, pois ao reagir com o oxigênio do ar pode liberar calor. Por isso, no caso de combustão incompleta, o aproveitamento do combustível e o rendimento de uma fornalha ou um gerador de calor a gás irão diminuir (VLASSOV, 2001).

2.2.2. Gerador de calor a gás

Por definição, o gerador de calor a gás é um dispositivo que deve assegurar a pulverização e a mistura do combustível com o ar. A construção do gerador de calor a gás depende de vários fatores, sendo os principais o consumo do combustível e do ar, as

pressões disponíveis do combustível e do ar na entrada do gerador de calor, as temperaturas destes e o comprimento da chama. Na prática este valor varia de 0,5 até alguns metros. Se quisermos diminuir o comprimento da chama será necessário aumentar a turbulência do fluxo da mistura, usar pré-aquecimento do ar e do combustível, aumentar a temperatura na câmara, diminuir o consumo de combustível – ar e usar combustível com maior poder calorífico (VLASSOV, 2001).

Qualquer combustível apresentará queima completa e rápida somente quando forem criadas condições necessárias e adequadas. O processo de pulverização geralmente ocorre devido à ação recíproca dos escoamentos do combustível e do ar, no gerador de calor. Para a atomização mais fina são usados dispositivos especiais, chamados pulverizadores ou bicos. O pulverizador propriamente dito, em conjunto com um canal para o fornecimento de ar e um dispositivo para turbilhonar o escoamento do ar, formam um gerador de calor a gás (VLASSOV, 2001).

A turbulência inicial pode ser causada pelo gerador de calor e o seu desenvolvimento pode ser alterado pela proximidade das paredes da câmara. Além de fazer a mistura do combustível e do oxidante, a turbulência faz com que os gases quentes e os intermediários da chama retornem para a zona de ignição, com a conseqüente redução no tempo de ignição. O mecanismo de introdução do ar secundário também influencia a forma, a intensidade e a estabilidade da chama. Se for introduzido com alta velocidade, aumentará a turbulência, reduzindo o tamanho da chama propiciando-lhe mais intensidade e estabilidade. Se o ar secundário é adicionado com velocidade excessiva proporcionará queima lenta, resultando em resfriamento brusco. Portanto, o ar deve ser adicionado em etapas. Do mesmo modo, o ar secundário em excesso pode ter um efeito de esfriamento em qualquer chama. Este efeito pode ser reduzido se usarmos ar secundário quente (BIZZO, 2003).

2.2.3. Gás liquefeito de petróleo (GLP)

O GLP é conhecido como "gás de cozinha", devido à sua 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, em empilhadeiras utilizadas em armazéns de cereais e indústrias e, mais recentemente, em geradores de calor instalados em secadores de grãos (CARDOSO SOBRINHO, 2001).

Segundo Weber, citado por PORTELLA e EICHELBERGER (2001), sistemas de secagem que utilizam combustíveis líquidos ou gasosos, como o GLP e gás natural

(GN), oferecem vantagens como a simplicidade de operação e a facilidade no controle da temperatura do ar por automação.

SILVA et al. (2003) comentaram que na utilização do GLP, devido à praticidade de operação dos geradores de calor, reduz parcialmente a mão-de-obra relativa à supervisão do operador, uma vez que o sistema de automação proporciona manutenção constante da temperatura. Além disso, os autores citaram outras características favoráveis à utilização deste combustível na secagem de grãos, que são: a não ocorrência da carbonização nos defletores instalados na saída dos geradores de calor de combustíveis líquidos e ao longo dos condutos de ar quente, por ser de combustão completa; elevado poder calorífico ($47.440 \text{ kJ.kg}^{-1}$) em relação à lenha ($19.000 \text{ kJ.kg}^{-1}$); ausência de fuligens e partículas incandescentes, que ocasionam riscos de incêndio; não há deposição de partículas (fumaça, fuligem) sobre os grãos; proporcionam menor manutenção do sistema pela ausência de partículas de carbono; aumento da vida útil do equipamento pela ausência de enxofre nos gases de combustão, que é corrosivo e danifica as estruturas do secador; necessita de menor tempo para estabilizar o regime de operação e, necessita de menor uso de mão-de-obra.

Segundo Hutt et al., citados por PORTELLA e EICHELBERGER (2001), atualmente, nas relações de mercado de grãos, a segurança alimentar está assumindo grande importância. Os materiais orgânicos apresentam combustão difícil e incompleta, liberando grande quantidade de fuligem, fumaça e produtos químicos, alguns comprovadamente nocivos à saúde humana, destacando-se o alcatrão. Por vezes ocorre a impregnação desses contaminantes no produto, conferindo-lhe cheiro e paladar desagradáveis. Em razão disso, a utilização do GLP na secagem de grãos têm aumentado, resultando em menor contaminação dos grãos.

2.3. Análise energética dos sistemas de secagem

A globalização da economia e a atual política de preços impostas aos produtos agrícolas levaram os produtores a análises mais detalhadas dos sistemas de secagem. Em um contexto de alto custo de energia e baixos preços dos produtos agrícolas, torna-se indispensável considerar as relações entre consumo de energia e as qualidades inerentes ao produto, antes e após o processamento (LACERDA FILHO, 1998).

Hall (1972) definiu três expressões para a eficiência de energia nos processos de secagem, eficiência de combustível, eficiência térmica e eficiência de secagem. A eficiência de combustível é a razão entre a energia utilizada na evaporação da água e a energia fornecida ao sistema. A energia total corresponde à soma de energia para

aquecer o ar, operar o secador, resfriar e movimentar o produto, a partir de determinadas condições iniciais. A eficiência térmica é a razão entre o calor utilizado na secagem e o calor fornecido, relacionando-se apenas o processo térmico.

BAKKER-ARKEMA et al. (1978) propuseram uma metodologia para a análise do desempenho de secadores com base em um número reduzido de testes de campo, sob 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 análise da qualidade dos grãos secos complementa os testes de campo.

SANTOS (2002), estudando a modificação e avaliando um secador rotativo horizontal com distribuição radial do fluxo de ar para secagem de café, concluiu que o secador rotativo modificado apresentou menor consumo específico de energia em comparação ao secador rotativo comercial, o consumo de energia elétrica para a movimentação dos grãos foi 91% menor para o secador modificado em comparação ao secador comercial, o tempo de secagem não foi alterado em função da modificação na distribuição do ar e na movimentação dos grãos, o consumo de combustível no secador rotativo comercial foi maior que no modificado, devido o aquecimento indireto do ar e a qualidade do produto final foi igual para os dois secadores.

SABIONI (1986) projetou e avaliou um secador de fluxos cruzados, intermitente e com reversão do fluxo de ar, para secagem de milho e concluiu que as eficiências energéticas médias de secagem para as temperaturas de 60, 80 e 100 °C foram, respectivamente, de 6.638, 6.432 e 5.608 kJ.kg⁻¹ de água evaporada.

LACERDA FILHO (1986), trabalhando com café em sistemas de leito fixo e de fluxos concorrentes, na secagem de café natural, obteve eficiências de 16.215,8 e 12.541,5 kJ.kg⁻¹ de água evaporada, respectivamente.

LACERDA FILHO (1999), analisando um sistema de secagem de sementes de milho em espigas e a granel em secadores de camadas fixas, utilizando-se sabugo de milho como combustível, obteve eficiências energéticas de 12.967,76; 30.220,2; e 25.213,7 kJ.kg⁻¹ de água evaporada para três tratamentos distintos.

CARDOSO SOBRINHO (2001), trabalhando com secador rotativo com capacidade de 15 m³ e temperatura do ar de secagem a 60 °C, para secagem de café em coco, obteve valores médios de consumo específico de energia de 14.817,8; 16.211,5 e 19.946,0 kJ.kg⁻¹ de água evaporada para redução do teor de água de 39,0 para 11,0; 41,0 para 11,0 e 34,0 para 12,0% b.u., respectivamente.

OCTAVIANI (2005), secando café cereja descascado desmucilado com teores médios inicial e final de água de 47,6 e 12,3% b.u., em secador rotativo com capacidade

estática igual a $7,5 \text{ m}^3$, obteve consumos médios de GLP que variaram de 7,6 a 10,25 kg de gás por hora para um tempo médio de secagem de 33 e 30 h respectivamente.

OCTAVIANI (2000), secando café em pergaminho com teores médios inicial e final de água de 49,4 e 13,0% b.u., em secador rotativo - SRE 075, com capacidade estática igual a $7,5 \text{ m}^3$, e temperatura média do ar de secagem e vazão de ar que variaram, respectivamente, entre 66,1 e 106,4 °C e 82,4 e 105,6 $\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, obteve consumos de GLP que variaram de 6,49 a 8,7 kg de gás por hora. Concluiu que os menores consumos de GLP e o menor custo energético (considerando GLP e energia elétrica) foram obtidos quando se utilizou maiores fluxos de ar combinados com maiores temperaturas.

PORTELLA e EICHELBERGER (2001), estudando o desempenho de um secador estacionário de leito fixo, utilizando-se gás liquefeito de petróleo em secagens de milho com teor inicial e final de água de 18 e 13% b.u., massa inicial de grãos de 1400 kg e temperaturas do ar de secagem de 40, 70 e 100 °C obtiveram, respectivamente, consumos de GLP de 0,73; 1,64 e 2,03 $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$.

REINATO et al. (2003) avaliaram o desempenho de geradores de calor de GLP em secagens de café cereja com teores iniciais e finais de água de 38,0 e 13,5% b.u. e 22,0 e 11,6% b.u., em secadores rotativos com capacidade para 15 m^3 e observaram que a utilização dos mesmos, de maneira contínua, ao longo do processo de secagem, proporcionou consumos de GLP que variaram, respectivamente, de 4,8 a 6,5 $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$, além de um menor tempo de secagem e da redução de 14,3% no custo total do processo.

2.4. Qualidade de grãos

A qualidade de grãos, segundo BROOKER et al. (1992), é um termo polêmico devido seu significado depender do uso final e da finalidade do produto. Afirmam que diversos fatores são requeridos para a obtenção de grãos de alta qualidade, como as condições ambientais durante o seu desenvolvimento, as características da espécie e da variedade, o período e o sistema de colheita, o sistema de secagem, as práticas de armazenagem e o procedimento de transporte. Citaram também que, a temperatura, a umidade relativa, a velocidade do ar de secagem, a taxa de secagem do produto, os teores inicial e final de água do produto, o sistema de secagem empregado e o tempo de residência do produto na câmara de secagem, são os principais parâmetros que podem estar associados à redução da qualidade dos grãos e sementes.

BAKKER-ARKEMA (1999), comentou sobre a dificuldade em se definir os parâmetros necessários para estabelecer a qualidade dos grãos, devido os diferentes

conceitos apresentados em função do uso final do produto. Os criadores de animais domésticos priorizam o valor nutritivo e os produtores de sementes se importam pela viabilidade. Os processadores de cereais se interessam pelas propriedades físicas e químicas do produto, tais como a susceptibilidade à quebra e trincas, o teor de água, massa específica aparente, os índices de danos (mecânicos, físicos e biológicos), o valor nutritivo como proteínas, energia, vitaminas, contaminação por aflatoxina, resíduos, teor de impurezas e odores deixados por insetos, roedores e pássaros, dentre outros.

Até recentemente, o consumo de energia e o rendimento de um secador eram os parâmetros de maior ênfase na escolha do sistema de secagem e segundo CORDEIRO, (1982) muitos trabalhos foram feitos com os objetivos únicos de racionalização e conservação de energia. Atualmente, os danos mecânicos ao produto, causados pelos sistemas de secagem e a redução na qualidade do produto têm sido assunto de importância entre pesquisadores, processadores e fabricantes de equipamentos.

FRANCESCHINI et al. (1996) analisaram a qualidade do milho BR-201 submetido à secagem em secador protótipo de camada delgada. Utilizaram-se quatro níveis de temperatura do ar de secagem (40, 60, 80 e 100 °C) e quatro níveis de teor inicial de água (27, 25, 23 e 21% b.u.). Concluíram que ocorreu decréscimo da percentagem de germinação com o aumento da taxa de secagem dos grãos e que o aumento da temperatura do ar de secagem e do teor inicial de água dos grãos proporcionou aumento do índice de suscetibilidade à quebra.

BROOKER et al. (1992) afirmaram que, no processo de secagem em alta temperatura e especialmente nos níveis críticos de umidade de 18 a 15% b.u., a redução do teor de água do milho entre 4 a 5% por passagem da secagem, limita o aumento de trincas da semente. Um efeito benéfico é obtido quando a taxa de secagem do milho não excede 4-5 pontos percentuais por hora. Herter e Burris, citados por CAVARIANI (1996), afirmaram que a alta velocidade de secagem, representada pela taxa de 2% por hora, obtida por meio de expressivo fornecimento de calor à massa de sementes, seria a principal geradora de danos. Além disso, SILVA et al. (2000) enfatizaram que além da temperatura do ar de secagem, outros fatores podem elevar a susceptibilidade à trincas e à quebra dos grãos, dentre eles o sistema de secagem utilizado, o teor inicial de água do produto e a taxa de resfriamento. Estes autores afirmaram que, em geral, a susceptibilidade às trincas e à quebra diminui à medida que os grãos submetidos à secagem apresentam teores iniciais de água mais baixos. Sugerem que, apesar de a secagem artificial do milho ser um processo rápido e cômodo, a temperatura máxima de secagem deve ser aquela que não prejudica a qualidade do produto, devendo, portanto

considerar a finalidade do milho, ou seja, para semente, indústria ou alimentação animal (Tabela 1).

Tabela 1 – Temperatura no grão, do ar de secagem e teor máximo de água para armazenamento e classificação do milho, de acordo com a finalidade do produto

Finalidade do produto	Temperatura máxima (°C)		Teor de água (% b.u.)		
	Grão	Ar	1 ano	5 anos	Classificação
Semente	44	74	13	11	14,5
Amido	55	85	-	-	-
Ração	82	112	-	-	-

Fonte: SILVA et al., 2000.

ALVES et al. (2001) estudaram a qualidade dos grãos de milho, híbrido duplo AG 1051, em função da umidade de colheita (25, 22, 16,5, e 15% b.u.) e da temperatura do ar de secagem (40, 60, 80 e 100 °C). Concluíram que o índice de trincas dos grãos de milho tornou-se maior com o aumento da temperatura do ar de secagem e do teor de água na colheita e que grãos colhidos com teor de água entre 15 e 16,5% b.u. e secados com temperatura do ar de 40 °C foram os que apresentaram os menores valores de susceptibilidade à quebra.

No estudo de SABIONI (1986) foi mostrado que, utilizando-se temperaturas do ar de secagem de 60, 80 e 100 °C, o secador não afetou, significativamente, o índice de susceptibilidade à quebra do milho testado e que as percentagens médias de germinação (87, 42 e 13%) e trincas (84, 72 e 86%) obtidas não diferiram das verificadas em outros sistemas de secagem em alta temperatura.

Já no estudo de CARDOSO SOBRINHO (2001) foi mostrado que, a qualidade do café secado no secador mecânico foi igual à do produto, do mesmo lote, secado em terreiro de cimento.

2.5. Análise do custo operacional de secagem

Na produção de grãos, a secagem, no caso específico do milho, pode representar até 50% do total de energia utilizada. As operações de secagem e armazenagem, quando conduzidas corretamente e com equipamentos eficientes, contribuem significativamente para a redução do custo operacional, em razão da economia de energia que propiciam (LOPES et al., 2000).

Dentre outros autores, afirmativas de YOUNG e DICKENS (1975) são reforçadas por PORTELLA e EICHELBERGER (2001) que, trabalhando com secador estacionário de leito fixo, utilizando gás liquefeito de petróleo (GLP) em secagens de milho, concluíram que os custos de combustível e de energia elétrica foram menores quando a temperatura do ar de secagem foi mais elevada e com menor teor de água dos grãos e que o custo energético total foi 23% menor quando aumentou a temperatura do ar de secagem de 40 para 70 °C e 13% menor quando esse aumento foi de 70 para 100 °C.

Mesmo sendo intensamente realizada por pesquisadores, a estimativa do custo de secagem não constitui, no Brasil, rotina das unidades de beneficiamento ou secagem de grãos ou sementes LACERDA FILHO (1998).

YOUNG e DICKENS (1975) afirmaram que poucos esforços foram despendidos com o intuito de eficientizar os processos de secagem, com vistas à conservação de energia ou de capital. Os autores discutiram um método para a análise do custo de secagem de milho e os efeitos que vários parâmetros de secagem têm sobre esse custo. Estabeleceram vários parâmetros a serem considerados e verificaram que o tempo de secagem é um deles, podendo ser estimado por modelos matemáticos. Os autores concluíram que o fluxo de ar que resulta em um mínimo custo total de secagem depende de uma série de fatores, como a temperatura de secagem e o teor inicial de água do grão e que o custo total de secagem, geralmente, é menor para as temperaturas de secagem mais elevadas.

Os parâmetros de custo que envolvem o processo de secagem são a energia para movimentar e aquecer o ar de secagem, a mão-de-obra, os equipamentos, a manutenção, a depreciação, as taxas, seguro e juros. Na análise, YOUNG e DICKENS (1975) consideraram, separadamente, os custos energéticos de aquecimento e de movimentação do ar. Todos os outros custos foram assumidos e considerados fixos, e referem-se à depreciação dos equipamentos, manutenção, juros, seguros, impostos e mão-de-obra. O custo fixo pode ser estimado pela equação 1:

$$C_f = \frac{P_3 + \left[P_4 \cdot \frac{F}{t_{sm}} \right]}{\min \left[\left(\frac{V_s}{t_s} \right); \frac{V_{max}}{t_{sm}} \right]} \quad (1)$$

em que

- C_f = custo fixo, R\$.m⁻³;
 P_3 = preço da mão-de-obra, R\$.h⁻¹;
 P_4 = preço inicial do sistema, R\$;
 F = custo de manutenção, depreciação, juros, fração decimal do custo inicial;
 t_{sm} = tempo de secagem máximo, h;
 V_s = volume do secador, m³;
 t_s = tempo requerido para a secagem, h; e
 v_{max} = máximo volume da produção anual, m³.

