

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DA SECAGEM COMBINADA DE
MILHO NA REGIÃO DE PEDRINHAS PAULISTA, SP**

JADER PICANÇO RIBEIRO

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – área de concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU-SP
Outubro - 2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DA SECAGEM COMBINADA DE
MILHO NA REGIÃO DE PEDRINHAS PAULISTA, SP**

JADER PICANÇO RIBEIRO

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Martin Biaggioni

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Agronomia – área de concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU-SP
Outubro - 2005

BIOGRAFIA

JADER PICANÇO RIBEIRO, filho de Antero Soares Ribeiro e Izaura Picanço Ribeiro, nasceu em 27 de julho de 1959, no município de Canguçu – RS.

Em 1980, iniciou o Curso de Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Pelotas, concluindo-o em dezembro de 1985.

Em 1992, iniciou o curso de especialização “latu sensu” em Administração de Marketing, na Universidade Luterana do Brasil, em Canoas - RS, concluindo-o em dezembro de 1993.

Entre dezembro de 1986 e dezembro de 1996, atuou nas áreas de engenharia e comercial da Kepler Weber Industrial S/A, em Porto Alegre - RS.

Entre março de 1987 e março de 1997, atuou como professor na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Luterana do Brasil, em Canoas – RS, na área de Processamento Agroindustrial e Máquinas Agrícolas.

Entre junho de 1998 e julho de 2005, atuou como gestor e gerente comercial do Grupo Fockink, nas regiões do interior Paulista e Mato Grosso.

Atualmente, atua como executivo principal da unidade de Armazenagem da CASP – Companhia Avícola São Paulo, em Amparo – SP .

Em 2003, iniciou o Curso de Mestrado em Agronomia – Energia na Agricultura, na Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP – Botucatu – SP.

OFERECIMENTO

À minha esposa, MARILUCI LOPES RIBEIRO, e à minha filha DANIELA LOPES RIBEIRO, pelo incentivo e compreensão, e principalmente pelo verdadeiro sentido do amor.

À meus pais, ANTERO SOARES RIBEIRO e IZAURA PICANÇO RIBEIRO, “in memoriam”, pelo amor, exemplo de vida e incentivo constante aos estudos.

AGRADECIMENTOS

À DEUS, pela vida, saúde e amor.

À minha família, pais, irmãos, cunhados e sobrinhos, pelo incentivo e confiança.

Ao professor Dr. Marco Antonio Martin Biaggioni, pela orientação, pelos ensinamentos e, em especial pela verdadeira amizade demonstrada durante todo o tempo.

Ao professor Dr. Widsney Alves Ferreira, pelos ensinamentos e pela fonte de inspiração.

Aos professores e funcionários da Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP, Botucatu – SP, pelos ensinamentos e apoio para a realização deste trabalho.

À Cooperativa de Pedrinhas Paulista, em especial ao Sr. Evandro Malagoli Nicolau, pela disponibilidade da infra-estrutura e apoio, que permitiram a realização dos experimentos, e pela amizade demonstrada.

Ao Grupo Fockink, pela concessão do tempo para a realização das disciplinas e do trabalho.

À todos aqueles que, de alguma forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
1 RESUMO.....	01
2 SUMMARY	03
3 INTRODUÇÃO.....	05
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	07
4.1 A importância do milho.....	07
4.2 Secagem e avaliação energética.....	08
4.2.1 Sistemas de secagem.....	09
4.2.2 Parâmetros a avaliar.....	13
4.3 Qualidade do produto	14
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	16
5.1 Equipamentos de secagem.....	17
5.2 Procedimento operacional	20
5.3 Avaliação de desempenho dos sistemas de secagem.....	21
5.3.1 Parâmetros relacionados ao produto.....	22
5.3.2 Parâmetros relacionados aos equipamentos.....	23
5.3.3 Parâmetros relacionados ao ambiente.....	26

5.4	Análise da qualidade.....	27
5.5	Avaliação energética.....	27
5.5.1	Energia total do sistema.....	27
5.5.2	Rendimento térmico do secador	28
5.5.3	Eficiência energética do sistema.....	29
5.5.4	Vazão mássica de combustível	30
5.6	Custo operacional do sistema	30
5.7	Determinação das vazões mínimas para secagem a baixas temperaturas.....	31
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
6.1	Avaliação energética da secagem	36
6.1.1	Energia total do sistema	37
6.1.2	Rendimento térmico do secador	39
6.1.3	Eficiência energética do sistema	39
6.1.4	Vazão mássica de combustível	40
6.2	Curvas de secagem experimental	41
6.3	Avaliação da temperatura de secagem	44
6.4	Avaliação da capacidade de secagem do secador	48
6.5	Custo operacional total	50
6.6	Determinação das vazões mínimas	51
6.7	Análise da qualidade	54
7	CONCLUSÕES	55
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

LISTA DE TABELAS

Tabela	Página
1 Resultados médios obtidos durante a secagem combinada (primeira fase) e a secagem convencional, no secador em alta temperatura	34
2 Resultados obtidos durante a segunda etapa da secagem combinada (baixa temperatura), no armazém graneleiro	35
3 Resultados obtidos na secagem combinada, em lotes de 90 t, em alta temperatura	36
4 Resultados obtidos na secagem convencional, em lotes de 90 t, em alta temperatura	37
5 Capacidade unitária de secagem em alta temperatura	49
6 Custos operacionais com combustível, energia elétrica e mão de obra, para cada metodologia de secagem	50
7 Valores para potencial adiabático de secagem (PAS) e umidade relativa média do ar ambiente, na região de Pedrinhas Paulista, SP	52
8 Valores de vazão mínima de ar e tempo de secagem, para redução do teor do umidade de milho até 13% b.u.	53