A estimativa do custo de combustível é dada pela equação 2.

$$C_{comb} = \frac{t \cdot c \cdot p_1}{m_f \cdot 60^{-1}} \quad (2)$$

em que

- C_{comb} = custo do combustível para secagem, R\$.60 kg de produto seco⁻¹;
 t = tempo de secagem, h;
 c = consumo de combustível, kg.h⁻¹;
 p_1 = preço do combustível, R\$.kg⁻¹;
 m_f = massa final de grãos, kg;
 60 = coeficiente de transformação de unidades.

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

$$C_{el} = \frac{P_{otv} \cdot t \cdot p_2}{m_f \cdot 60^{-1}} \quad (3)$$

em que

- C_{op} = custo de operação do ventilador, R\$.60 kg de produto seco⁻¹;
 P_{otv} = potência despendida pelo ventilador, kW;
 p_2 = preço da eletricidade, R\$.kWh⁻¹;
 t = tempo de secagem, h; e
 m_f = massa final de grãos, kg;
 60 = coeficiente de transformação de unidades.

O custo de movimentação do secador pode ser estimado pela equação 4.

$$C_{mov} = \frac{P_{otm} \cdot t_m \cdot p_2}{m_f \cdot 60^{-1}} \quad (4)$$

em que

C_{mov} = custo de movimentação do secador, R\$.60 kg de produto seco⁻¹;

P_{otm} = potência necessária para movimentar o secador, kW;

p_2 = preço da eletricidade, R\$.kWh⁻¹;

t_m = tempo de movimentação do secador, h; e

m_f = massa final de grãos, kg;

60 = coeficiente de transformação de unidades.

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

$$C_{\text{total}} = C_f + C_{\text{comb}} + C_{\text{el}} + C_{\text{mov}} \quad (5)$$

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Área de Pré-processamento e Armazenamento de Produtos Vegetais do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais.

O produto analisado foi milho (*Zea mays* L.) a granel produzido no município de Viçosa, Minas Gerais. Foi realizada a colheita mecânica de aproximadamente 30 toneladas de milho e os testes experimentais aconteceram entre os meses de abril e junho de 2006, quando o milho com teor inicial de água de 20% b.u. foi armazenado em um silo metálico equipado com um sistema de aeração (Figura 1).

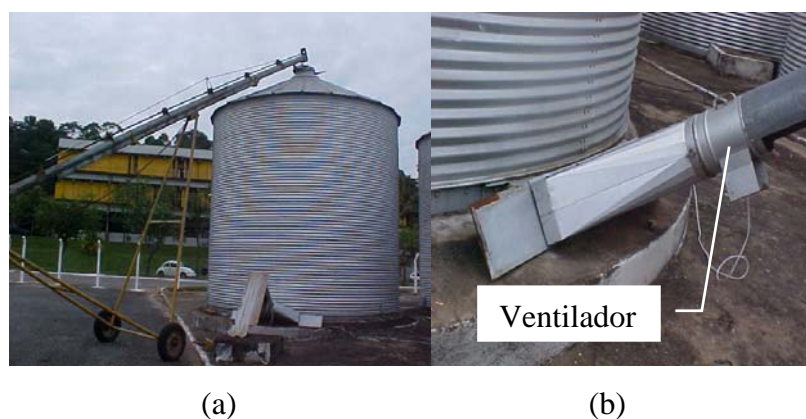


Figura 1 – Silo metálico utilizado para armazenar os grãos (a) e o ventilador para aeração (b).

Para a execução do experimento foram utilizados dois secadores rotativos com os respectivos sistemas de aquecimento a gás (GLP) para o fornecimento complementar de energia ao ar.

O carregamento e a descarga dos secadores foram feitos por meio de um transportador helicoidal (Figura 2), com potência nominal igual a 2,2 kW.



Figura 2 – Transportador helicoidal utilizado para a carga e descarga dos secadores.

A análise dos sistemas de secagem foi realizada conforme a metodologia descrita por BAKKER-ARKEMA et al. (1978). Por esta metodologia, os secadores foram analisados considerando-se três testes por tratamento. Os autores recomendaram, para os sistemas de secagem contínua, a duração de 24 horas para cada teste e, para os sistemas de secagem em lotes, a realização de três testes consecutivos por tratamento. Tal procedimento se justifica pela impossibilidade de se obter repetições das análises de sistemas de secagem, considerando-se, principalmente, as variações do ambiente, do material biológico (grãos), além do próprio equipamento.

Nos parâmetros relativos aos grãos, foram determinados os teores inicial e final de água (% b.u.), as massas específicas inicial e final ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), as massas inicial e final (kg), além da análise de qualidade do produto final.

Nos parâmetros relativos ao ar de secagem foram medidas, a temperatura do ar de secagem ($^{\circ}\text{C}$), temperatura do ar de exaustão ($^{\circ}\text{C}$), temperatura de bulbo seco do ar ambiente ($^{\circ}\text{C}$) e a umidade relativa do ar ambiente (%).

Com relação aos parâmetros do secador foram medidas, a pressão estática (Pa), o fluxo de ar de secagem ($\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$), os tempos de carregamento e descarga (h).

Nos parâmetros relativos ao combustível foram medidos: o consumo ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$), sendo o poder calorífico inferior e a densidade do combustível fornecido pela SHV Gás Brasil, empresa fornecedora do produto (GLP).

O consumo específico de energia ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ de água evaporada), a duração do teste (h) em cada tratamento, a redução do teor de água do produto (% b.u.) e o consumo de energia elétrica (kWh) foram avaliados para cada teste.

3.1. Descrição dos tratamentos

O experimento foi caracterizado pelos tratamentos apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Descrição dos tratamentos dos sistemas de secagem

Tratamento	Temperaturas do ar de secagem (°C)	Funcionamento do sistema de ventilação	Movimentação dos grãos	Tipo de Secador ⁽¹⁾
T1	80	tempo integral	5 min. a cada 1 h	SM 80
T2		1 hora ligado / 1 hora desligado	5 min. a cada 2 h	SM 80 – I
T3	100	tempo integral	5 min. a cada 1 h	SM 100
T4		1 hora ligado / 1 hora desligado	5 min. a cada 2 h	SM 100 – I
T5	80	Conforme o fabricante (ventilador ligado em tempo integral)	tempo integral	SC 80
T6	100			SC 100

⁽¹⁾ SM e SC referem-se aos secadores rotativos, modificado e comercial. Os números referem -se às temperaturas do ar de secagem.

Escolheu-se 80 e 100 °C para temperaturas do ar de secagem devido ao fato de serem temperaturas usuais para a secagem de milho.

3.2. Condições operacionais do experimento

O milho foi colhido mecanicamente e conduzido à Área de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Vegetais para as operações de secagem.

O sistema de secagem com a utilização de secador rotativo comercial foi operado em lotes, conforme as orientações do fabricante, isto é, com o sistema de ventilação e movimentação de grãos ligados em tempo integral.

O sistema de secagem com a utilização de secador rotativo modificado foi operado em lotes, sem intermitência e com intermitência.

3.2.1. Movimentação dos grãos

No secador rotativo comercial a massa de grãos foi revolvida continuamente, do início ao final da secagem. No sistema modificado, a movimentação dos grãos foi feita em intervalos regulares de 5 minutos para intervalo de repouso de 1 hora (Quadro 1). Conforme SANTOS et. al. (2002), este procedimento foi adotado após avaliações

prévias da mistura da massa de grãos, no sentido de minimizar os gradientes de temperatura e teor de água dos grãos, em relação à espessura da massa. Para este volume de produto e considerando-se as características mecânicas do sistema, o tempo de 5 minutos de revolvimento teve o mesmo efeito que 60 minutos, sem o comprometimento da qualidade final do produto.

3.2.2. Movimentação do ar

No secador rotativo comercial, o sistema de ventilação foi mantido ligado em tempo integral, conforme as orientações contidas no manual do fabricante.

No secador rotativo modificado, o ventilador foi ligado, estabelecendo-se intervalos de repouso, inicialmente, na proporção de 1 hora com o ventilador ligado para 1 hora desligado. Este secador operou também com o sistema de ventilação ligado em tempo integral (Quadro 1).

3.3. Sistemas de secagem

Os sistemas de secagem dos secadores rotativos foram equipados com geradores de calor para o aquecimento complementar do ar, com a queima de gás liquefeito de petróleo.

3.3.1. Descrição do secador comercial

Caracterizado por um módulo do equipamento comercial, com capacidade estática de $1,6 \text{ m}^3$, a sua estrutura era constituída por um cilindro externo, com 1,5 m de diâmetro e 1,0 m de comprimento, construído em chapa metálica perfurada (Figura 4), que girava em torno de um eixo longitudinal com velocidade de 2 rpm. O acionamento do cilindro foi feito por um motor elétrico, com potência de 735,5 W, por meio de um sistema de polias e correias e por um conjunto de engrenagens, objetivando uma redução da velocidade angular. A ventilação foi feita por um ventilador centrífugo instalado em uma das bases do cilindro. A distribuição de ar na massa de grãos foi feita por meio de um duto localizado longitudinalmente no centro do cilindro. A passagem de ar do duto para a massa de grãos foi feita por meio de chapas difusoras perfuradas, fixadas radialmente ao duto central. O sistema de ventilação foi composto por um ventilador centrífugo de potência igual a 0,14 kW. Trabalhou-se com uma vazão média igual a $38,9 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ e pressão estática média de 214 Pa, operado-se conforme as recomendações técnicas do fabricante.



Figura 4 – Secador rotativo comercial com distribuição radial do fluxo de ar, unido ao gerador de calor.

3.3.2. Secador rotativo modificado

A modificação consistiu em direcionar o fluxo de ar apenas para a metade inferior do secador, onde a massa de grãos se mantém na sua maior espessura, durante a secagem. Para tanto, obstruiu-se os furos das chapas difusoras internas, alternadas, conforme a forma original do sistema (Figura 5a), fixando-as consecutivamente (Figura 5b). Uma chapa metálica lisa foi colocada externamente, cobrindo a metade do perímetro cilíndrico do secador, obstruindo seus furos. Buscou-se com isso, a uniformidade da distribuição do ar de secagem durante todo o processo.

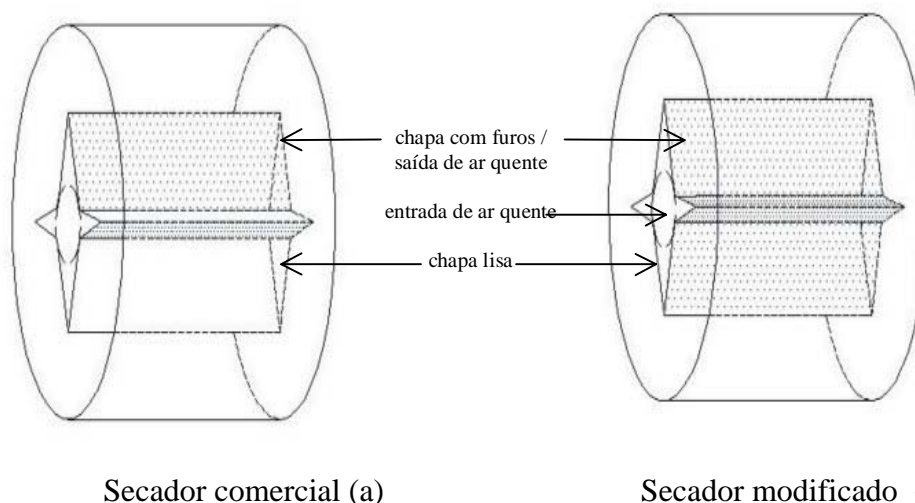


Figura 5 – Croqui: modificação no sistema de distribuição de ar, nos difusores do secador. (solicitação de patente protocolada).

O sistema de ventilação foi composto por um ventilador centrífugo de potência igual 0,22 kW, trabalhou com uma vazão média de $32,6 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ e pressão estática média de 403 Pa.

De forma semelhante, o aquecimento do ar de secagem foi realizado por meio de um gerador de calor a gás (GLP). O secador rotativo modificado é visto na Figura 6.



Figura 6 – Secador rotativo modificado com distribuição radial do fluxo de ar e o gerador de calor.

3.3.3. Gerador de calor a gás

Foram feitas algumas alterações no gerador de calor a gás original visando melhorar as suas características quanto à forma e cor da chama, acendimento da chama piloto e redução no consumo de gás. As modificações consistiram em aumentar a câmara de combustão e as entradas de ar secundário do gerador de calor.

O gerador de calor a gás original era formado por uma câmara de combustão de 0,2 x 0,2 x 0,4 m, com entradas de ar secundário de dimensões iguais a 0,07 x 0,14 m, com regulagem manual, um bico para saída de gás e um painel de controle de temperatura. Após as modificações, o gerador de calor a gás passou a ter uma câmara de combustão de 0,2 x 0,2 x 0,8 m e aberturas de ar secundário equipadas com registros do tipo gaveta, com regulagem manual, de dimensões iguais a 0,15 x 0,2 m.

As Figuras 7, 8 e 9 apresentam respectivamente, o gerador de calor a gás original, o gerador de calor a gás modificado e seus detalhes.

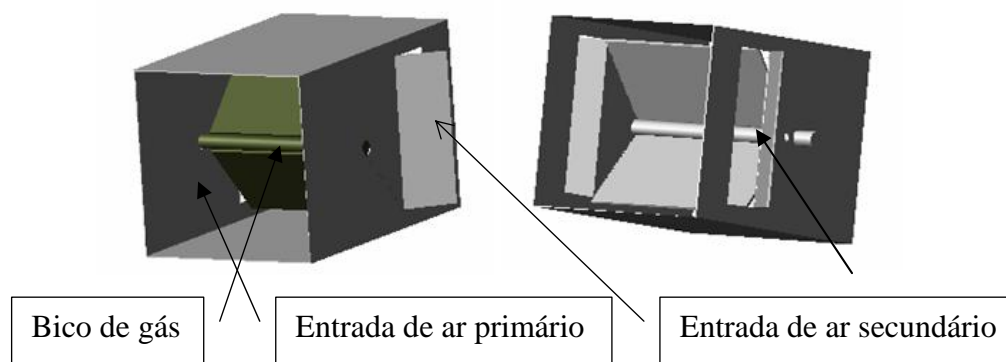


Figura 7 – Croqui: gerador de calor a gás original.

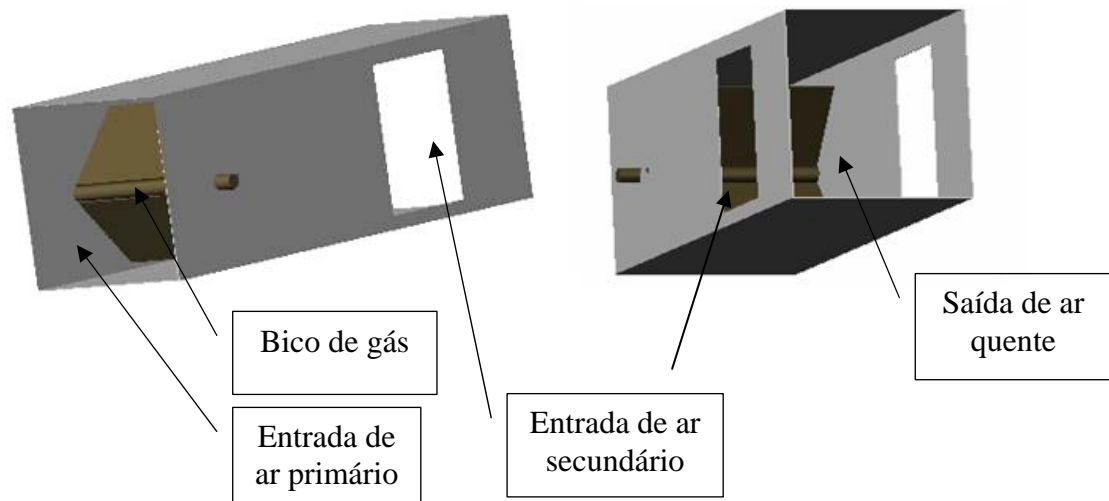


Figura 8 – Croqui: gerador de calor a gás modificado.

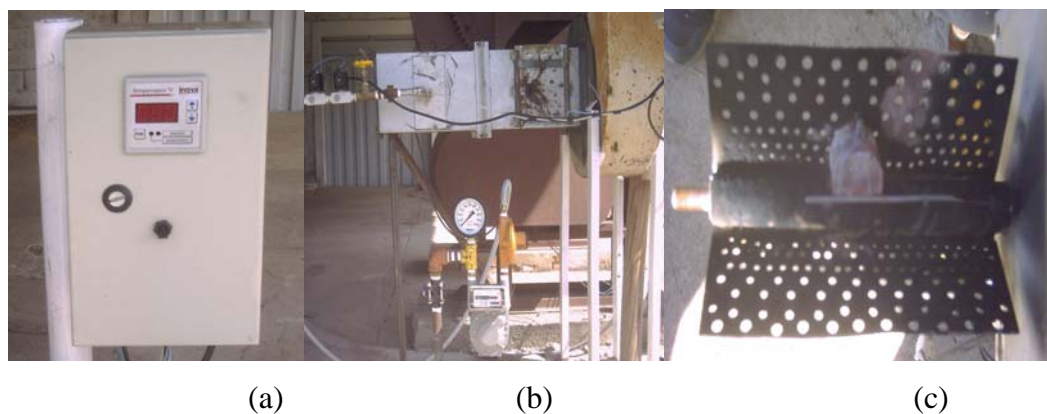


Figura 9 – Detalhes do gerador de calor que compõe os secadores rotativos: painel de controle de temperatura (a), medidor LAO (b) e o bico de gás do gerador de calor (c).

3.4. Análise do custo operacional dos sistemas de secagem

Para a análise do custo de secagem, considerou-se o preço do combustível de R\$ 2,25 por kg de produto (MINASGAS, 2006); preço de consumo da energia elétrica de R\$ 0,24 kWh⁻¹, na modalidade de tarifa horo-sazonal convencional A4 rural (CEMIG, 2006); período de colheita de 45 dias úteis para uma safra de 2 meses; jornada de trabalho de 22 h.dia⁻¹; período para manutenção dos equipamentos de 2 h.dia⁻¹.

O custo fixo foi obtido por meio de uma ponderação no tempo de utilização do secador para a secagem de milho e de café. Considerou-se um período de utilização do secador de 2 e 3 meses para milho e café, respectivamente. Desta maneira, o custo fixo, para o milho foi aquele obtido pela equação 1 e multiplicado por 2/5. Isto foi feito para diminuir o tempo de ociosidade do secador. Para os custos de manutenção, depreciação, taxas e juros, foi considerado um percentual de 0,10 em relação ao preço inicial do

sistema que foi de R\$ 20.200,00 (PINHALENSE, 2006). Quanto ao custo de mão-de-obra, considerou-se o valor de um salário mínimo somado aos encargos sociais, totalizando R\$ 600,00.

O custo de secagem foi obtido, também por simulação, considerando-se uma capacidade estática igual a $5,0 \text{ m}^3$ para os secadores em estudo. Neste caso, o preço inicial do sistema foi de R\$ 26.400,00 (PINHALENSE, 2006).

O valor médio da capacidade estática dos secadores rotativos, comercial e modificado foi igual a 1200 kg de milho seco. A massa específica média do produto foi igual a $738,7 \text{ kg.m}^{-3}$.

Com base nesses valores e no tempo médio de secagem em cada tratamento, foram estimados o tempo máximo de secagem e o volume máximo de produção anual.

3.5. Monitoramento das variáveis experimentais

3.5.1. Umidade

3.5.1.1. Umidade relativa

A umidade relativa do ar ambiente foi monitorada por meio de um termohigrógrafo, instalado em um abrigo meteorológico, anexo à área experimental, conforme as normas estabelecidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET/MAPA. Um psicrômetro foi instalado no mesmo abrigo com o objetivo de comparar as leituras de ambos os aparelhos.

A umidade relativa do ar de secagem foi calculada por meio de um programa de simulação – GRAPSI, desenvolvido por MELO et al. (2004), com base nas variáveis iniciais do ambiente e na temperatura do ar de secagem.

3.5.1.2. Teor de água dos grãos

O teor de água dos grãos foi monitorado por meio de estufa, com circulação forçada de ar, à temperatura de $105 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$, durante 24 horas (BRASIL, 1992), aplicando-se o processo gravimétrico. As amostras foram coletadas em intervalos regulares de 1 hora, durante o processo de secagem. Os resultados foram obtidos pela média de três repetições, com massa mínima de 30 g por amostra. Para o acompanhamento efetivo da secagem foi utilizado o aparelho Motomco, um equipamento de medição indireta que se baseia na capacitância elétrica. Os resultados finais do teor de água foram fornecidos em percentagem de base úmida.

3.5.2. Tempo

O tempo de secagem foi determinado, usando-se um relógio digital para monitorar a duração de cada fase operacional que envolvesse consumo de energia elétrica, combustível, secagem e movimentação do produto, além do monitoramento do período de repouso.

3.5.3. Amostragem do produto

A amostragem foi realizada durante o carregamento dos secadores e em intervalos regulares de 1 hora. No secador modificado, as amostras foram retiradas após o revolvimento periódico de 5 minutos para cada hora e, no secador comercial que movimentava continuamente, as amostras foram obtidas em intervalos regulares de 1 hora.

3.5.4. Temperatura

A temperatura do ar atmosférico foi monitorada por meio de termohigrógrafo, dotado de um termômetro bi-metálico, instalado em um abrigo meteorológico conforme as normas estabelecidas pelo INMET/MAPA.

As temperaturas do ar de secagem, do ar de exaustão e da massa de grãos foram monitoradas por meio de termopares tipo “T” previamente calibrado. As leituras foram realizadas por meio de um termômetro digital. A Figura 10 ilustra os pontos onde foram instalados os sensores termoelétricos para o monitoramento de temperatura da massa de grãos, do ar de secagem e de exaustão.

Nos pontos de número 1 foram monitoradas as temperaturas do ar de secagem. Os pontos de número 2 foram utilizados para monitorar a temperatura da massa de grãos. Para a realização desta medida, o sistema de ventilação foi desligado até a parada total do rotor e foi admitida a consideração feita por THOMPSON et al. (1968), considerando-se a igualdade entre a temperatura dos grãos e do ar que o circunda. Os pontos 3 e 4 estavam posicionados a 0,02 m da superfície da chapa perfurada e foram utilizados para monitorar a temperatura do ar de exaustão.

O monitoramento de temperatura foi realizado continuamente, entretanto consideraram-se apenas os valores anotados em intervalos regulares de 1 hora.

3.5.5. Vazão e pressão estática do ar

A vazão do ar de secagem foi obtida a partir da curva característica do ventilador, conforme COSTA (1978).

A pressão estática observada, devido às perdas de cargas relativas ao processo de secagem, foi monitorada, continuamente, por meio de um manômetro diferencial. Os resultados foram apresentados em valores médios resultantes das leituras realizadas no ponto 5 (Figura 10), em intervalos regulares de 1 hora.

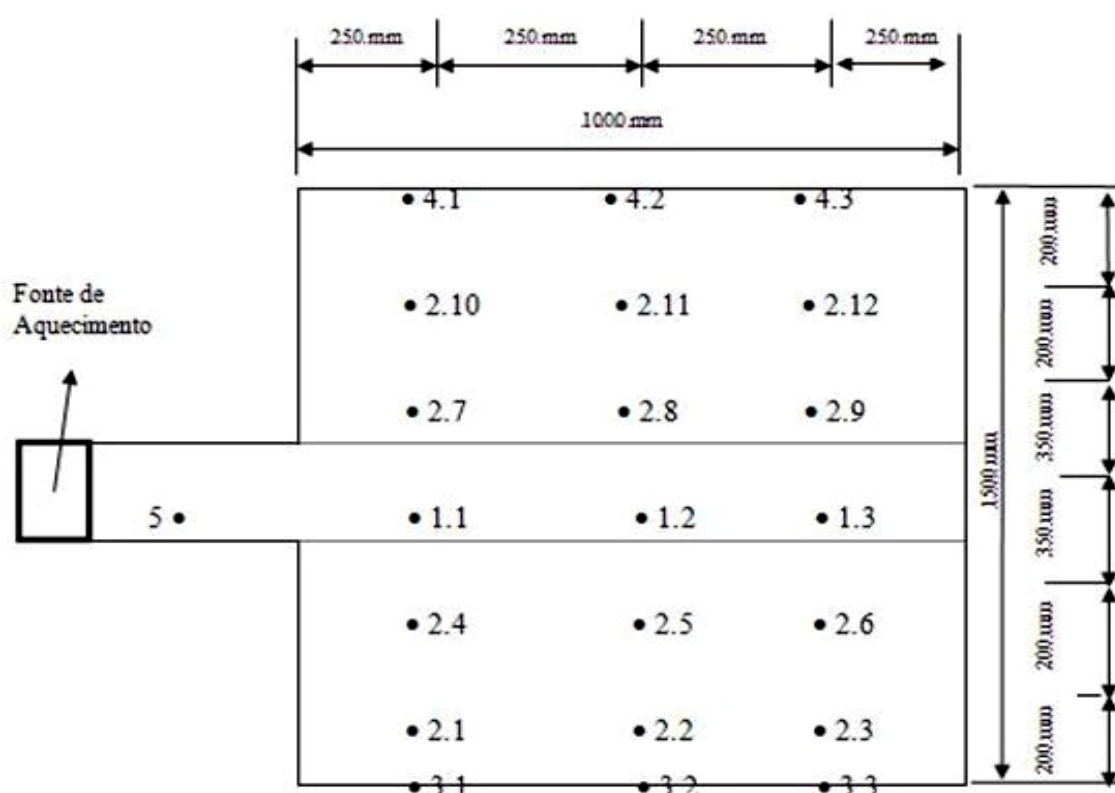


Figura 10 – Pontos de monitoramento das temperaturas do ar de secagem (1); massa de grãos (2); ar de exaustão (3 e 4) e da pressão estática (5).

3.6. Energia

3.6.1. Consumo específico de energia do secador

Estimou-se a energia necessária para o aquecimento do ar de secagem considerando-se o poder calorífico inferior do combustível. O consumo específico de energia foi determinado pela equação 6, conforme FREIRE (1998).

$$E_r = \frac{P_{ci} \cdot c \cdot t \cdot (100 - U_f)}{M \cdot (U_i - U_f)} \quad (6)$$

em que

E_r = consumo específico real de energia, kJ.kg^{-1} de água evaporada;

P_{ci} = Poder calorífico inferior do combustível, kJ.kg^{-1} ;

c = consumo de GLP, kg.h^{-1} ;

t = tempo total de secagem, h;

M = massa inicial do produto, kg;

U_i = teor inicial de água do produto, % b.u.; e

U_f = teor final de água do produto, % b.u.;

3.6.2. Uso de eletricidade

O uso da eletricidade foi estimada com base na potência dos motores utilizados para as operações de carga e descarga dos secadores, movimentação dos grãos e do ar e no tempo efetivo de operação. A eficiência do motor elétrico foi obtida por meio do catálogo do fabricante.

A potência do ar foi estimada com base nos valores médios de pressão estática e vazão, conforme a equação 7.

$$P = \frac{Q \cdot p_e}{4500} \quad (7)$$

em que

P = potência do ar, cv;

Q = vazão de ar, $\text{m}^3.\text{min}^{-1}$;

p_e = pressão estática, mmca; e

4500 = coeficiente de transformação de unidades.

A potência do sistema foi estimada com base na eficiência observada, considerando-se os valores de consumo efetivo dos motores elétricos e na potência estimada para o ar, conforme a equação 8.

$$\eta = \frac{P}{P_{ef}} \quad (8)$$

em que

η = eficiência efetiva do sistema, %;

P_{ef} = potência efetiva do sistema, cv.

3.6.3. Uso de combustível

O GLP foi armazenado em três tanques P-190 e transportado por uma tubulação galvanizada até uma válvula reguladora de pressão.

O consumo de gás foi medido por meio de um rotâmetro, marca DIGIFLOW, instalado na linha de fluxo do secador modificado.

No secador comercial foi instalado um medidor Lao G-1, registrador de leitura direta, marca FAMABRAS, com precisão de 0,001 m³.

Os resultados de consumo de GLP foram expressos em unidades de massa, considerando-se as medidas observadas em kg.h⁻¹ e m³.h⁻¹, respectivamente, para os secadores modificado e comercial e a massa específica, para a temperatura do gás, conforme as informações contidas no Balanço Energético Nacional (BRASIL, 2005) e por meio de informações da empresa distribuidora do combustível.

3.7. Análise de qualidade do milho

A análise de qualidade do milho foi realizada com base nas Especificações para a Padronização, Classificação e Comercialização Interna do Milho, conforme o estabelecido pela Portaria nº 845, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (BRASIL, 1976). Foram realizadas determinações de massa específica aparente, índice de suscetibilidade à quebra e a percentagem de trincas dos grãos.

3.7.1. Massa específica aparente

A massa específica aparente do milho foi determinada utilizando-se uma balança de peso hectolítrico de 0,25 L, com duas repetições para cada amostra.

3.7.2. Índice de suscetibilidade à quebra

A estimativa do índice de suscetibilidade à quebra foi determinada utilizando-se o aparelho Stein Breakage Tester, modelo CK2 (Figura 11). Uma amostra de 100 g de grãos limpos foi colocada em um recipiente de aço de nove centímetros de diâmetro que, a uma rotação de 1.725 rpm, movimentava os grãos contra a parede do recipiente durante dois minutos. Em seguida, a amostra foi retirada do aparelho e passada em peneira de crivos circulares de 4,76 mm de diâmetro. Todo material que passou pela peneira foi pesado e o percentual de grãos quebrados foi expresso em relação à massa inicial da amostra.



Figura 11 – Stein Breakage Tester, modelo CK2.

3.7.3. Percentagem de trincas

As percentagens dos tipos de trincas, subdivididas em zero, simples, duplas e várias, foram determinadas por meio da verificação visual em um diafanoscópio (Figura 12). Realizaram-se cinco repetições para cada amostra do produto final, tendo sido verificado 50 grãos de milho escolhidos ao acaso, em cada repetição.



Figura 12 – Diafanoscópio.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a análise dos resultados será apresentado apenas um teste por tratamento, exceto para a análise dos parâmetros de desempenho, da qualidade e do custo. Os demais resultados são apresentados nos Apêndices.

4.1. Temperatura do ar de secagem, do ar de exaustão, do ar ambiente, da massa de grãos e umidade relativa ambiente

As temperaturas do ar de secagem, do ar de exaustão, do ar ambiente, da massa de grãos e da umidade relativa do ar ambiente estão representadas pelas Figuras 13, 14, 15, 16, 17 e 18.

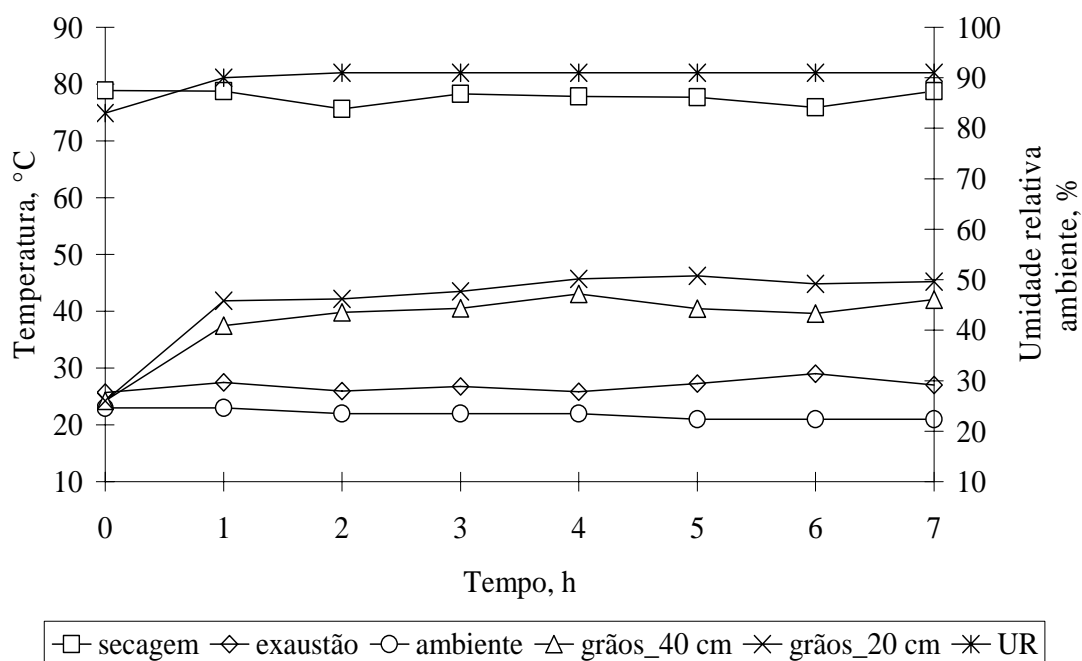


Figura 13 – Temperatura do ar de secagem, ar de exaustão, ar ambiente, da massa de grãos no secador rotativo modificado e umidade relativa ambiente em função do tempo de secagem, teste 2, tratamento 1 (SM 80).

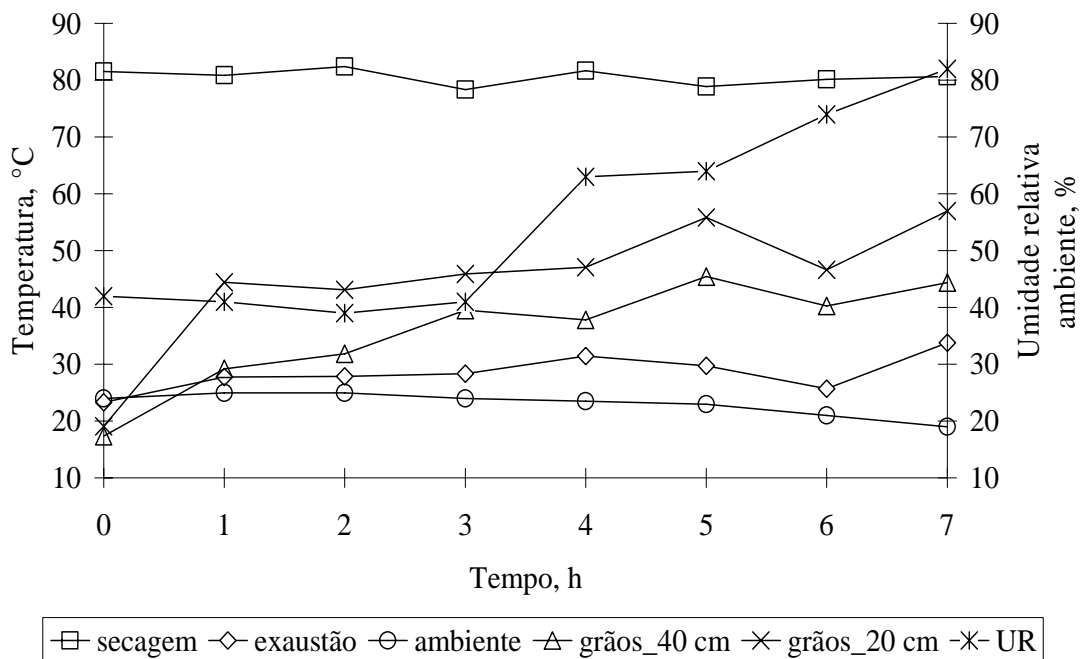


Figura 14 – Temperatura do ar de secagem, ar de exaustão, ar ambiente, da massa de grãos no secador rotativo modificado e umidade relativa ambiente em função do tempo de secagem, teste 1, tratamento 2 (SM 80 – I).