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1 Características do secador em alta temperatura	18
2 Características do armazém graneleiro (planta baixa)	19
3 Características do armazém graneleiro (corte)	20
4 Sensores de medição de temperatura no secador a Alta Temperatura	23
5 Energia total consumida em cada sistema de secagem.....	38
6 Consumo horário de combustível e temperatura ambiente	40
7 Curvas de secagem convencional	41
8 Curvas de secagem combinada, em alta temperatura	42
9 Curvas de secagem em baixa temperatura	43
10 Variação da temperatura na fornalha, no ciclone e ar de secagem, na secagem combinada.....	44
11 Variação da temperatura na fornalha, no ciclone e ar de secagem, na secagem convencional	45
12 Variação da temperatura em alta temperatura na secagem combinada	46
13 Variação da temperatura na secagem convencional	46
14 Variação da temperatura em baixa temperatura na secagem combinada	47

1 RESUMO

A secagem combinada consiste na utilização de um secador em alta temperatura, para reduzir o teor de umidade dos grãos até 16-18% b.u., e, então, proceder a secagem com ar em temperatura próxima à ambiente, até os grãos atingirem a umidade ideal para o armazenamento. Tendo em vista a possibilidade de aplicação deste método para a secagem do milho produzido na região de Pedrinhas Paulista - SP, o presente trabalho teve por objetivo estudar a sua viabilidade, tendo como referência a secagem convencional em alta temperatura, avaliando parâmetros relativos ao consumo de energia, operacionalidade do processo e qualidade do produto seco. O trabalho foi realizado, em escala real, utilizando um secador contínuo, de fluxo misto e com fornalha a lenha. A secagem com ar natural transcorreu num armazém graneleiro dotado de sistema de aeração. Foram realizadas três repetições para cada tratamento para coleta dos dados e cálculos dos parâmetros energéticos. Um modelo computacional de simulação de secagem a baixa temperatura foi empregado para determinar as vazões mínimas de ar necessárias para a região em estudo. No programa de simulação, foram utilizados os dados históricos (10 anos) de médias diárias de temperatura e umidade relativa do ar ambiente da região estudada. Os resultados obtidos comprovaram ser viável a utilização da metodologia de secagem combinada de milho para a região de Pedrinhas Paulista – SP, melhorando a eficiência energética do sistema, com redução média de 30% no consumo total de energia e, aumentando em aproximadamente 29% a capacidade de secagem da unidade, agilizando as operações de recepção, pré limpeza e secagem, além de permitir redução de custos

operacionais do processo total de secagem de 22%, mesmo com aumento no consumo de energia elétrica. O estudo da vazão mínima de secagem com ar em temperatura próxima a ambiente, mostrou a baixa vazão específica empregada no modelo real analisado, indicando possibilidade de comprometimento da qualidade dos grãos, quando as condições ambientais apresentarem baixo potencial adiabático de secagem. O mês de junho foi o que apresentou a pior condição de secagem, em baixa temperatura, analisado entre os anos de 1994 e 2004, e a vazão mínima indicada para a região é de $2,03 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}.\text{t}^{-1}$.

Palavras-chave: Secagem combinada, Eficiência energética, milho.

**ENERGY EVALUATION OF THE DRYING COMBINE OF CORN IN PEDRINHAS
PAULISTA – SP Botucatu, 2005. 69p. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura)
– Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.**

Author: JADER PICANÇO RIBEIRO

Adviser: MARCO ANTONIO BIAGGIONI

2. SUMMARY

The combined drying process consists on using a high temperature drier, which reduces the humidity level on grains up to 16-18% w.b., followed by drying with air near to ambient temperature, until the grains reach the ideal content moisture for storage. Keeping in mind the possibility to apply this drying method for corn produced on Pedrinhas Paulista region – SP, the current process aimed to study its feasibility, keeping the conventional high temperature drying method as a reference, assessing related energy consumption parameters, process operation functionality and dry product quality. This work was carried on, in real scale, using a mixed flow continuous drier with a wood furnace. The drying process with natural air happened on a grain store with ventilation system. In order to collect data and subsequent calculation of energetic parameters, each treatment was repeated three times. A computer simulation model of low temperature drying process was applied to determine minimum necessary airflow for the region under study. The simulation program used historic data (10 years) of the ambient air daily average temperature and humidity of this region. The results proved the feasibility of the combined drying methodology for corn on the Pedrinhas Paulista

region – SP, improving the system energetic efficiency with 30% less than energy, increase 29% the drying capacity, optimizing operations of reception, pre-cleaning and drying. Furthermore, it allows 22% cost reduction on the total drying process, even considering the increase of electricity consumption. The study of the minimum airflow drying system using air temperature close to ambient showed the specific low flow applied on the real model analysed, indicating a possible impact on grain quality, when ambient conditions present low adiabatic potential for drying. June was the month, which presented the worst drying condition at low temperature, observing a period between 1994 and 2004, and the minimum airflow indicated to this region was $2,03 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}.\text{t}^{-1}$.

Keywords: Drying Combine, energy efficiency, corn.

3 INTRODUÇÃO

O processamento agro-industrial, especificamente o beneficiamento de grãos, baseia-se no uso de energia elétrica e lenha, como principais combustíveis para o seu desempenho. E, neste segmento, conforme Lacerda Filho (1998), corroborando Bakker-Arkema (1978), a secagem é a etapa de maior consumo de energia, responsável por 60% da energia consumida no processo produtivo básico de grãos, como matéria-prima para indústrias de alimentos.

Significativas mudanças na metodologia de secagem utilizada por algumas empresas de beneficiamento de cereais trouxeram à discussão as reais vantagens citadas pelos fornecedores de equipamentos para secagem e aeração de grãos. Citam alguns fabricantes de secadores que a utilização da secagem combinada aumenta o consumo de energia elétrica, tornando o processamento mais dispendioso, além de proporcionar elevadas taxas de respiração dos grãos, incorrendo em perda de matéria seca e incrementando defeitos e perdas de qualidade que vão se agravando ao longo do período de armazenagem. Já fabricantes de sistemas de aeração, defensores da secagem combinada, afirmam que grãos expostos por longos períodos a altas temperaturas, sofrem modificações danosas e irreversíveis em suas características físicas e químicas, prejudicando sua qualidade, além de despendem um maior custo energético e operacional, quando analisado ao longo do processo.

Frente a uma acelerada modificação no mercado, onde se torna cada vez maior a exigência por qualidade dos produtos e redução nos custos, o uso da secagem combinada mostra-se como uma alternativa em que se atenta a estes propósitos. Com a adoção desta técnica, o consumo de energia é reduzido, a capacidade do sistema é aumentada e o

produto final apresenta melhor qualidade do que em sistemas que operam somente em altas temperaturas (DALPASQUALE, 1991; SILVA, 1991).

Tradicionalmente, o processo industrial de secagem convencional consiste em passar os grãos pelo secador, até estes atingirem o teor de umidade ideal de armazenagem (aproximadamente 13% b.u.). A metodologia de secagem combinada consiste em utilizar o secador com ar em altas temperaturas, para baixar a umidade dos grãos até um teor de umidade de aproximadamente 16 a 18% b.u., colocar estes grãos ainda quentes nos silos de armazenagem e, imediatamente, fazer a complementação da secagem utilizando ar natural, com o próprio sistema de aeração dos silos de armazenagem, até os grãos atingirem a umidade ideal para mantê-los armazenados.

Na secagem combinada, o menor consumo de energia ocorre durante a secagem com ar natural, por utilizar os ventiladores de aeração dos silos, que exigem somente energia elétrica com motores de menores potências. Entretanto, a utilização de vazões específicas fora de determinados limites, pode ocasionar sobresssecagem dos grãos e elevado consumo energético, ou, ao contrário, pode permitir a deterioração destes, antes que a secagem se complete. Daí, a importância em determinar e utilizar as vazões específicas mínimas, de acordo com as características gerais do processo e do ambiente que está sendo estudado.

Segundo Cordeiro (1982), o consumo de energia e o rendimento de um secador são parâmetros a que se tem dado grande ênfase na escolha de um sistema de secagem, por ser o secador o equipamento de maior consumo de energia, dentro do processamento, e o que pode causar alta taxa de quebras, resultando num produto de baixa qualidade.

No presente trabalho propõe-se avaliar e comparar parâmetros energéticos durante a secagem de grãos de milho processados em escala comercial, com os seguintes objetivos específicos:

- avaliação energética da secagem combinada, tendo como referência a secagem convencional;
- determinação da vazão mínima de ar de secagem a baixa temperatura para a região de Pedrinhas Paulista, no Estado de São Paulo.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 A importância do milho

O milho é um alimentos muito nutritivo, constituindo uma importante fonte energética. Por isto, sua aplicação tem considerável importância na alimentação humana e animal.

Devido a sua fácil adaptação, o milho é cultivado na maior parte do território nacional, sendo mais intenso nos Estados do Paraná, Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul (ABIMILHO, 2004).

Segundo dados da Abimilho (2004), o Departamento de Agricultura dos EUA aponta que a produção mundial de milho no ano comercial 2001/2002 foi de 610 milhões de toneladas, contra 168 milhões de toneladas de soja. Neste cenário, o Brasil é cotado como o terceiro produtor mundial de milho, ficando atrás dos Estados Unidos e da China. A produção brasileira na safra 2002/2003 foi de 36,5 milhões de toneladas, não sendo suficientes para atender a demanda interna deste cereal. O Estado de São Paulo contribuiu com cerca de 4,33 milhões de toneladas, colocando-se em segundo lugar na produção nacional.

A umidade ideal de colheita do milho, segundo o aspecto quantidade de matéria seca, deve ser aquela correspondente ao momento em que os grãos atingem o ponto de maturidade fisiológica, quando os mesmos apresentam um conteúdo de umidade de aproximadamente 31 a 33% b.u. Embora estes percentuais sejam ideais, esta prática dificulta muito sua colheita e comercialização. Frente a estas dificuldades, os grãos normalmente são

colhidos com menores teores de umidade, entre 25 a 28% b.u., sendo posteriormente secos para melhor conservação e comercialização, ao redor de 13 a 14% b.u. de umidade (OMAF, 2004).

A Cooperativa de Pedrinhas Paulista, fundada em 1954, conta, atualmente, com 750 associados e atende aos municípios de Assis, Candido Mota, Cruzália, Florínea, Frutal do Campo, Iepê, Maracaí, Palmital, Paraguaçu Paulista, Pedrinhas Paulista, Rancharia e Tarumã, formando a região do Vale do Paranapanema, que representa aproximadamente 16% da produção de milho do Estado de São Paulo, sendo o produto principal da produção de grãos desta região.

4.2 Secagem e avaliação energética

A secagem, segundo conceituou Ohja (1974), é a operação que tem por finalidade reduzir o teor de umidade do produto a nível adequado para estocagem por um período prolongado, de maneira a preservar a aparência e a qualidade nutritiva dos grãos, como alimento, e a sua viabilidade, como semente.

Segundo Bakker-Arkema, Brooker e Hall (1992), dentro do fluxograma de grãos - colheita, secagem, armazenagem, manuseio e transporte - a secagem é a fase crítica da operação, por ser o maior consumidor de energia e uma das principais causas de deterioração nos grãos. Especificamente, a secagem é responsável pelo aumento na susceptibilidade à quebra no milho e na soja e pelo decréscimo na qualidade de moagem do trigo e do arroz. Verificaram que, na redução do teor de umidade de 25 para 15% b.u., em 1.000 kg de milho, são evaporados mais de 115 kg de água, consumindo mais de 5×10^5 kJ.