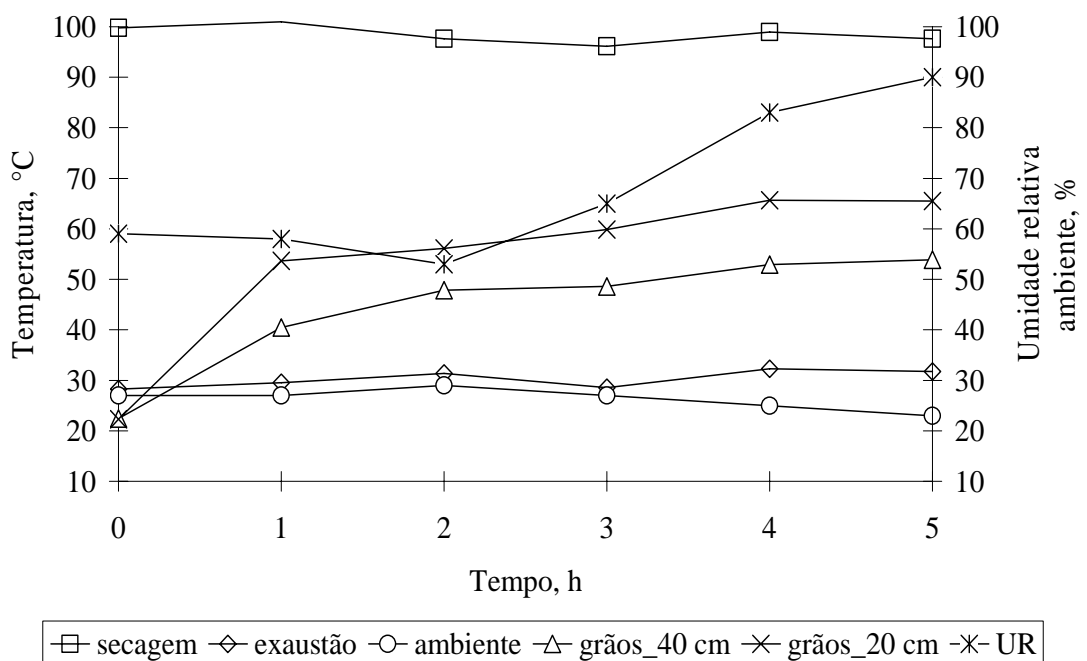


Figura 15 – Temperatura do ar de secagem, ar de exaustão, ar ambiente, da massa de grãos no secador rotativo modificado e umidade relativa ambiente em função do tempo de secagem, teste 2, tratamento 3 (SM 100).

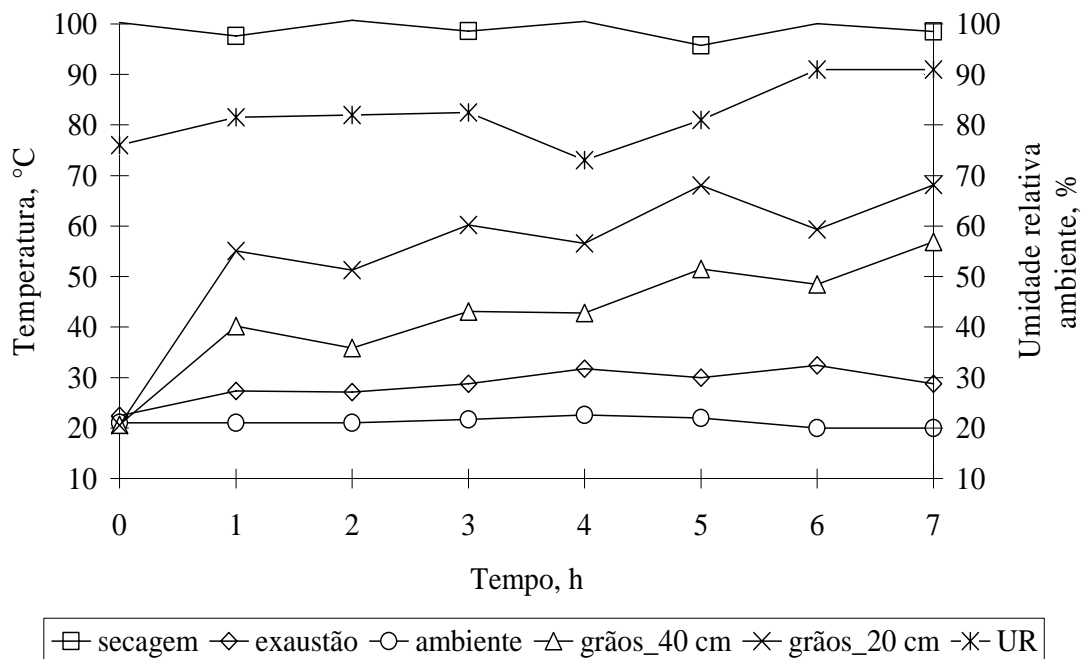


Figura 16 – Temperatura do ar de secagem, ar de exaustão, ar ambiente, da massa de grãos no secador rotativo modificado e umidade relativa ambiente em função do tempo de secagem, teste 2, tratamento 4 (SM 100 – I).

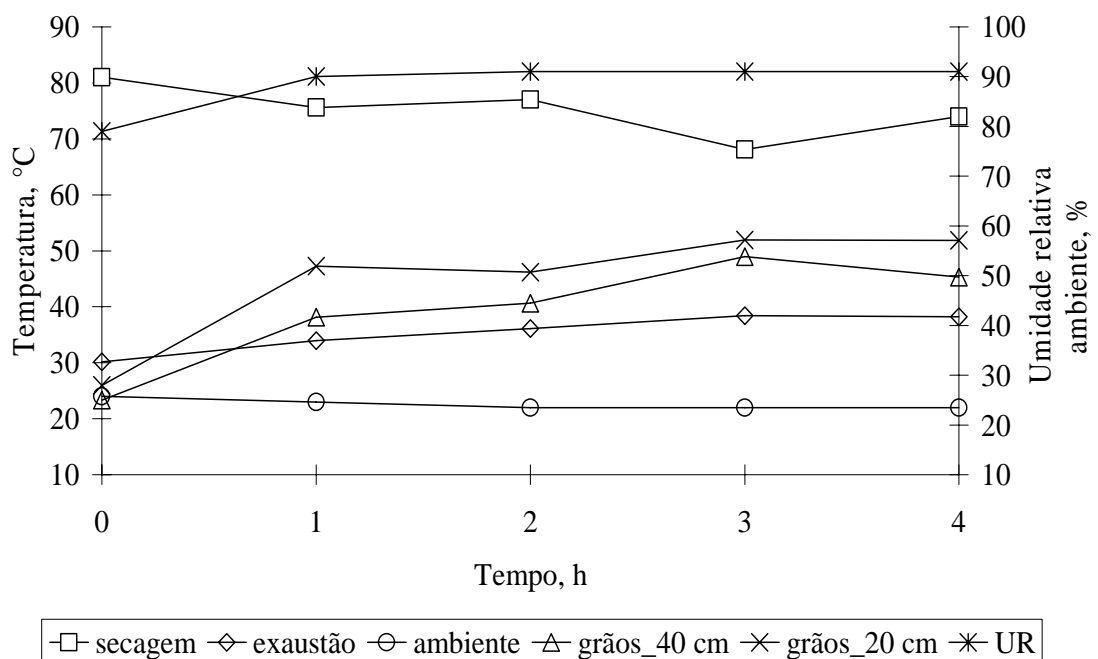


Figura 17 – Temperatura do ar de secagem, ar de exaustão, ar ambiente, da massa de grãos no secador rotativo comercial e umidade relativa ambiente em função do tempo de secagem, teste 2, tratamento 5 (SC 80).

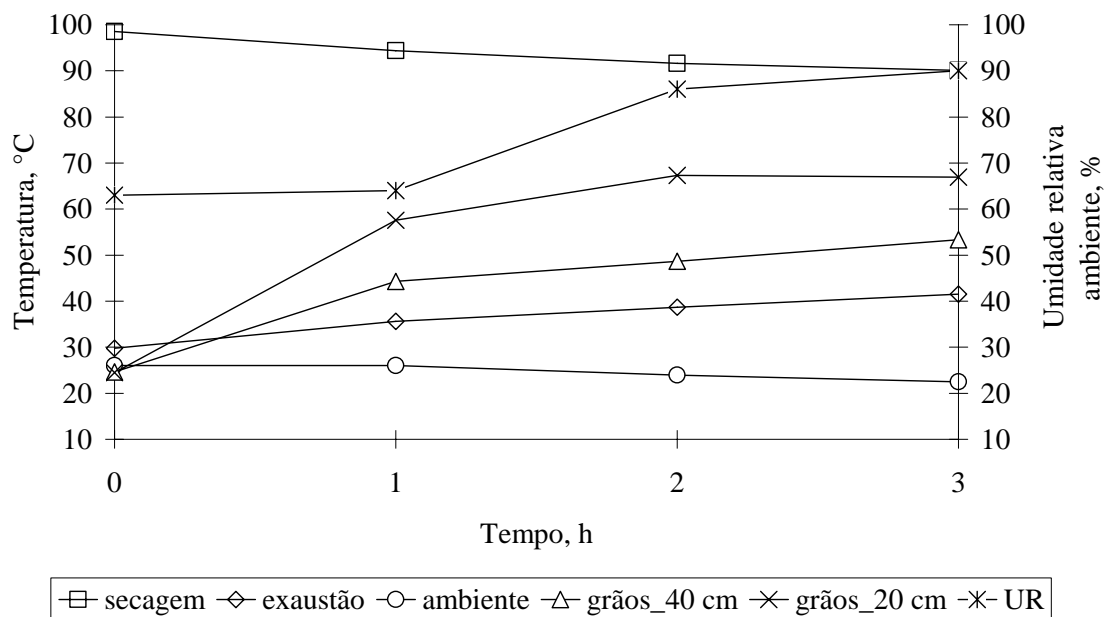


Figura 18 – Temperatura do ar de secagem, ar de exaustão, ar ambiente, da massa de grãos no secador rotativo comercial e umidade relativa ambiente em função do tempo de secagem, teste 1, tratamento 6 (SC 100).

A temperatura do ar de secagem variou durante a realização dos testes nos dois secadores rotativos. Analisando-se as Figuras 13, 14, 15 e 16, referentes ao secador rotativo modificado, observa-se que os valores médios de temperatura do ar de secagem foram iguais a 77,7; 80,6; 98,5 e 99,0 °C, respectivamente. Nas Figuras 17 e 18, verifica-se que as temperaturas médias do ar de secagem no secador rotativo comercial foram iguais a 75,6 e 93,7 °C.

A temperatura do ar de exaustão em valores médios foi 27,3±1,7; 28,5±5,2; 30,3±2,0 e 27,4±4,1 °C, no secador rotativo modificado e 34,3±4,1 e 35,7±5,9 °C no secador rotativo comercial, para os testes apresentados e referentes aos tratamentos 1, 2, 3, 4, 5, e 6 respectivamente.

Observa-se que a temperatura do ar de exaustão foi maior no secador rotativo comercial. Esses valores de temperatura indicam que o ar de exaustão possuía, ainda, um potencial de secagem relativamente alto em comparação com o ar de exaustão do secador modificado. Isto pode ser verificado, comparando-se os valores médios da umidade relativa de exaustão no secador comercial que foi de 65% e no secador modificado foi de 95%.

Com relação à elevada temperatura do ar de exaustão, no secador comercial, deveu-se à redução de volume sofrida pelos grãos durante a secagem, proporcionando uma diminuição da espessura da camada de grãos localizada acima do duto de

distribuição de ar, o que facilitou a saída de ar quente por esta região, em função da menor pressão em relação à camada de grãos localizada abaixo do duto de distribuição de ar.

As Figuras 13, 14, 15, 16, 17 e 18 ilustram as temperaturas na massa de grãos, distanciadas a 0,2 m e a 0,4 m do duto de ar de secagem.

As temperaturas médias na massa de grãos, a 0,4 m do duto de ar quente, foram $36,6 \pm 10,6$; $31,4 \pm 14,0$; $38,2 \pm 15,7$ e $38,8 \pm 18,1$ °C, no secador rotativo modificado e, $39,4 \pm 14,4$ e $39,0 \pm 14,3$, no secador rotativo comercial. Para a distância de 0,2 m do duto de ar quente, as temperaturas médias na massa de grãos foram iguais a $38,4 \pm 12,4$; $38,0 \pm 18,9$; $44,0 \pm 21,7$ e $44,3 \pm 23,7$ °C, no secador rotativo modificado, e, $42,6 \pm 14,6$ e $45,9 \pm 21,4$ °C, no secador rotativo comercial. As temperaturas na massa de grãos a 0,2 m foram maiores que a 0,4 m, indicando o comportamento da difusão de temperatura dentro do secador, no sentido radial. As temperaturas na massa de grãos, como era de se esperar, foram maiores quando a temperatura do ar de secagem foi de 100 °C, fato observado nos dois secadores rotativos. Comparando-se os dois secadores rotativos, observa-se que as temperaturas do produto a 0,2 m atingiram valores próximos, e a 0,4 m foram maiores no secador comercial e crescente em relação ao do tempo de secagem devido à redução do teor de água dos grãos.

4.2. Teor de água e massa específica aparente

As curvas de secagem do produto estão representadas nas Figuras 19 e 20.

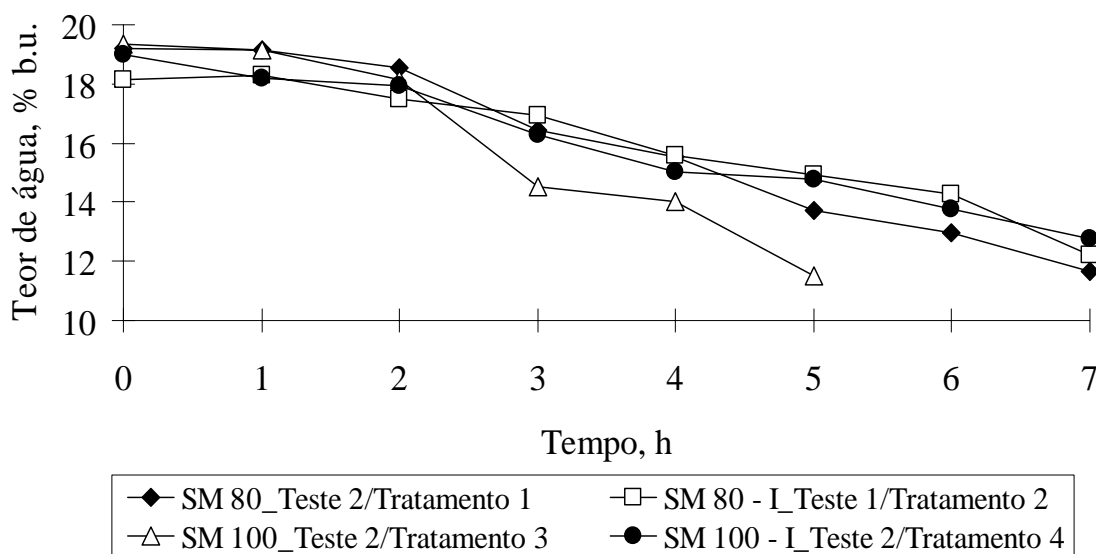


Figura 19 – Variação do teor de água do milho em função do tempo, durante a secagem, no teste 1, tratamento 2 e no teste 2, tratamentos 1, 3 e 4, no secador rotativo modificado.