O balanço energético nacional de 2002 (BRASIL, 2004), divulgado pelo Ministério de Minas e Energia, mostra que de um consumo total de $177,4 \times 10^6$ tEP, $8,048 \times 10^6$ tEP são específicos para consumo em agropecuária. Este número tem-se tornado maior a cada ano que passa, pois a agroindústria tem crescido significativamente no Brasil. Aliada a este crescimento, a exigência por maior qualidade e redução nos custos é preocupação constante de estudos sobre o assunto e busca de novas técnicas que conduzam a este objetivo.

Segundo dados do IBGE (2001), com um incremento médio na produção de grãos na ordem de 14 % ao ano, devido ao aumento da área plantada e aumento na produtividade das culturas, tornaram-se mais ágeis os sistemas de colheita e maiores os percentuais de umidade com que os grãos, vindos das lavouras, chegam às unidades de

beneficiamento. Todavia, a evolução tecnológica nas unidades de beneficiamento, especificamente no que tange à recepção e secagem, não acompanharam as evoluções ocorridas nas etapas primárias do fluxo dos grãos. As poucas evoluções que aconteceram nos sistemas de secagem limitaram-se o aumento de capacidade das máquinas e redução nas potências dos ventiladores utilizados.

Apesar desta situação, muitas pesquisas sobre sistemas de secagem como seca-aeração, secagem em múltiplos estágios, secagem combinada entre alta e baixa temperatura, secadores de colunas, secadores com recirculação de ar, entre outras, têm sido intensificadas procurando a otimização no consumo de energia e preservação da qualidade dos grãos após a secagem. Mais recentemente, controles por computadores têm sido incorporados aos sistemas de secagem, para monitorar e controlar os processos e parâmetros de secagem (GUNASEKARAN, 2002).

4.2.1 Sistemas de secagem

Os métodos de secagem, segundo cita Dalpasquale (1991), são diversos e podem ser classificados em:

- secagem natural na própria planta;
- secagem em terreiros;
- secagem artificial – a altas temperaturas;
– a baixas temperaturas.

A secagem natural do milho, na própria planta, foi estudada por Morey, Cloud e Lueschen (1976) concluindo que a economia de energia obtida neste processo pode não compensar as perdas quanti-qualitativas decorrentes da exposição prolongada do milho na lavoura, ao ataque de intempéries, insetos, fungos e outras pragas.

A secagem em terreiros é muito difundida no Brasil devido, principalmente, a sua simplicidade de construção, baixo custo e versatilidade. Consiste em distribuir o produto sobre um piso plano, com uma camada de pouca espessura (menos de 10 centímetros) e revolver este produto periodicamente. Seu uso está diretamente ligado às condições ambientais, limitando sua utilização e sua eficiência energética (BIAGGIONI, 1994).

A secagem artificial, conforme cita Weber (1995), apresenta as vantagens de permitir o processamento de secagem com qualquer tipo de condições ambientais, permitir programação no processo de colheita, operar com maiores capacidades reduzindo o tempo de processamento.

A secagem a altas temperaturas caracteriza-se pelo uso de ar aquecido, pelo menos a mais de 10 °C acima da temperatura ambiente, e fluxos de ar maiores, por tratar-se de uma velocidade de secagem mais alta (DALPASQUALE, 1991).

Em geral, na secagem de milho, a secagem a altas temperaturas requer entre 4,5 e 8 MJ.kg⁻¹ de água removida, enquanto a secagem a temperatura ambiente ou a baixa temperatura, requer entre 3,25 e 3,75 MJ.kg⁻¹ de água removida dos grãos, em função das características do sistema de secagem (GUNASEKARAN, 2002).

Groff (2001), tratando das questões energéticas na secagem de grãos, aponta dados de consumo de secadores a altas temperaturas entre 3,9 e 6,3 MJ.kg⁻¹ de água evaporada nos secadores produzidos atualmente no Brasil, o que leva a um custo médio de US\$ 0,25/t com energia elétrica e US\$ 0,90/t com combustível.

Puzzi (1986) afirmou que os secadores de fluxo contínuo apresentam menor rendimento térmico comparado aos secadores estáticos, pois têm maior desperdício de energia que estes outros, embora sua alta capacidade horária de secagem torne-o mais econômico e de maior versatilidade operacional, justificando sua larga utilização industrial.

O procedimento de secagem a altas temperaturas exige mais cuidados e controles, por seu risco com acidentes e a grande possibilidade de danificar o produto.

Kreyger (1972), citado por Bakker-Arkema, Brooker e Hall (1978), determinou a temperatura crítica para as sementes de algumas espécies de grãos, como função da umidade relativa de equilíbrio. Para o milho, os valores encontrados variam de 52 °C e 60% até 46°C e 90%.

Bakker-Arkema, Brooker e Hall (1992) afirmaram que a temperatura máxima de exposição de sementes depende do seu teor de umidade e do tempo de exposição a temperatura aplicada. Citaram os resultados de Nellist (1987) mostrando que sementes com 18% b.u. podem ser secas em silos com temperatura de 67 °C; com 26% b.u. podem ser secas a 59 °C. Estas temperaturas são consideradas altas para as referências normalmente recomendadas pelos cientistas.

Davidson, Noble e Brown (2000) citam que os efeitos da temperatura do ar de secagem podem afetar os fatores de qualidade do milho, incluindo propriedades físicas (peso, susceptibilidade à quebra e coloração), bem como as características químicas (gelatinização, solubilidade e ácidos graxos).

A secagem a baixas temperaturas consiste em utilizar o ar a temperatura ambiente ou aquecido entre 3 e 5°C acima da temperatura ambiente, como meio de transporte de umidade e energia, com baixos fluxos de ar (DALPASQUALE, 1991).

Biaggioni (1994), citando diversos autores, destaca este sistema de secagem como energeticamente eficiente, permitindo maior flexibilização na programação da colheita, com o mínimo de manejo do produto, normalmente com produção de grãos de melhor qualidade (maior porcentagem de germinação, baixa porcentagem de trincas e menor susceptibilidade à quebra), simplicidade do sistema e exigência de baixo investimento de capital.

Como desvantagem, segundo Silva (1991), a secagem a baixas temperaturas pode estender-se por várias semanas e aumentar a susceptibilidade dos grãos à deterioração, implicando na necessidade de maiores fluxos de ar ou aquecedores mais potentes, inviabilizando economicamente o sistema.

Maier e Montross (2000), analisando o consumo específico de energia para sistemas de secagem a baixas temperaturas, obtiveram um rendimento médio de 4,0 MJ.kg⁻¹, cerca de 10% a menos que um secador a alta temperatura.

McKenzie et al. (1972) demonstraram que a combinação de alta velocidade e alta temperatura de secagem, com resfriamento lento, denominada por seca-aeração, em testes com redução no teor de umidade de 24% para 14% b.u., em secador de fluxo cruzado, provocou um incremento de 50% na capacidade do secador, pelo fato de utilizar a câmara de resfriamento como câmara de secagem e reduzir a umidade para cerca de 16% b.u. O índice de grãos quebrados foi de 7,6% enquanto que na secagem convencional foi de 43,6%. Também constataram que houve uma redução significativa no consumo de energia pelo fato de, no secador, não ocorrer remoção de umidade em níveis inferiores a 16% b.u., como ocorre nos sistemas convencionais.

Muitas modificações foram estudadas nos processos de secagem, buscando a redução no consumo de energia e a melhoria da qualidade do produto final, até que chegasse ao sistema de secagem combinada (GUIMARÃES, 1995).

A secagem combinada é um processo que vem evoluindo constantemente e consiste em realizar a secagem em altas temperaturas até que o teor de umidade seja reduzido na faixa de 16 a 18% b.u., e, a partir deste ponto, a secagem passa a ser executada em um sistema de baixas temperaturas (GUIMARÃES, 1995).

Lopes et al. (2002), destacam que as principais vantagens esperadas na utilização de um sistema de secagem combinada são: utilização do secador em altas temperaturas na faixa de umidade em que é mais eficiente, ou seja, alto teor de umidade dos grãos; secagem lenta e uniforme do produto durante a etapa de utilização do sistema em baixas temperaturas; menor consumo de combustível; menor custo de operação e melhor qualidade final do produto.

Maier e Montross (2000) comprovaram que a utilização da secagem combinada, em milho, aumentou em cerca de 72% a capacidade de secagem, reduzindo os custos em cerca de 11%, comparado a secagem em altas temperaturas.

Na secagem em silos, embora utilize a entalpia do ar ambiente como energia para a secagem, há que considerar o custo com energia elétrica para alimentação dos ventiladores que, dependendo do número de unidades secadoras e do volume de grãos a serem secos, podem representar um custo adicional. Para esses casos, deve-se procurar operar o sistema em horários de tarifa diferenciada e quando as condições do ambiente forem favoráveis (LOPES et al., 2002).

Dalpasquale (1991) e Silva(1991) citam também que esta utilização da secagem combinada apresenta um produto de melhor qualidade final, reduzindo a susceptibilidade a quebras e a formação de ácidos graxos.

Na fase de secagem a baixas temperaturas, em silos e tulhas, é necessário completar o processo antes que a camada superior dos grãos possa deteriorar pela ação de microorganismos. O fluxo de ar necessário para que isso não ocorra é função do teor de umidade do produto e das condições do ar de secagem (GUIMARÃES, 1995).

Lopes et al. (2002), analisando o consumo de energia em dois sistemas de secagem de café, salientam que o operador de um sistema de secagem combinada deve estar familiarizado com o processo e estar atento quanto à operação do sistema de aeração, durante a segunda etapa de secagem, verificando, periodicamente, as últimas camadas de secagem.

O sucesso de um sistema de secagem combinada, depende de uma boa seleção e dimensionamento dos equipamentos envolvidos, considerando: capacidade adequada do sistema de aeração da armazenagem quanto à vazão mínima de ar, tamanhos adequados dos

ventiladores de resfriamento e do sistema de distribuição de ar e manejo adequado dos sistemas de secagem, de acordo com suas capacidades (CLOUD, MOREY, 1998).

4.2.2 Parâmetros a avaliar

Bakker-Arkema, Brooke e Hall (1978), afirmaram que os secadores são, comumente, avaliados em função de suas capacidades. Raramente a eficiência de energia é considerada. Os secadores são cotados pela sua capacidade de reduzir umidade em uma quantidade de produto, relacionando a massa úmida ou seca. As condições sob as quais a capacidade dos secadores tem sido determinada são pouco notificadas, com exceção da temperatura do ar de secagem. Entretanto, a temperatura do ar ambiente, a temperatura dos grãos, os índices de impurezas e de danos térmicos têm significativa importância. A eficiência de energia nos processos de secagem pode ser expressa em função da quantidade de energia requerida para remover uma unidade de massa de água do produto, sob determinadas condições. Estabeleceram um padrão para avaliar os sistemas de secagem e definiram parâmetros considerados fundamentais para a avaliação dos sistemas de secagem.

Revisando dados de dimensionamento de fabricantes de secadores, os cálculos da potência dos ventiladores e das fontes geradoras de calor são função do incremento necessário na temperatura ambiente e da pressão estática exigida para este fluxo de ar vencer a passagem pela massa de grãos, partindo de um teor de umidade dos grãos na ordem de 18% b.u. À medida que aumentam os teores de umidade iniciais dos grãos, reduz-se, drasticamente, a capacidade dos secadores.