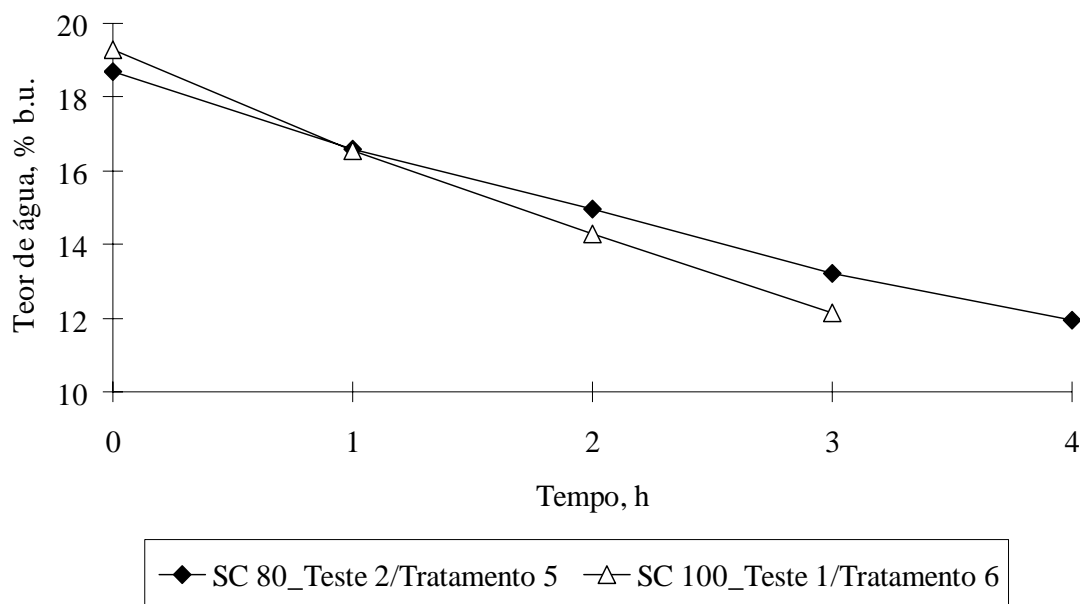


Figura 20 – Variação do teor de água do milho em função do tempo, durante a secagem, no teste 2, tratamento 5 e no teste 1, tratamento 6, no secador rotativo comercial.

Os teores iniciais e finais de água do milho variaram para cada teste. Considerando-se as curvas de secagem apresentadas, os valores médios dos teores iniciais e finais de água foram $18,6 \pm 0,8$ e $12,9 \pm 0,7\%$ b.u., para o secador rotativo modificado e, $19,0 \pm 0,3$ e $12,1 \pm 0,1\%$ b.u., para o secador rotativo comercial.

No teste 1 do tratamento 2, (Figura 19), observou-se um ponto ocasional de aumento do teor de água na fase inicial de secagem. Isto ocorreu devido à amostragem ter sido realizada sem que houvesse uma prévia movimentação do secador. Tanto que no período subsequente da secagem, cuja amostragem foi feita após movimentação do secador, houve redução do teor de água.

Comparando-se as curvas de secagem nos dois secadores, nota-se que a taxa de secagem, redução de massa de água na unidade de tempo, no secador rotativo comercial foi maior do que no secador rotativo modificado. As taxas de remoção de água do milho foram iguais a 1,1; 0,8; 1,6 e 1,0 pontos percentuais por hora, no secador modificado e, 1,7 e 2,4 pontos percentuais por hora, no secador comercial. Observa-se, também, que a taxa de secagem se elevou com o aumento da temperatura do ar de secagem.

Esses valores de taxa de secagem são considerados baixos quando comparados com àqueles, para que não proporcionem perda de qualidade do produto, recomendados por BROOKER et al. (1992) que foi de 4 a 5 pontos percentuais por hora.

As Figuras 21, 22 e 23 ilustram a variação da massa específica aparente do milho em função de seu teor de água.

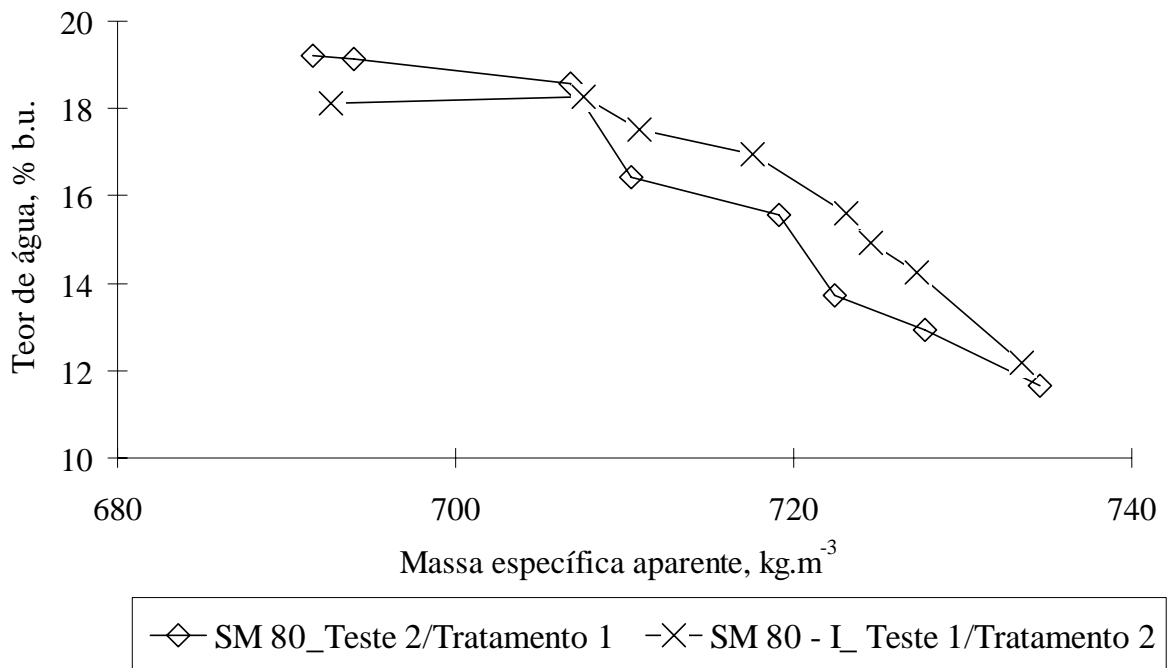


Figura 21 – Variação da massa específica aparente do milho em função do teor de água, durante a secagem no secador rotativo modificado, teste 2, tratamento 1; teste 1, tratamento 2.

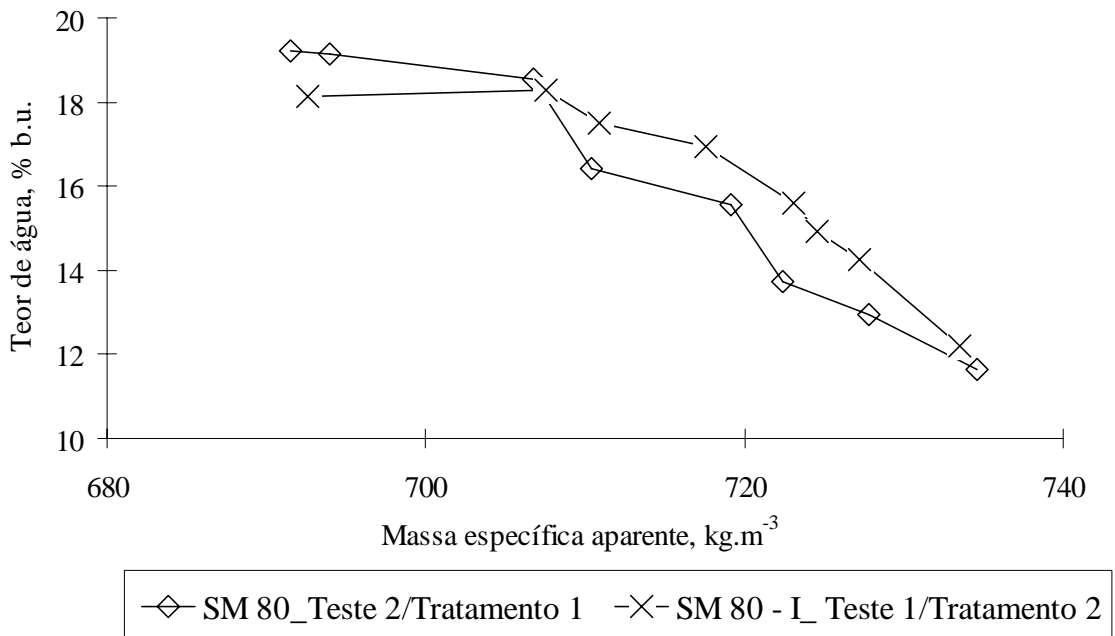


Figura 22 – Variação da massa específica aparente do milho em função do teor de água, durante a secagem no secador rotativo modificado, teste 2, tratamentos 3 e 4.

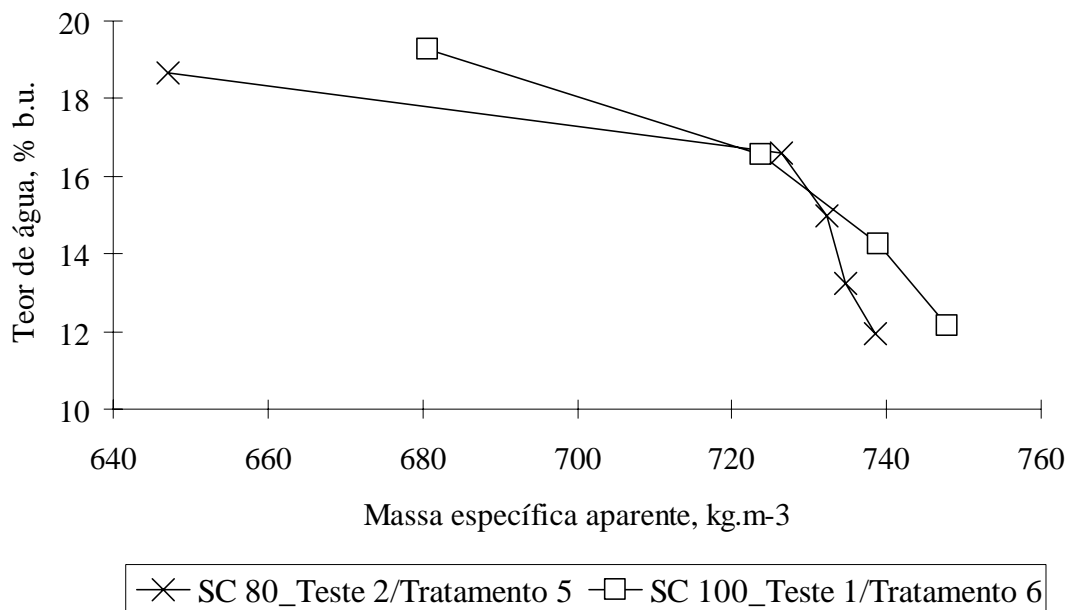


Figura 23 – Variação da massa específica aparente do milho em função do teor de água, durante a secagem no secador rotativo comercial, teste 2, tratamento 5; teste 1, tratamento 6.

Observou-se que houve um aumento da massa específica aparente do milho em função da redução de seu teor de água. Este fato foi também verificado por Brooker et al., (1992) e Hall, (1972). Isto mostra que durante a redução do teor de água do milho, o seu volume é reduzido mais rapidamente que a sua massa total. Este comportamento está coerente com o esperado, uma vez que é o mesmo observado para maioria dos produtos agrícolas, com exceção de café, arroz em casca e cevada.

Comparando-se os valores finais de massa específica aparente com as temperaturas do ar de secagem e valores próximos de teor de água, observa-se na Figura 23 que o valor mais elevado foi obtido quando se utilizou maior temperatura do ar de secagem.

4.3. Análise do desempenho energético dos sistemas de secagem

Os resultados obtidos na análise do desempenho energético dos sistemas de secagem, referentes aos tratamentos 1, 2, 3, 4, 5 e 6, estão apresentados nas Tabelas 2, 3 e 4.

Observam-se que os valores médios de fluxo de ar nos secadores rotativos, comercial e modificado, foram respectivamente iguais a 24,3 e 20,3 m³. min⁻¹.m⁻³ de produto.

Quanto à pressão estática, obteve-se um valor médio de 210 Pa (21,0 mmca) no secador rotativo comercial e 403 Pa (40,3 mmca) no secador rotativo modificado. O maior valor de pressão estática ocorrida neste secador deve-se à modificação técnica realizada no mesmo. A obstrução de metade da área externa do secador com a fixação de uma chapa metálica lisa proporcionou o aumento da pressão estática.

Os valores médios obtidos na duração dos testes e na redução do teor de água para o secador rotativo comercial foram de 4,0 horas e 6,9 pontos percentuais e, 3,0 horas e 7,1 pontos percentuais para os tratamentos 5 e 6 respectivamente. Para o secador rotativo modificado foram obtidos, respectivamente, valores médios de 6 h e 6,2% b.u.; 6,3 h e 5,0% b.u.; 5,0 h e 7,8% b.u.; e, 7,0 h e 6,6% b.u. para os tratamentos 1, 2, 3 e 4. Observa-se que os testes de menor duração foram obtidos quando se trabalhou com maior temperatura do ar de secagem para valores próximos de redução do teor de água.

Observa-se nas Tabelas 2, 3 e 4 que o consumo específico médio de energia (kJ.kg^{-1} de água evaporada) no secador rotativo modificado foi menor que no secador rotativo comercial, indicando que há melhor aproveitamento de energia nesse secador, pois requer menor quantidade de energia por unidade de massa de água evaporada. Este comportamento foi o mesmo verificado por SANTOS (2002), quando comparou o desempenho energético dos secadores rotativos, comercial e modificado na secagem de café.

O secador rotativo modificado apresentou consumo específico de energia médio de 4.714,1; 4.308,5; 4.477,2 e 4.629,6 kJ.kg^{-1} de água evaporada para os tratamentos 1, 2, 3 e 4, respectivamente, e o secador rotativo comercial apresentou consumo específico de energia médio de 5.835,3 e 5.411,7 kJ.kg^{-1} de água evaporada para os tratamentos 5 e 6, respectivamente.

Comparando-se os consumos específicos de energia, entre os tratamentos 1 e 3, 5 e 6, em função das temperaturas do ar de secagem de 80 e 100 °C, observou-se menor consumo específico de energia para a temperatura do ar de secagem de 100 °C. Isto ocorreu devido ao fato do ar de secagem com temperatura de 100 °C possuir menor umidade relativa e, em consequência, maior potencial de secagem.

Quanto à forma de operação do secador rotativo modificado, verificou-se que o consumo específico de energia foi ligeiramente menor, quando o mesmo operou de maneira intermitente, considerando-se a mesma temperatura de secagem.

Analisando-se os consumos específicos de energia nos tratamentos 1 e 5, para a temperatura do ar de secagem de 80 °C, verificou-se que houve melhor aproveitamento de energia no secador rotativo modificado. Este comportamento pode ser verificado na

Figura 24, na qual observa-se que a eficiência energética no secador rotativo modificado foi maior que no secador rotativo comercial. Verifica-se que a entalpia específica aumenta durante a secagem do produto, ou seja, na fase final da secagem é necessário mais energia para evaporar a água do grão.

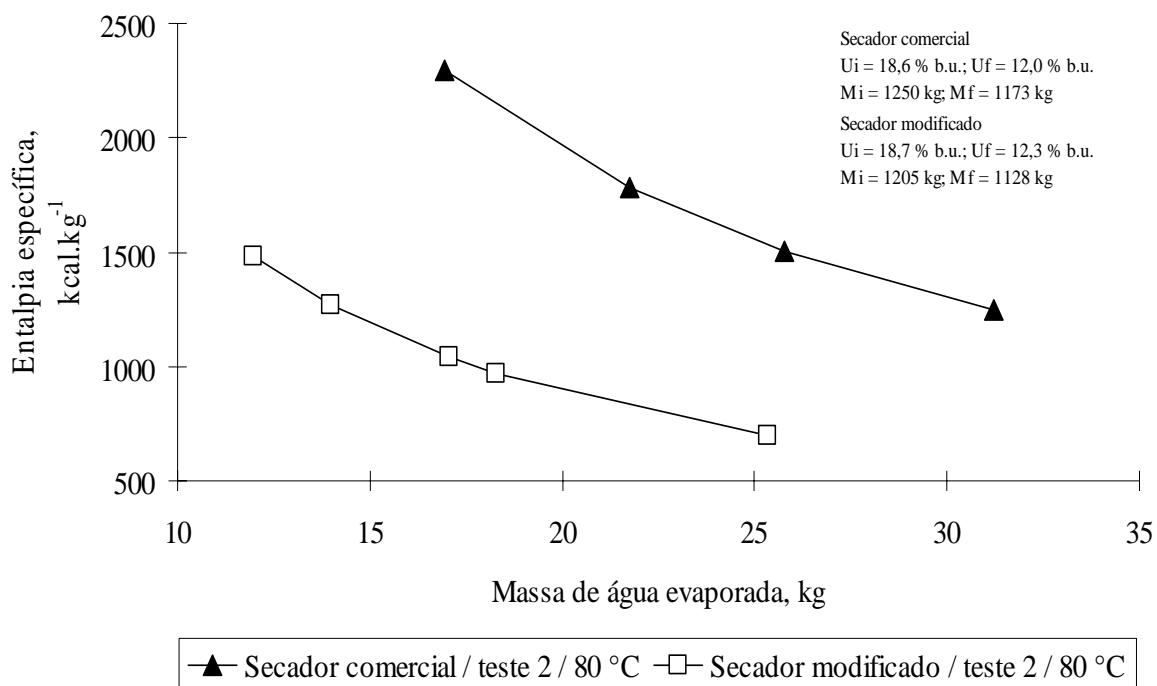


Figura 24 – Variação da eficiência energética em função da massa de água evaporada, durante a secagem nos secadores rotativos, comercial e modificado, no teste 2, tratamentos 5 e 1.