Complementando a idéia, para Lasseran (1981), o consumo de energia de um sistema de aeração com ar natural depende basicamente de dois parâmetros, a vazão específica e a altura da massa de grãos, o que está diretamente ligado à vazão de ar e à perda de carga oferecida pelo sistema.

Baseado em investigações teóricas, o próprio Lasseran (1981), analisando os resultados de estudos da secagem acompanhando a aeração, concluiu que a quantidade de água evaporada no decorrer da aeração, é maior quanto mais quentes e mais úmidos estiverem os grãos e quanto maior for a diferença entre a temperatura do ar de aeração e a temperatura dos grãos.

Lacerda Filho (1998), citando Bakker-Arkema, Brooker e Hall (1978), informa que os parâmetros básicos a serem analisados para permitir uma avaliação energética de um sistema de secagem, consistem de dados do produto, do ar, do secador, da energia e do desempenho, e, baseado nesses dados, será desenvolvido o trabalho.

4.3 Qualidade do produto

Os principais parâmetros de secagem que estão associados à redução da qualidade das sementes são a temperatura, a umidade relativa e a vazão do ar de secagem, o tempo de residência do produto na câmara de secagem, a taxa de secagem e os teores de umidade inicial e final do produto (BIAGGIONI, 1994).

Noble, Brown e Davidson (2000), estudando métodos de susceptibilidade à quebra com uso de processador comercial, verificaram que, em geral, a susceptibilidade à quebra é mais sensível para milho com umidade abaixo de 18% b.u., passando de um percentual de quebra de 30%, em grãos com 18% b.u. de umidade, para 80% em grãos com 12% b.u. de umidade.

O milho pode ser manuseado em diversas operações, passando por cerca de 20 etapas de processamento, desde a colheita até a exportação ou seu consumo final. Os grãos que não puderem suportar os maiores esforços acabam se partindo, fragmentando-se em várias porções. Estas quebras no milho, de acordo com a classificação de comercialização, diminuem a qualidade do produto (McKENZIE et al., 1972).

A resistência à quebra do milho pode ser definida como a propriedade dos grãos a resistir a numerosas situações de tensões e choques mecânicos durante o transporte, manuseio e acondicionamento (PAULSEN, GUNASEKARAN, 1985).

Paulsen e Gunasekaran (1985) concluíram que a susceptibilidade à quebra de milho cresce linearmente com o aumento da temperatura do ar de secagem e, também, que as quebras por tensões internas aumentam com o aumento da intensidade da taxa de secagem, ou seja, maiores temperaturas e maiores vazões de ar.

Alves et al. (2001), comprovaram que os menores valores de suscetibilidade a quebra e de índices de trincas e danos, ocorrem nos grãos colhidos com teor de umidade entre 15 e 16,5% b.u. e secados com temperatura do ar entre 40 e 60°C. Os mesmos autores, comprovaram também que os grãos colhidos com teor de umidade acima de 16,5% b.u.,

independente da temperatura do ar de secagem, aumentam os índices de danos e o teor de impurezas e diminuem a sua massa específica aparente após a secagem.

Muhlbauer et al. (1982), em testes de qualidade, mostraram que a secagem em baixa temperatura não afetou significativamente a perda de matéria seca, germinação ou qualidade de processamento do trigo. O aumento da população de fungos, nas camadas superiores, não significou séria deterioração, assim como não se detectaram micotoxinas.

5 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido na unidade de beneficiamento de grãos da Cooperativa Agroindustrial de Pedrinhas Paulista, localizada no município de Pedrinhas Paulista, no Estado de São Paulo.

A Cooperativa possui um complexo de processamento composto de vários secadores e sistemas armazenadores com silos metálicos, silos de concreto e armazém graneleiro. Foi delimitada a área do processo analisado, considerando um dos secadores de grãos em alta temperatura, e seu sistema de carga e descarga, e o armazém graneleiro, com seu respectivo sistema de aeração.

Na unidade de Pedrinhas Paulista encontram-se os dois sistemas de secagem, objetivo do trabalho, operando simultaneamente com o mesmo tipo de matéria-prima. Parte dos grãos recebidos na unidade foi processado em secador de fluxo contínuo com alta temperatura até atingirem a umidade ideal de armazenagem, para serem comercializados imediatamente, e, outra parte, foi seca com alta temperatura, até a umidade de aproximadamente 16% b.u., com posterior complemento da secagem com ar à temperatura ambiente, ficando armazenada para ser comercializada ao longo do ano, nos períodos de entressafra. Este sistema de aeração é dotado de controle automático de acionamento dos ventiladores, com um banco de dados utilizado para complementar os formulários básicos do trabalho.

O produto processado foi o milho, oriundo das plantações dos cooperados da região de Pedrinhas Paulista, sem distinção quanto à variedade plantada e quanto

à umidade de recepção, limitando-se, somente, a um teor de umidade máximo de 25%b.u., conforme normas da Cooperativa.

5.1 Equipamentos de secagem

Para análise da secagem em alta temperatura, foi utilizado um secador contínuo de fluxo misto, com capacidade nominal de 60 t/h e capacidade estática para 90 toneladas, dotado de duas câmaras de secagem e uma câmara de resfriamento, com sistema de aeração formado por três ventiladores axiais acoplados diretamente a motores elétricos de 15 cv cada, produzindo uma vazão de ar nominal de $135.000 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$.

O sistema é equipado com fornalha a lenha, de fogo direto, construída em alvenaria e refratário, com amarração metálica, com as seguintes dimensões externas: 5 m de comprimento, 2,5 m de altura e 2 m de largura. A câmara de combustão possui volume médio de 20 m^3 , e área de grelha plana de 5 m^2 (Figura 1).

Interligando a fornalha ao secador, existe um ciclone metálico, com as seguintes dimensões: seção com 4 m^2 e altura de 2,4 m. O ciclone tem a parte inferior dotada de aberturas para entrada de ar ambiente, com uma área total de $1,58 \text{ m}^2$.

O sistema de carga é composto por um elevador de caçambas, com altura de 30 m, acionado com motor elétrico de 20 cv, com sistema de polias e correias, configurando uma velocidade linear da correia com caçambas de, aproximadamente, $3,0 \text{ m.s}^{-1}$. A capacidade nominal de transporte do elevador é de 120 t.h^{-1} .

O sistema de descarga do secador é composto de uma rosca transportadora metálica, com diâmetro operacional de 315 mm, acoplada a motor elétrico de 5 cv, por sistemas de polias e correias.

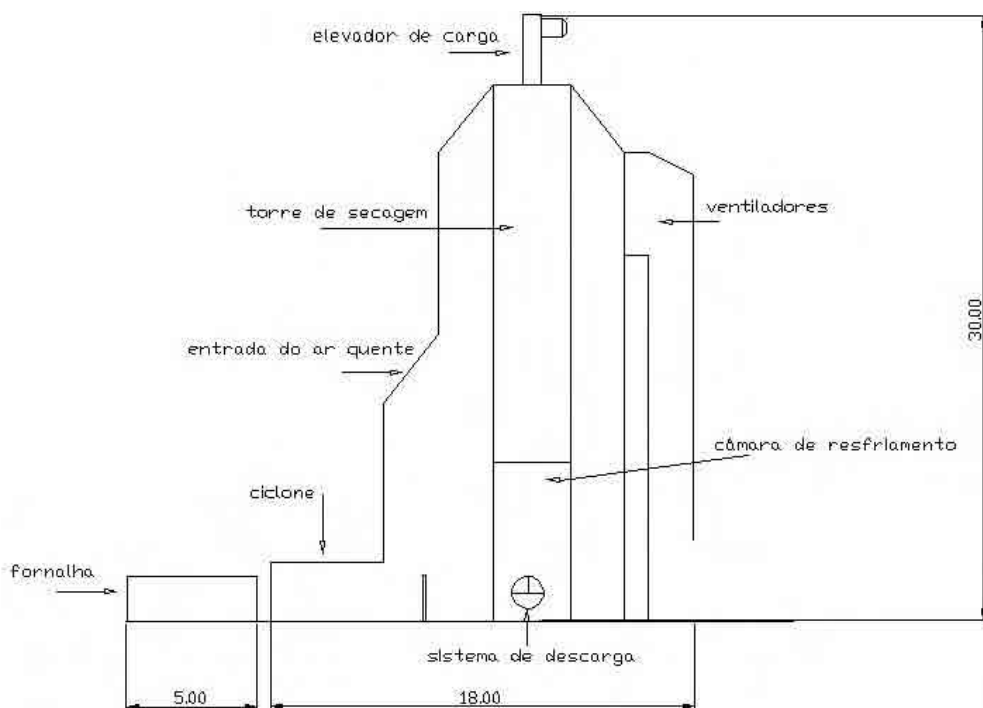


Figura 1 – Características do secador em alta temperatura

O sistema de secagem à temperatura ambiente foi constituído por um armazém graneleiro, executado em alvenaria de concreto, com o fundo em formato de “V”, com as seguintes características (Figuras 2 e 3):

- largura - 25 m
- comprimento - 60 m
- profundidade do “V” (fundo) - 8,1 m
- pé direito - 3,8 m
- estrutura de cobertura em arcos, espaçados a cada 5 metros, com altura total de 19,7 m, com telhas de aço galvanizado
- capacidade total de armazenagem de 9.000 toneladas de milho.

O armazém é equipado com um sistema de aeração composto por oito ventiladores dispostos lateralmente, interligados a aeradores de concreto, dispostos no fundo do armazém, sobre o túnel de descarga de grãos, que fazem a distribuição do ar na massa de grãos.

Os ventiladores são do tipo centrífugo, com as pás retas voltadas para trás, com diâmetro do rotor de 710 mm, acoplados diretamente a motores elétricos de 20 cv. A vazão nominal total do sistema é de $2.360 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$.

Para controle de temperatura, o armazém é equipado com um sistema de termometria constituído por 44 cabos termopares, perfazendo um total de 286 sensores tipo T, com faixa de variação de 0 a 4,27 mV (0 a 100°C). A operação do sistema de termometria é computadorizada, utilizando um software específico, fornecido pelo fabricante do sistema, que disponibiliza um banco de dados com informações diárias de temperatura de cada sensor na massa de grãos e, também, temperatura e umidade relativa ambiente.

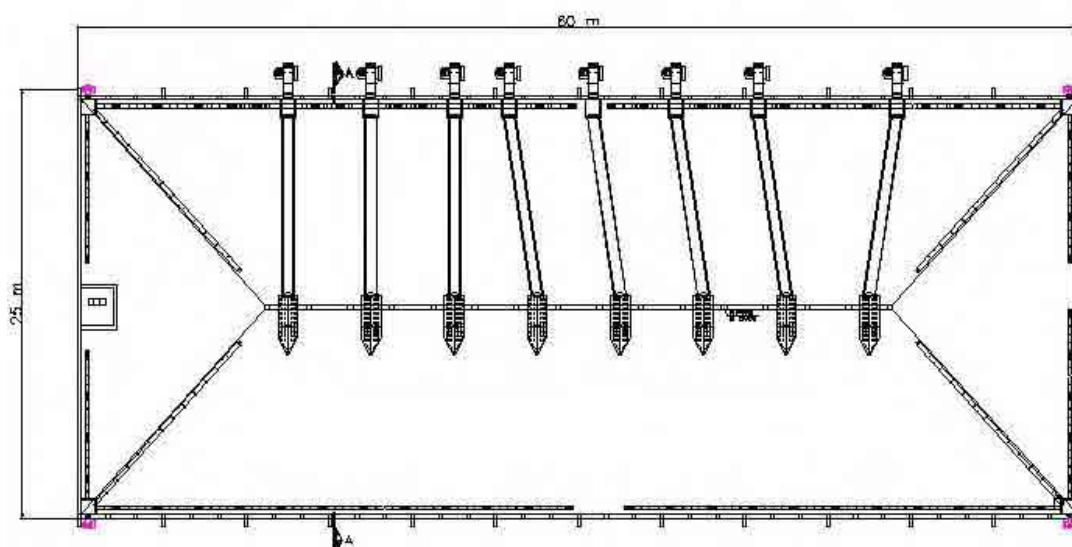


Figura 2 - Características do armazém graneleiro (planta baixa).