Tabela 2 – Resultados obtidos com os testes referentes aos tratamentos 1 e 2 no secador rotativo modificado

Parâmetros	Tratamento 1			Tratamento 2		
	SM 80			SM 80 – I		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
1) Dos grãos						
Teor inicial de água, % b.u.	18,0	19,2	19,5	17,8	17,8	16,4
Teor final de água, % b.u.	12,4	11,7	13,9	12,2	12,7	12,2
Temperatura inicial, °C	24,7	26,0	27,0	18,2	21,1	23,3
Temperatura final, °C	58,7	47,9	51,4	50,7	54,9	55,3
Massa específica inicial, kg.m ⁻³	695,5	694,0	698,7	707,6	706,3	712,5
Massa específica final, kg.m ⁻³	733,4	736,6	735,5	739,4	742,8	740,2
Massa inicial, kg	1203	1257	1290	1261	1290	1236
Massa final, kg	1120	1156	1199	1178	1242	1177
2) Do ar						
Temperatura ambiente, °C	27,1	21,9	22,6	23,1	22,8	21,3
Temperatura de secagem, °C	76,8	77,3	78,5	80,6	78,5	77,9
Temperatura de exaustão, °C	33,8	26,9	27,1	28,5	29,6	30,4
Umidade relativa ambiente, %	69,3	89,9	85,0	46,3	68,6	77,4
3) Do secador						
Fluxo de ar, m ³ .min ⁻¹ .m ⁻³	20,5	20,9	20,5	20,1	19,8	18,7
Volume do secador, m ³	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Tempo de carregamento, h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Tempo de descarga, h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Pressão estática, mmca	40,3	34,9	40,0	42,3	43,6	47,0
4) De energia						
Tipo de combustível	GLP	GLP	GLP	GLP	GLP	GLP
Massa de combustível, kg	9,6	10,1	8,1	7,8	6,9	5,7
Energia elétrica, kWh	12,0	13,6	10,4	8,7	8,7	7,1
5) Do desempenho						
Duração do teste, h	6	7	5	7	7	5
Redução do teor de água, % b.u.	5,6	7,5	6,1	5,6	5,1	4,2
5.1 Eficiência energética, kJ.kg⁻¹ de água evaporada						
Incluindo energia elétrica	5.823,8	5.132,2	4.530,3	4.897,1	4.671,5	4.911,9
Excluindo energia elétrica	5.374,2	4.646,5	4.121,7	4.506,2	4.254,3	4.165,1

Tabela 3 – Resultados obtidos com os testes referentes aos tratamentos 3 e 4 no secador rotativo modificado

Parâmetros	Tratamento 3			Tratamento 4		
	SM 100			SM 100 – I		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
1) Dos grãos						
Teor inicial de água, % b.u.	19,1	19,3	19,6	18,4	19,0	18,2
Teor final de água, % b.u.	11,7	11,5	11,3	11,8	12,3	11,6
Temperatura inicial, °C	23,0	22,4	27,6	20,9	20,6	21,8
Temperatura final, °C	58,3	59,7	56,5	58,5	62,5	58,2
Massa específica inicial, kg.m ⁻³	690,5	689,3	682,2	696,1	689,5	698,9
Massa específica final, kg.m ⁻³	734,0	739,0	738,6	726,3	727,6	737,2
Massa inicial, kg	1278,0	1257,0	1246,0	1280,0	1260,0	1274,0
Massa final, kg	1165,0	1146,0	1128,0	1185,0	1143,0	1170,0
2) Do ar						
Temperatura ambiente, °C	23,4	26,3	22,4	26,1	21,2	22,6
Temperatura de secagem, °C	98,3	98,8	97,5	99,1	99,6	100,1
Temperatura de exaustão, °C	30,4	30,3	30,2	31,6	28,6	29,2
Umidade relativa ambiente, %	80,0	68,0	90,0	60,2	82,3	59,8
3) Do secador						
Fluxo de ar, m ³ .min ⁻¹ .m ⁻³	20,6	20,6	20,5	20,6	20,5	20,6
Volume do secador, m ³	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Tempo de carregamento, h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Tempo de descarga, h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Pressão estática, mmca	38,7	39,2	39,5	39,3	40	38,8
4) De energia						
Tipo de combustível	GLP	GLP	GLP	GLP	GLP	GLP
Massa de combustível, kg	10,7	10,6	10,9	9,4	9,6	9,7
Energia elétrica, kWh	10,4	10,4	10,4	8,7	8,7	8,7
5) Do desempenho						
Duração do teste, h	5	5	5	7	7	7
Redução do teor de água, % b.u.	7,4	7,8	8,3	6,6	6,7	6,6
5.1 Eficiência energética, kJ.kg⁻¹ de água evaporada						
Incluindo energia elétrica	4.990,4	4.782,5	4.663,9	4.868,8	4.941,2	5.064,1
Excluindo energia elétrica	4.642,0	4.445,7	4.343,9	4.540,6	4.614,6	4.733,5

Tabela 4 – Resultados obtidos com os testes referentes aos tratamentos 5 e 6 no secador rotativo comercial

Parâmetros	Tratamento 5			Tratamento 6		
	SC 80			SC 100		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
1) Dos grãos						
Teor inicial de água, % b.u.	18,7	18,7	18,7	19,3	18,3	19,1
Teor final de água, % b.u.	11,5	11,7	12,0	12,1	10,9	12,4
Temperatura inicial, °C	28,4	26,4	25,5	24,6	23,0	25,3
Temperatura final, °C	59,9	53,4	50,3	60,1	62,4	62,1
Massa específica inicial, kg.m ⁻³	693,3	647,1	696,0	683,6	702,1	689,0
Massa específica final, kg.m ⁻³	740,2	745,0	747,1	743,2	744,6	746,3
Massa inicial, kg	1242,0	1252,0	1254,0	1278,0	1262,0	1250,0
Massa final, kg	1141,0	1153,0	1153,0	1168,0	1161,0	1146,0
2) Do ar						
Temperatura ambiente, °C	28,8	22,6	23,2	24,6	27,5	23,0
Temperatura de secagem, °C	74,0	74,5	74,0	93,7	93,9	93,4
Temperatura de exaustão, °C	35,5	35,4	32,6	36,4	37,5	36,1
Umidade relativa ambiente, %	63,0	88,4	83,0	75,8	58,8	90,0
3) Do secador						
Fluxo de ar, m ³ .min ⁻¹ .m ⁻³	24,2	24,3	24,3	24,5	24,3	24,3
Volume do secador, m ³	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
Tempo de carregamento, h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Tempo de descarga, h	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Pressão estática, mmca	22,8	21,2	20,8	19,5	21,3	20,5
4) De energia						
Tipo de combustível	GLP	GLP	GLP	GLP	GLP	GLP
Massa de combustível, kg	11,7	13,9	11,3	12,5	13,1	10,2
Energia elétrica, kWh	11,0	11,0	11,0	8,8	8,8	8,8
5) Do desempenho						
Duração do teste, h	4	4	4	3	3	3
Redução do teor de água, % b.u.	7,2	6,9	6,6	7,2	7,4	6,8
5.1 Eficiência energética, kJ.kg⁻¹ de água evaporada						
Incluindo energia elétrica	5.800,0	6.941,7	5.982,3	5.828,5	6.126,0	5.218,6
Excluindo energia elétrica	5.406,0	6.538,0	5.562,0	5.525,0	5.821,0	4.889,0

4.3.1. Consumo de energia elétrica

Nas Tabelas 5, 6 e 7, são apresentados os resultados de consumo de energia elétrica para a carga, descarga, movimentação do ar e do produto nos secadores.

Tabela 5 – Consumo de energia elétrica (kWh), no secador rotativo modificado, referente aos tratamentos 1 e 2

Parâmetros (kWh)	Tratamento 1			Tratamento 2		
	SM 80			SM 80 – I		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
Energia para movimentar o grão	0,4	0,4	0,3	0,2	0,2	0,2
Energia para movimentar o ar	9,4	11,0	7,9	6,3	6,3	4,7
* Energia para o carregamento	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
* Energia para descarga	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Consumo total de energia elétrica	12,0	13,6	10,4	8,7	8,7	7,1

* O tempo médio de carga e descarga dos secadores foi de 0,5 hora.

Tabela 6 – Consumo de energia elétrica (kWh), no secador rotativo modificado, referente aos tratamentos 3 e 4

Parâmetros (kWh)	Tratamento 3			Tratamento 4		
	SM 100			SM 100 – I		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
Energia para movimentar o grão	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
Energia para movimentar o ar	7,9	7,9	7,9	6,3	6,3	6,3
* Energia para o carregamento	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
* Energia para descarga	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Consumo total energia elétrica	10,4	10,4	10,4	8,7	8,7	8,7

Tabela 7 – Consumo de energia elétrica (kWh), no secador rotativo comercial, referente aos tratamentos 5 e 6

Parâmetros (kWh)	Tratamento 5			Tratamento 6		
	SC 80			SC 100		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
Energia para movimentar o grão	3,0	3,0	3,0	2,3	2,3	2,3
Energia para movimentar o ar	5,8	5,8	5,8	4,4	4,4	4,4
* Energia para o carregamento	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
* Energia para descarga	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
Consumo total energia elétrica	11,0	11,0	11,0	8,8	8,8	8,8

Analisando-se as Tabelas 5, 6 e 7, observa-se que o consumo médio de energia elétrica para movimentar os grãos no secador rotativo comercial foi 9,94 vezes maior que no secador rotativo modificado. Isto era esperado, uma vez que, devido às modificações ocorridas no mesmo, a movimentação dos grãos passou a ser realizada em intervalos de tempo regulares (ver Quadro 1).

Comparando-se os tratamentos 1 e 5, 3 e 6, observa-se que os consumos totais de energia elétrica no secador rotativo modificado foram respectivamente, 9,1 e 18,2 % maiores que no secador rotativo comercial. Isto se deve ao fato de o tempo de secagem no secador modificado ter sido maior.

4.3.2. Consumo de GLP

O consumo de gás, obtido após teste preliminar com o gerador de calor a gás original, foi de 5 a 6 kg.h⁻¹. Com as modificações realizadas no gerador de calor a gás, os consumos médios de GLP foram iguais a 1,5; 1,9; 2,2; 2,4; 3,1 e 4,1 kg de gás por hora, para os tratamentos 1, 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente. Estes valores representam uma redução média do consumo de gás de 75%.

Os valores médios de consumo de GLP (total) foram iguais a 9,3; 6,8; 10,7; 9,6; 12,3 e 11,9 kg, nos tratamentos 1, 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente. Comparando-se os tratamentos 1 e 5, 3 e 6, observa-se que os consumos médios de GLP com o gerador de calor a gás do secador comercial, foram 32,3 e 11,2% maiores em relação ao gerador de calor a gás do secador modificado, embora o tempo de secagem tenha sido maior neste secador. Isto ocorreu devido ao fato de o fluxo de ar (m³.min⁻¹.m⁻³) ter sido 19,7% superior no secador comercial. Além disto, observa-se melhor aproveitamento do ar de secagem no secador modificado. Isto é verificado devido a menor temperatura do ar de exaustão neste secador, comprovando sua maior eficiência.

4.4. Análise de qualidade do produto após a secagem

4.4.1. Susceptibilidade à quebra (SQ)

Constam nas Tabelas 8 e 9 os resultados de susceptibilidade à quebra dos grãos.

Tabela 8 – Susceptibilidade à quebra do produto, em percentagem, nos tratamentos 1, 2, 3, 4

Parâmetros	Tratamento 1			Tratamento 2			Tratamento 3			Tratamento 4		
	SM 80			SM 80 - I			SM 100			SM 100 - I		
	Teste			Teste			Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
S. Q.	1,1	1,5	1,1	1,2	1,3	1,2	3,5	4,2	2,0	1,4	2,3	2,1

Tabela 9 – Susceptibilidade à quebra do produto, em percentagem, nos tratamentos 5, 6

Parâmetros	Tratamento 5			Tratamento 6		
	SC 80			SC 100		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
S.Q.	1,2	1,3	1,2	1,7	2,2	1,6

Os índices de susceptibilidade à quebra encontrados em todos os testes foram inferiores a 5%. Estes valores são considerados pequenos, indicando boa técnica de manuseio do secador (SILVA et al., 2000). Observa-se, também, que os índices de susceptibilidade dos grãos à quebra foram relativamente maiores quando foram utilizadas temperaturas do ar de secagem mais elevadas. Isto foi verificado, também, por FRANCESCHINI et al. (1996), ALVES et al. (2001) e SABIONI (1986).

4.4.2. Índices de trincas

Os resultados das percentagens de trincas do produto estão relacionados nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 – Percentagem dos tipos de trincas do produto obtidos após a secagem no secador modificado, nos tratamentos 1, 2, 3 e 4

Parâmetros	Tratamento 1			Tratamento 2			Tratamento 3			Tratamento 4		
	SM 80			SM 80 - I			SM 100			SM 100 - I		
	Teste			Teste			Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Zero	8,6	19,2	74,1	40,7	64,5	64,3	22,6	7,7	36,3	50,9	19,0	22,3
Simplex	16,8	23,1	10,2	29,7	20,9	23,2	23,5	14,0	17,6	12,1	20,4	20,2
Duplas múltiplas	74,6	57,7	15,7	29,7	14,5	12,5	53,9	78,3	46,1	37,0	60,6	57,5
Total	91,4	80,8	25,9	59,3	35,5	35,7	77,4	92,3	63,7	49,1	81,0	77,7

Tabela 11 – Percentagem dos tipos de trincas do produto obtidos após a secagem no secador comercial, nos tratamentos 5 e 6

Parâmetros	Tratamento 5			Tratamento 6		
	SC 80			SC 100		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
Zero	8,2	20,8	62,7	36,2	15,3	4,2
Simple	19,9	32,9	22,0	25,1	24,9	20,1
Duplas ou múltiplas	71,9	46,4	15,3	38,7	59,8	75,6
Total	91,8	79,2	37,3	63,8	84,7	95,8

Os valores médios de percentagens totais de trincas do milho, obtidos após a secagem no secador rotativo comercial, foram iguais a 69,4 e 81,4%, respectivamente nos tratamentos 5 e 6. E no secador rotativo modificado, as médias de percentagens totais de trincas do produto, foram iguais a 66,0; 43,5; 77,8; e 69,3%, nos tratamentos 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Embora esses percentuais de trincas encontradas após secagem nos dois secadores rotativos tenham sido elevados, observa-se que eles foram inferiores às percentagens de trincas apresentadas por SABIONI (1986) que foram, respectivamente, iguais a 72 e 86% para as temperaturas do ar de secagem de 80 e 100 °C.

Comparando-se os tratamentos 1 e 5, 3 e 6 observou-se que as percentagens totais de trincas no secador rotativo comercial foram 5,1 e 4,6% maiores que no secador rotativo modificado, para as temperaturas do ar de secagem de 80 e 100 °C respectivamente. Em comparação com o secador modificado, a maior movimentação dos grãos pelo secador comercial pode ter contribuído para o aumento de trincas no produto.

A percentagem do tipo de trincas variou em relação às temperaturas do ar de secagem. Observa-se nas Tabelas 10 e 11, que as percentagens de trincas do tipo duplas ou múltiplas foram maiores à medida que se elevou a temperatura do ar de secagem.

Verificou-se que o secador rotativo modificado, operando com interrupção no sistema de aquecimento de ar (tratamentos 2 e 4), proporcionou menor percentual de trincas no produto.

A Figura 25 exemplifica um grão sem danos e um grão com trincas.

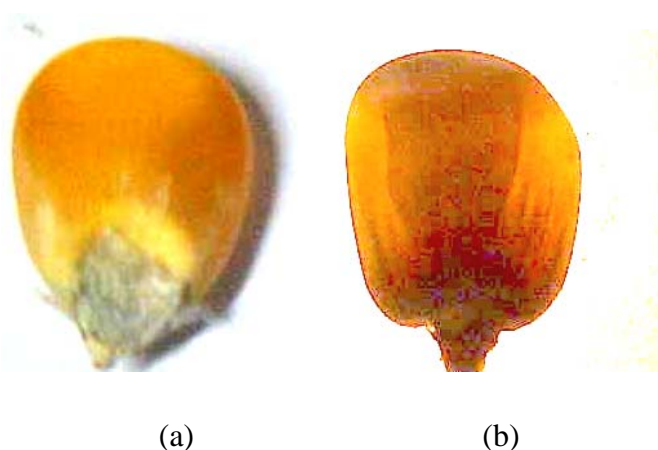


Figura 25 – Grãos de milho sem danos (a) e com duas trincas no endosperma (b).

4.5. Análise de custo

Nas Tabelas 12, 13, 14 são apresentados os resultados experimentais e nas Tabelas 15, 16 e 17 os resultados simulados, obtidos na análise de custo dos sistemas de secagem.

Tabela 12 – Resultados experimentais de custo de combustível, operação do ventilador, movimentação do secador, custo fixo e custo total de secagem no secador rotativo modificado

Custos (R\$/60 kg)	Tratamento 1			Tratamento 2		
	SM 80			SM 80 – I		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
Combustível	1,16	1,18	0,91	0,89	0,77	0,65
Operação do ventilador	0,10	0,14	0,09	0,08	0,07	0,06
Movimentação do secador	0,004	0,005	0,004	0,003	0,003	0,002
Custos fixos	0,71	0,78	0,64	0,79	0,78	0,65
Total	1,97	2,10	1,65	1,76	1,62	1,36

Tabela 13 – Resultados experimentais de custo de combustível, operação do ventilador, movimentação do secador, custo fixo e custo total de secagem no secador rotativo modificado

Custos (R\$/60 kg)	Tratamento 3			Tratamento 4		
	SM 100			SM 100 – I		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
Combustível	1,23	1,25	1,30	1,07	1,11	1,11
Operação do ventilador	0,10	0,10	0,10	0,08	0,08	0,08
Movimentação do secador	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003
Custos fixos	0,67	0,65	0,65	0,83	0,83	0,82
Total	2,00	2,00	2,06	1,98	2,02	2,01

Tabela 14 – Resultados experimentais de custo de combustível, operação do ventilador, movimentação do secador, custo fixo e custo total de secagem no secador rotativo comercial

Custos (R\$/60 kg)	Tratamento 5			Tratamento 6		
	SC 80			SM 100		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
Combustível	1,39	1,62	1,32	1,44	1,53	1,20
Operação do ventilador	0,07	0,07	0,07	0,05	0,05	0,05
Movimentação do secador	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03
Custos fixos	0,46	0,46	0,46	0,36	0,36	0,36
Total	1,96	2,19	1,89	1,88	1,97	1,63

Tabela 15 – Resultados simulados de custo de combustível, operação do ventilador, movimentação do secador, custo fixo e custo total de secagem no secador rotativo modificado

Custos (R\$/60 kg)	Tratamento 1			Tratamento 2		
	SM 80			SM 80 – I		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
Combustível	1,16	1,18	0,91	0,89	0,77	0,65
Operação do ventilador	0,10	0,14	0,09	0,08	0,07	0,06
Movimentação do secador	0,004	0,005	0,004	0,003	0,003	0,002
Custos fixos	0,25	0,28	0,23	0,28	0,28	0,24
Total	1,51	1,60	1,24	1,25	1,13	0,95

Tabela 16 – Resultados simulados de custo de combustível, operação do ventilador, movimentação do secador, custo fixo e custo total de secagem no secador rotativo modificado

Custos (R\$/60 kg)	Tratamento 3			Tratamento 4		
	SM 100			SM 100 – I		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
Combustível	1,23	1,25	1,30	1,07	1,11	1,11
Operação do ventilador	0,10	0,10	0,10	0,08	0,08	0,08
Movimentação do secador	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003
Custos fixos	0,24	0,23	0,23	0,30	0,30	0,29
Total	1,57	1,58	1,63	1,45	1,49	1,48

Tabela 17 – Resultados simulados de custo de combustível, operação do ventilador, movimentação do secador, custo fixo e custo total de secagem no secador rotativo comercial

Custos (R\$/60 kg)	Tratamento 5			Tratamento 6		
	SC 80			SM 100		
	Teste			Teste		
	1	2	3	1	2	3
Combustível	1,39	1,62	1,32	1,44	1,53	1,20
Operação do ventilador	0,07	0,07	0,07	0,05	0,05	0,05
Movimentação do secador	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03
Custos fixos	0,17	0,15	0,17	0,13	0,13	0,13
Total	1,67	1,88	1,60	1,65	1,74	1,40

Observa-se nas Tabelas 12, 13 e 14, em todos os tratamentos, que as parcelas de custo mais elevadas foram os custos fixos e os custos de combustível. Com relação aos custos fixos, esse fato ocorreu devido às pequenas capacidades estáticas e de secagem dos secadores rotativos estudados. Além disto, o custo com a mão-de-obra, que pela metodologia adotada, é parte do custo fixo, tornou este custo mais elevado. Deve-se ressaltar que o custo fixo pode ser reduzido, significativamente, caso se aumente a capacidade estática dos secadores, o que implica, também, na redução do custo operacional. Isto pode ser verificado nas Tabelas 15, 16 e 17 analisando-se os resultados simulados para uma secador de capacidade estática igual a 5 m³. O elevado custo com o combustível deve-se, principalmente, ao elevado preço do mesmo e às taxas elevadas de consumo de GLP pelos geradores de calor a gás estudados.

Comparando-se o custo de combustível entre os tratamentos 1 e 5, 3 e 6, apresentado Tabelas 12, 13 e 14, verifica-se que o custo de combustível foi, respectivamente, 24,9 e 9,4% menor no secador rotativo modificado.

Analisando-se o custo total de secagem mostrado nas Tabelas 12, 13 e 14 e comparando-se os tratamentos 1 e 5, 3 e 6, nota-se que o custo total foi, respectivamente, 4,9% menor no secador modificado e 9,4% menor no secador comercial.

O custo de secagem de milho informado pela CONAB (2006) foi de aproximadamente R\$ 0,90 por 60 kg de produto seco. Este valor é, em média, 54,4% menor que os custos totais de secagem apresentados nas Tabelas 12, 13 e 14, referentes aos tratamentos 1, 3, 5 e 6. Isto se deve ao fato de a capacidade estática dos secadores utilizados para o cálculo do custo de secagem da CONAB (2006), que é de 80 toneladas, serem muito maiores que os secadores rotativos estudados.

Comparando-se os resultados experimentais com os simulados, nos tratamentos 1, 3, 5 e 6, verifica-se que o aumento da capacidade estática dos secadores de 1,6 m³ para 5 m³, proporcionou uma redução média do custo total de secagem, por 60 kg de produto seco, de R\$ 1,94 para R\$ 1,59.

Observa-se na Tabela 14, para o secador rotativo comercial, que o custo total foi menor quando se elevou a temperatura do ar de secagem. Isto foi observado, também, por YOUNG e DICKENS (1975), OCTAVIANI (2000) e PORTELLA e EICHELBERGER (2001). Já nas Tabelas 12 e 13, para o secador rotativo modificado, nota-se que isto não ocorreu, ou seja, o custo total foi maior quando se elevou a temperatura do ar de secagem.

5. CONCLUSÕES

Considerando-se os resultados obtidos e as condições em que foi realizado experimento, pode-se concluir que:

1 – o consumo específico médio de energia no secador rotativo modificado (SM 80 e SM 100) foi 22,4% menor que no secador rotativo comercial (SC 80 e SC 100);

2 – o secador rotativo modificado, operando de forma intermitente, apresentou o menor consumo específico de energia;

3 – as modificações técnicas realizadas no gerador de calor a gás proporcionaram redução média de consumo de combustível em aproximadamente 50%;

4 – os índices de susceptibilidade à quebra do milho, obtido após a secagem nos secadores rotativo, comercial e modificado foram inferiores a 5%;

5 – a percentagem média de trinca total do milho no secador comercial (SC 80 e SC 100) foi 17,6% superior àquela obtida com secador modificado (SM 80 e SM 100);

6 – o custo total de secagem foi, em média, 2,2% menor no secador modificado que no secador comercial.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, W. M.; FARONI, L. R. D'A.; QUEIROZ, D. M.; CORRÊA, P. C.; GALVÃO, J. C. C. Qualidade dos grãos de milho em função da umidade de colheita e da temperatura de secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v.5, n.3, p.469-474, 2001.
- BAKKER-ARKEMA, F. W. **Grains and grain quality**. In: BAKKER-ARKEMA, F. W.; De BAERDEMAEKER, J.; AMIRANTE, P.; RUIZ-ALTISENT, M.; STUDMAN, C. J. Handbook of agricultural engineering: agro processing engineering. 1º ed., vol. IV. St. Joseph: ASAE, 1999. p. 1-10;
- 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);
- BÁRTHOLO, G. F.; MAGALHÃES FILHO, A. A. R.; GUIMARÃES, P. T. G. Cuidados na colheita, no preparo e no armazenamento do café. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte: EPAMIG, v. 14, n. 162, p. 33-44, 1989.
- BIZZO, W. A. **EM 722 - Geração, distribuição e utilização de vapor**. 30 de setembro de 2003. 128 p. Notas de aulas. Impresso. Disponível em URL: <http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP0.pdf>. Consulta realizada em 02 de abril de 2006.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Especificações para a padronização, classificação e comercialização interna do milho (*Zea mays* L.), 1976. Disponível em URL: <http://www.agricultura.gov.br>. Consulta realizada em 02 de abril de 2006.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Regras para análise de sementes. Brasília: DNPOVDISEM, 1992. 365 p.;
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Balanço energético nacional – 2005. Brasília: MME 153 p.;
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.H. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992. 450p.
- CARDOSO SOBRINHO, J. Simulação e avaliação de sistemas de secagem de café. Viçosa: UFV, 2001. 112p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2001.

- CAVARIANI, C. Secagem estacionária de sementes de milho com distribuição radial do fluxo de ar. Piracicaba, 1996. 85 p. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo.
- CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais. Disponível em: <http://www.cemig.com.br>. Consulta realizada em 02 de setembro de 2006.
- CHALFOUN, S. M.; CARVALHO, V. D. **Colheita e preparo do café**. Lavras, UFLA/FAEPE, 1997. 49p.
- CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Indicadores da agropecuária. Nº 8, 2006. 61p. Disponível em URL: <http://www.conab.gov.br>. Consulta realizada em 02 de julho de 2006.
- 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.
- COSTA, E. C. **Compressores**. São Paulo – SP: Ed. Edgard Blucher, 172 p.1978.
- FRANCESCHINI, A. S.; MARTINS, J. H.; CORREA, P. C.; FARONI, L. R. D’A.; CECON, P. R. Avaliação da qualidade do Milho BR-201 submetido a diferentes condições de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.21, n.1/2, p.13-16, 1996.
- FREIRE, A. T. **Projeto e avaliação de um sistema de secagem combinado de café (Coffea arabica L.) despulpado**. Viçosa – MG: UFV, 1998. 98p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.
- HALL, G.E. Test-weight changes of shelled corn during drying. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 15, n. 2, p. 320-323, 1972.
- LACERDA FILHO, A. F. de. **Avaliação de diferentes sistemas de secagem e suas influências na qualidade do café (Coffea arabica L.)** Viçosa: UFV, 1986. 136p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1986.
- LACERDA FILHO, A.; FERREIRA, W. A.; CAMATA, D. Avaliação de um sistema de secagem de sementes de milho (*Zea mays*, L.), com pré-secagem das sementes nas espigas, repouso e secagem, em silos, com distribuição radial de ar. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.24, n.1 p.39-47, 1999.
- LACERDA FILHO, A.F de. **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.
- LOPES, R. P. AFONSO, A. D. L., SILVA, J. de S. Energia no pré-processamento de produtos agrícolas. In: SILVA, J. de S. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Viçosa, MG: 1ª ed. Aprenda fácil, 2000. 502 p.
- MELO, E. C.; LOPES, D. C.; CORRÊA, P. C. GRAPSI - Programa computacional para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v.12, n.2, p.154-162, Abr./Jun.,2004.
- 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, 76p. 1995.

- MINASGAS. Disponível em: <http://www.minasgas.com.br>. Consulta realizada em 01 de agosto de 2006.
- OCTAVIANI, J.C. Avaliação de secadores horizontais rotativos com utilização de lenha e gás liquefeito de petróleo em secagem de café cereja descascado desmucilado. Campinas, Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Feagri/UNICAMP, 2005. 130p.
- OCTAVIANI, J.C. Secagem de café cereja descascado desmucilado com utilização de gás liquefeito de petróleo. Campinas, Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola), Feagri/UNICAMP, 2000. 92p.
- PINHALENSE. Disponível em: <http://www.pinhalse.com.br>. Consulta realizada em 01 de agosto de 2006.
- PORTELLA, J. A.; EICHELBERGER, L. **Uso de gás liquefeito de petróleo na secagem estacionária de milho em secador de leito fixo**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2001. 4p. html. (Embrapa Trigo Comunicado Técnico Online, 64). Disponível: http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_co64.htm. Consulta realizada em junho de 2006.
- REINATO, C. H. R.; VILELA, E. R.; CARVALHO, F. M.; MEIRELES, E. de P. **Consumo de energia e custo de secagem de café cereja em propriedades agrícolas do Sul de Minas Gerais**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande - PB, v. 6, n. 1, p. 112 - 116, 2003.
- SABIONI, P. M. Projeto e avaliação de um secador de fluxos cruzados, intermitente e com reversão do fluxo de ar, na secagem de milho (*Zea mays* L.). Viçosa: UFV, 1986. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1986.
- SANTOS, J. P., WAQUIL, J. M., MAIA, J. D. G. Época de colheita do milho e sua influência sobre perdas de grãos no campo e no armazenamento em espigas. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.22, n.2, 1997. 40 p.
- SANTOS, R. R. Modificação e avaliação de um secador rotativo horizontal, com distribuição radial do fluxo de ar, para secagem de café. Viçosa: UFV, 2002. 62 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2002.
- SILVA, J. de S., AFONSO, A. D. L., DONZELLES, S. M. L. Secagem e secadores. In: SILVA, J. de S. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Viçosa, MG: 1ª ed. Aprenda fácil, 2000. 502 p.
- SILVA, J. de S., BERBERT, P. A., AFONSO, A. D. L., RUFATO, S. Qualidade dos grãos. In: SILVA, J. de S. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Viçosa, MG: 1ª ed. Aprenda fácil, 2000. 502 p.
- SILVA, J. de S., LACERDA FILHO, A. F., BERBERT, P. A. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. In: SILVA, J. de S. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Viçosa, MG: 1ª ed. Aprenda fácil, 2000. 502 p.
- SILVA, J. N., LOPES, R. P., SILVA, J. de S. Alternativas Energéticas para secagem de café de qualidade. In: ZAMBOLIM, L. **Produção integrada de café**. Viçosa, MG: UFV; DPF, 2003. 709p.
- THOMPSON, T.L., FOSTER, G.H., PEART, R.M. Mathematical simulation of corn drying – A new model. Transaction of the ASAE, Michigan, v.11, n.4, p.582-586, 1968.

VLASOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. Curitiba: Editora da UFPR, 2001. 185 p.

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.

7. APÊNDICE

Quadro 1A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo modificado, no teste 1 do tratamento 1

Tempo (h)	Ambiente		Grãos	Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)	Teor de água (%) b.u.	Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão			Massa (kg)
					grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				
0	51	34	18,70	82,1	24,3	25,1	30,2	42	695,5	-
1	64	29	16,90	77,7	44,6	40,6	31,8	42	689,7	1,3
2	65	27	15,64	77,9	46,9	43,3	31,0	42	725,7	1,3
3	67	27	14,41	76,9	48,5	41,7	32,6	40	732,8	1,6
4	68	27	13,32	77,8	54,2	47,4	34,5	40	726,7	1,6
5	80	24	12,79	78,3	55,9	51,8	34,6	38	736,2	1,8
6			12,00	81,4	60,4	56,4	35,2	38	739,6	1,9

Quadro 2A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo modificado, no teste 2 do tratamento 1

Tempo (h)	Ambiente		Grãos	Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)	Teor de água (%) b.u.	Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão			Massa (kg)
					grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				
0	83	23	19,22	78,9	26,0	26,0	25,7	30	694,0	-
1	90	23	19,15	78,7	45,8	41,0	27,5	36	691,5	1,8
2	91	22	18,56	75,6	46,2	43,6	26,0	36	706,8	1,7
3	91	22	16,42	78,3	47,7	44,4	26,8	36	710,4	1,6
4	91	22	15,55	77,8	50,2	47,2	25,8	36	719,2	1,3
5	91	21	13,74	77,7	50,7	44,3	27,3	32	722,4	1,3
6	91	21	12,95	75,9	49,2	43,3	29,0	37	727,8	1,7
7	91	21	11,65	78,7	49,7	46,0	27,0	37	730,6	1,7

Quadro 3A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo modificado, no teste 3 do tratamento 1

Tempo (h)	Ambiente		Grãos		Temperatura (°C)			Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP	
	UR (%)	Tbs (°C)	Teor de água (%) b.u.		Ar de secagem	Grãos				Ar de exaustão	Massa (kg)
			sec.	rep.		grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				
0	65	26	19,53		79,03	27,2	26,8	27,1	39	698,7	-
1	81	25	19,05		78,17	46,8	39,5	26,6	38	679,8	1,6
2	91	22	17,40		81,13	47,6	43,3	28,2	40	699,0	1,6
3	91	21	16,53		77,70	54,5	47,0	26,7	42	709,6	1,6
4	91	20	14,72		77,17	54,7	47,4	27,6	40	722,5	1,6
5	91	21	13,91		77,97	54,8	48,1	26,6	41	728,3	1,6

Quadro 4A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo modificado, no teste 1 do tratamento 2

Tempo (h)	Ambiente		Grãos		Temperatura (°C)			Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP	
	UR (%)	Tbs (°C)	Teor de água (%) b.u.		Ar de secagem	Grãos				Ar de exaustão	Massa (kg)
			sec.	rep.		grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				
0	42	24		18,1	81,5	17,4	17,4	23,3	43	692,6	-
1	41	25	18,3		80,8	44,5	29,2	27,8	39	707,6	1,9
2	39	25		17,5	82,4	43,1	31,9	27,9	43	710,9	
3	41	24	16,9		78,4	45,9	39,5	28,4	42	717,6	1,7
4	63	23,5		15,6	81,7	47,1	37,8	31,5	45	723,1	
5	64	23	14,9		78,9	55,9	45,4	29,8	41	724,5	1,8
6	74	21		14,3	80,1	46,7	40,2	25,7	43	727,2	
7	82	19	12,2		80,6	57,0	44,4	33,8	42	733,5	2,1

Quadro 5A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo modificado, no teste 2 do tratamento 2

T e m p o (h)	Ambiente		Grãos		Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)	Teor de água (%) b.u.		Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão			Massa (kg)
			sec.	rep.		grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				
0	60	23		17,8	82,5	21,0	21,3	21,8	43	702,6	
1	54	25	17,2		73,4	51,5	39,7	29,2	43	703,3	1,8
2	52	25		17,1	81,5	45,8	35,7	28,5	43	706,3	
3	50	25	15,0		75,8	55,1	46,9	29,3	43	726,8	1,6
4	75	24		14,6	76,5	54,2	46,6	30,1	48	727,8	
5	80	22	13,6		78,1	54,8	44,8	31,8	44	723,4	1,5
6	87	22		13,0	80,4	54,6	45,4	32,5	43	730,4	
7	91	19	12,7		80,1	56,2	53,6	33,5	42	742,8	1,7

Quadro 6A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo modificado, no teste 3 do tratamento 2

T e m p o (h)	Ambiente		Grãos		Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)	Teor de água (%) b.u.		Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão			Massa (kg)
			sec.	rep.		grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				
0	59	23		16,4	79,3	23,2	23,4	25,2	45	712,5	
1	57	24	15,8		76,5	46,5	36,4	29,4	46	716,8	1,4
2	77	23		15,8	79,5	45,8	35,7	30,5	48	723,3	
3	90	21	14,3		74,3	55,0	49,4	31,8	45	727,7	1,4
4	91	19		13,8	80,5	55,0	48,8	32,2	49	734,7	
5	91	19	12,2		77,2	56,7	54,0	33,3	49	740,2	1,5

Quadro 7A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo modificado, no teste 1 do tratamento 3

Tempo (h)	Ambiente		Grãos	Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)	Teor de água (%) b.u.	Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão			Massa (kg)
					grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				
0	63	26	19,62	100,4	23,0	23,1	28,9	40	681,5	-
1	65	26	19,14	99,9	55,0	42,0	30,7	38	688,3	2,0
2	81	25	18,81	96,3	61,8	49,6	29,3	38	689,6	2,0
3	90	23	15,40	100,0	64,8	54,2	30,9	38	707,7	2,0
4	90	20	14,21	98,3	64,7	53,4	29,6	38	724,5	2,1
5	91	21	11,77	93,7	64,5	52,1	33,1	40	727,6	2,0

Quadro 8A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo modificado, no teste 2 do tratamento 3

Tempo (h)	Ambiente		Grãos	Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)	Teor de água (%) b.u.	Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão			Massa (kg)
					grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				
0	59	27	19,34	99,8	22,3	22,4	28,3	39	686,4	-
1	58	27	19,14	101,0	53,7	40,5	29,5	39	689,3	2,1
2	53	29	18,15	97,6	56,1	47,8	31,4	39	694,2	2,1
3	65	27	14,52	96,1	59,8	48,6	28,6	39	719,8	2,1
4	83	25	14,02	99,0	65,7	52,9	32,3	40	725,8	2,0
5	90	23	11,50	97,7	65,5	53,9	31,8	39	739,5	2,0

Quadro 9A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo modificado, no teste 3 do tratamento 3

Tempo (h)	Ambiente		Grãos	Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)	Teor de água (%) b.u.	Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão			Massa (kg)
					grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				
0	90	25	19,67	100,6	27,6	27,5	29,6	38	682,2	-
1	90	25	19,54	102,2	62,8	46,7	30,8	38	677,8	2,4
2	90	22	17,44	101,5	61,1	48,8	26,9	40	703,7	2,3
3	90	21	16,26	94,1	64,0	51,0	29,7	41	714,2	2,3
4	90	21	12,39	94,0	63,7	52,9	33,1	41	734,1	2,3
5	90	20	11,29	92,5	60,2	52,9	30,9	39	738,6	2,5

Quadro 10A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo modificado, no teste 4 do tratamento 3

Tempo (h)	Ambiente		Grãos	Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)	Teor de água (%) b.u.	Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão			Massa (kg)
					grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				
0	86	22	15,45	101,8	22,4	22,3	25,3	41	719,0	-
1	69	23	15,10	99,3	59,8	43,7	29,9	41	729,4	2,3
2	62	24	13,00	98,9	66,9	55,3	39,6	43	735,7	2,1
3	61	24	11,34	98,8	66,8	61,0	41,5	38	737,4	2,1
4	59	25	10,27	97,5	64,7	61,2	42,6	37	740,2	2,3

Quadro 11A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo modificado, no teste 1 do tratamento 4

T e m p o (h)	Ambiente		Grãos		Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)	Teor de água (%) b.u.		Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão			
			sec.	rep.		grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				Massa (kg)
0	40	27		18,4	100,0	21,0	20,9	26,1	42	696,1	-
1	43	28	18,2		98,4	55,9	38,1	31,3	38	687,9	2,4
2	46	29		18,0	96,4	50,4	37,5	32,9	35	695,0	
3	47	28	16,9		98,8	61,5	47,4	32,6	38	714,6	2,2
4	55	27		15,9	100,5	59,4	45,1	31,7	43	716,4	
5	70	25	14,7		100,6	71,1	59,5	29,7	38	717,3	2,3
6	89	23		14,5	99,7	63,0	48,4	29,0	39	720,7	
7	92	22	12,7		94,1	64,7	52,4	39,5	41	733,4	2,4

Quadro 12A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo modificado, no teste 2 do tratamento 4

T e m p o (h)	Ambiente		Grãos		Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)	Teor de água (%) b.u.		Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão			
			sec.	rep.		grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				Massa (kg)
0	76	21		19,0	100,3	20,6	20,7	22,4	36	676,1	-
1	82	21	18,2		97,6	55,1	40,2	27,4	41	681,6	2,3
2	82	21		17,9	100,8	51,3	35,9	27,1	38	689,5	
3	83	22	16,3		98,6	60,2	43,1	28,8	39	707,3	2,4
4	73	23		15,0	100,5	56,6	42,8	31,7	43	719,1	
5	81	22	14,8		95,8	68,1	51,5	30,0	42	723,9	2,3
6	91	20		13,8	100,1	59,4	48,5	32,4	41	724,6	
7	91	20	12,2		98,5	68,1	56,9	28,8	40	732,2	2,5

Quadro 13A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo modificado, no teste 3 do tratamento 4

T e m p o (h)	Ambiente		Grãos		Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)	Teor de água (%) b.u.		Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão			Massa (kg)
			sec.	rep.		grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				
0	62	22		18,2	100,8	21,2	21,3	23,7	35	689,8	-
1	51	24	18,0		96,8	57,7	39,6	29,4	37	693,9	2,2
2	50	24		17,9	102,1	53,9	38,2	30,0	39	699,0	
3	48	25	16,1		97,8	63,8	49,1	30,0	39	715,1	2,3
4	47	24		16,1	101,4	62,1	45,5	32,8	43	713,2	
5	51	23	14,3		98,2	65,7	57,7	30,2	39	722,9	2,5
6	80	20		14,3	101,4	65,0	52,1	28,9	39	726,0	
7	89	19	11,5		102,5	66,6	62,0	28,7	39	736,7	2,6

Quadro 14A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo comercial, no teste 1 do tratamento 5

Tempo (h)	Ambiente		Grãos		Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)	Teor de água (%) b.u.	Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão	Volume (m ³)			
					grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)					
0	51	34	18,65	81,3	28,3	28,6	31,7	24	692,6	2,62	
1	64	29	15,42	71,3	46,6	41,6	35,2	24	706,4	3,86	
2	65	27	14,01	71,8	45,0	42,0	32,6	24	723,2	5,24	
3	67	27	12,61	71,3	57,5	52,2	39,6	22	731,9	6,45	
4	68	27	11,46	74,3	61,2	58,6	38,6	20	743,9	7,86	

Quadro 15A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo comercial, no teste 2 do tratamento 5

Tempo (h)	Ambiente		Grãos	Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)	Teor de água (%) b.u.	Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão			Volume (m ³)
					grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				
0	79	24	18,68	81,3	27,9	25,0	30,2	20	647,1	7,86
1	90	23	16,6	75,4	51,9	41,7	34,0	22	726,4	9,87
2	91	22	14,98	74,0	50,7	44,5	36,1	22	732,2	11,08
3	91	22	13,22	71,8	57,2	53,8	38,4	20	734,7	12,41
4	91	22	11,95	75,3	57,1	49,7	38,2	22	738,5	14,02

Quadro 16A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo comercial, no teste 3 do tratamento 5

Tempo (h)	Ambiente		Grãos	Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)	Teor de água (%) b.u.	Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão			Volume (m ³)
					grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				
0	65	26	18,66	80,2	25,5	25,5	26,7	20	695,6	14,02
1	81	25	15,59	73,2	46,9	37,2	31,6	20	716,2	15,44
2	87	22	14,30	70,7	47,2	39,5	33,6	20	736,2	16,71
3	91	22	12,9	73,1	49,5	43,0	34,8	22	745,7	17,75
4	91	21	11,68	75,2	52,9	47,6	36,0	22	749,0	19,24

Quadro 17A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo comercial, no teste 4 do tratamento 5

Tempo (h)	Ambiente		Grãos	Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)	Teor de água (%) b.u.	Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão			Volume (m ³)
					grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				
0	40	28	18,58	82,2	21,2	21,4	26,6	16	693,4	36,14
1	42	29	16,25	72,1	43,7	37,2	35,1	21	722,1	37,77
2	46	29	13,71	78,0	46,1	42,8	37,5	21	743,6	39,20
3	48	28	12,82	74,5	49,6	46,0	39,0	21	742,8	42,15

Quadro 18A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo comercial, no teste 5 do tratamento 5

Tempo (h)	Ambiente		Grãos	Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)	Teor de água (%) b.u.	Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão			Volume (m ³)
					grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				
0	67	23,5	15,35	83,4	23,5	23,2	26,3	23	718,8	50,44
1	64	24	15,16	76,2	63,0	41,2	35,1	24	723,3	51,99
2	61	24	12,06	77,5	62,3	47,2	36,5	23	741,2	53,37
3	59	24,7	10,87	77,5	66,5	45,4	43,5	21	747,4	54,56

Quadro 19A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo comercial, no teste 1 do tratamento 6

Tempo (h)	Ambiente		Grãos	Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)	Teor de água (%) b.u.	Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão			Volume (m ³)
					grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				
0	63	26	19,27	98,6	24,5	24,7	29,8	18	680,6	19,53
1	64	26	16,55	94,4	57,6	44,3	35,6	20	723,8	21,91
2	86	24	14,27	91,6	67,3	48,7	38,7	20	738,9	23,52
3	90	22,5	12,15	90,1	66,9	53,4	41,6	20	747,9	25,09

Quadro 20A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo comercial, no teste 2 do tratamento 6

Tempo (h)	Ambiente		Grãos	Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)	Teor de água (%) b.u.	Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão			Volume (m ³)
					grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				
0	59	27	18,30	96,5	22,9	23,1	28,6	20,0	702,3	25,29
1	58	27	17,21	95,9	59,0	40,6	33,3	22,0	718,3	27,67
2	53	29	13,62	94,7	60,8	49,4	40,5	22,0	722,8	29,37
3	65	27	11,46	95,2	68,6	56,3	47,6	21,0	744,6	31,11

Quadro 21A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo comercial, no teste 3 do tratamento 6

Tempo (h)	Ambiente		Grãos	Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)		Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão			
			Teor de água (%) b.u.		grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				Volume (m ³)
0	90	25	19,13	96,4	26,1	24,6	28,9	18,0	688,8	31,28
1	90	24	18,98	91,7	63,2	49,9	34,9	22,0	683,8	32,40
2	90	22	15,48	93,7	64,1	47,2	38,5	22,0	728,7	34,04
3	90	21	13,03	91,7	70,5	53,7	42,2	20,0	744,4	35,80

Quadro 22A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo comercial, no teste 4 do tratamento 6

Tempo (h)	Ambiente		Grãos	Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)		Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão			
			Teor de água (%) b.u.		grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				Volume (m ³)
0	49	24,5	17,86	96,8	22,8	22,6	25,5	20,0	699,3	40,71
1	57	23	18,41	94,5	59,0	46,6	31,9	20,0	693,6	41,63
2	87,5	21,5	14,67	92,5	65,7	44,6	36,7	22,0	743,6	43,84
3	90	19	12,54	93,8	65,3	52,2	40,1	22,0	742,6	45,57

Quadro 23A – Variação com o tempo entre as temperaturas do ar de secagem, intergranular, exaustão e ambiente, umidade relativa ambiente, pressão estática, massa específica aparente e volume de GLP durante a secagem, no secador rotativo comercial, no teste 5 do tratamento 6

Tempo (h)	Ambiente		Grãos	Temperatura (°C)				Pressão estática (mmca)	Massa específica aparente (kg.m ⁻³)	GLP
	UR (%)	Tbs (°C)		Ar de secagem	Grãos		Ar de exaustão			
			Teor de água (%) b.u.		grãos 0,2 (m)	grãos 0,4 (m)				Volume (m ³)
0	77	22,5	17,90	95,5	24,4	24,3	26,5	22,0	716,2	45,81
1	91	19,5	18,41	94,4	72,4	45,8	35,7	25,0	723,4	48,17
2	91	19	14,60	94,3	79,6	59,2	44,6	25,0	736,2	50,06

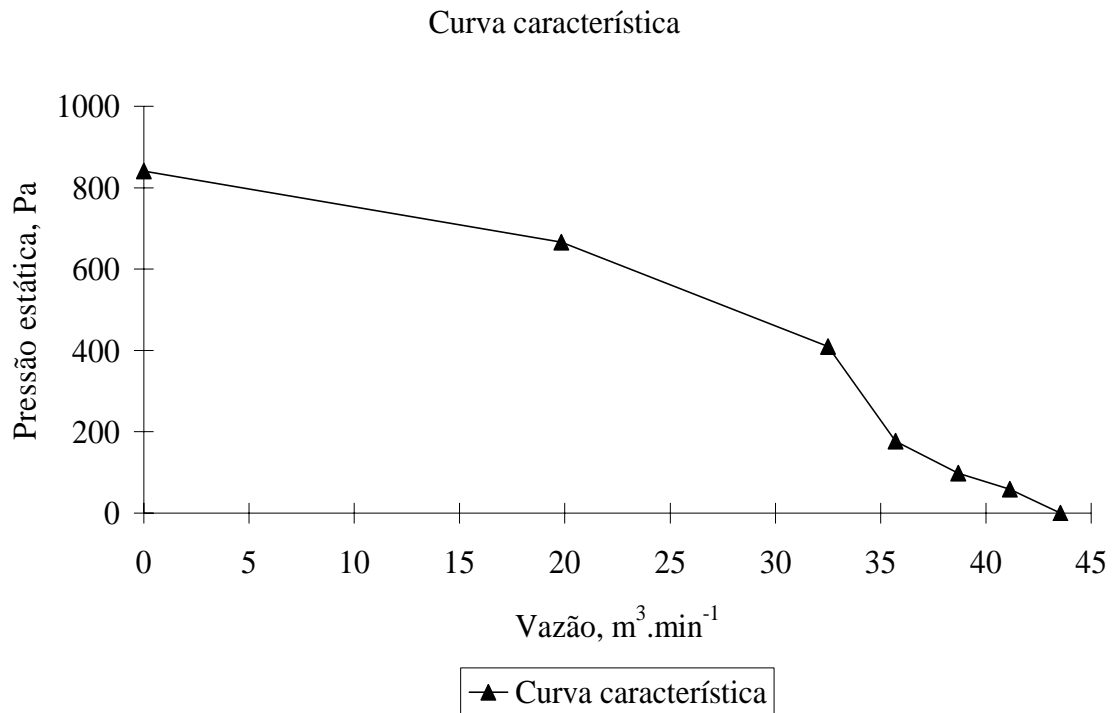


Figura A – Curva característica do ventilador utilizado no secador rotativo modificado.

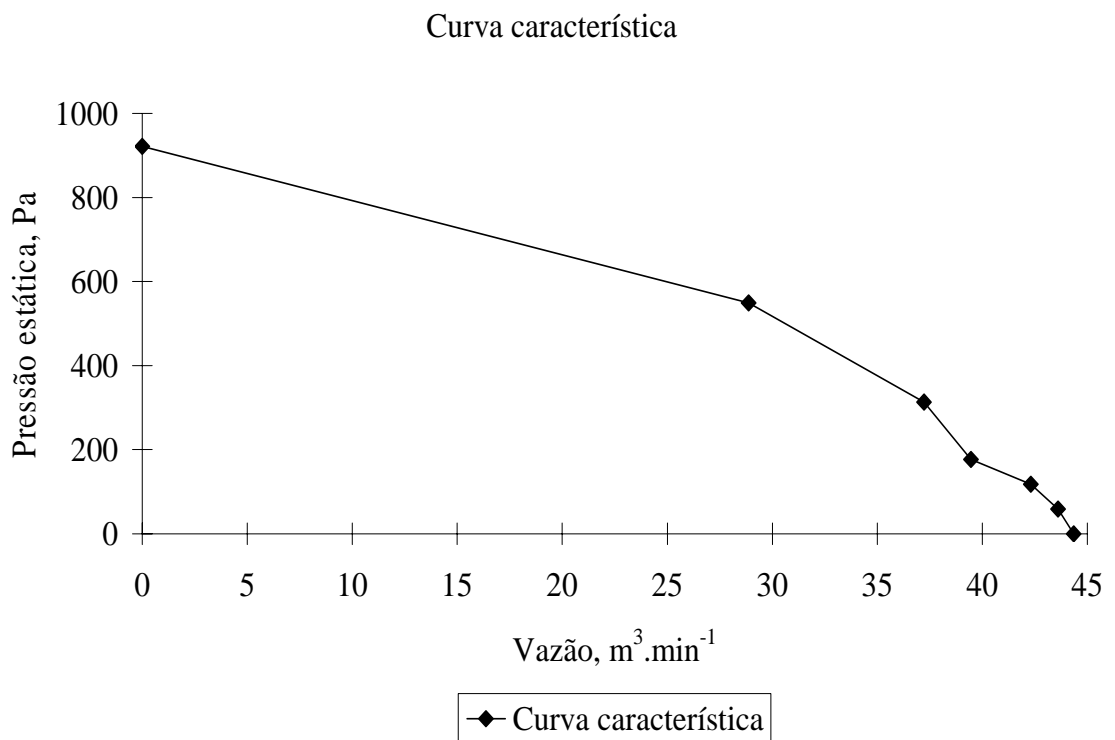


Figura B – Curva característica do ventilador utilizado no secador rotativo comercial.