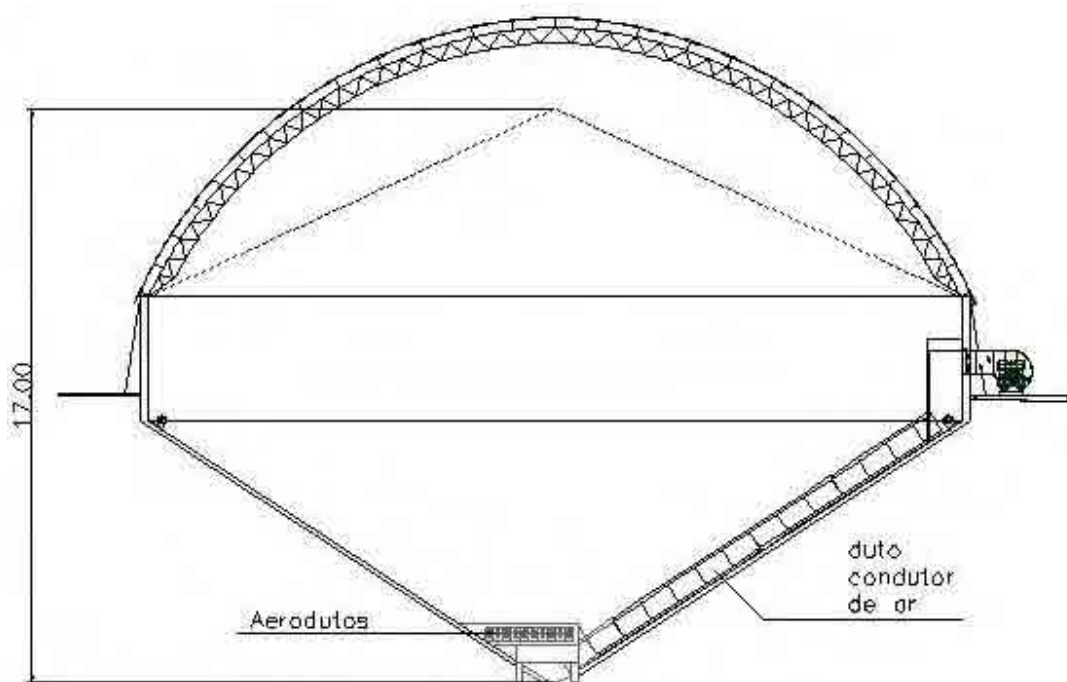


Figura 3 - Características do armazém graneleiro (corte).

5.2 Procedimento operacional

Para a análise do sistema de secagem convencional, os grãos foram processados no secador em alta temperatura, em regime intermitente, até que os mesmos atingissem a umidade ideal de armazenagem, de aproximadamente 13%. Foram, então, encaminhados até um sistema de armazenagem distinto, não se misturando aos grãos que foram analisados no sistema de secagem combinada.

Para a secagem combinada, os grãos recebidos na unidade foram secos no mesmo secador, em alta temperatura, em regime contínuo, até atingirem a umidade de, aproximadamente, 16% b.u. Foram, então, direcionados ao armazém graneleiro, onde foram submetidos a etapa de secagem com ar em temperatura próxima a ambiente, até a umidade ideal de armazenagem, ao redor de 13% b.u., quando atingiram o equilíbrio higroscópico.

Na secagem à temperatura ambiente, os ventiladores foram ligados após a camada de grãos atingir cerca de 1,0 m, acima dos aerodutos de distribuição de ar, no fundo do armazém graneleiro, e permaneceram ligados, até a camada superior de grãos atingir o teor de umidade final (13 % b.u.), com toda a massa de grãos considerada seca. Diariamente, os

ventiladores eram desligados no horário de ponta, entre 17:30 h e 20:30 h, independente da condição ambiental. A razão deste procedimento foi por questões econômicas da própria Cooperativa de Pedrinhas Paulista, visto que o valor do kWh no horário normal é de R\$ 0,13, e no horário de ponta é de R\$ 1,15.

Inicialmente, foram processadas três repetições de secagem convencional, e, posteriormente, mais três repetições para a secagem combinada, em alta temperatura.

Para a análise da secagem à temperatura ambiente, os grãos colocados no armazém graneleiro foram avaliados diariamente, com medição da umidade, de amostras coletadas em diferentes alturas da massa de grãos, até ocorrer o equilíbrio de umidade em toda a massa de grãos armazenada.

Em função da dificuldade em isolar, no armazém graneleiro, os lotes acompanhados na secagem em alta temperatura dos demais lotes carregados anteriormente, foram utilizados os dados do armazém completo para as avaliações dos resultados de secagem em baixa temperatura, visto que todos os grãos haviam sido colocados no armazém com umidade inicial média de 16% b.u.

5.3 Avaliação de desempenho dos sistemas de secagem

Para avaliação de desempenho foi utilizada a metodologia proposta por Bakker–Arkema et al. (1978). Os parâmetros requeridos para esta análise dividem-se em:

- **Parâmetros relacionados ao produto:**
 - teores de umidade inicial e final;
 - temperatura dos grãos;
- **Parâmetros relacionados aos equipamentos:**
 - Volumes de grãos;
 - tempo de operação;
 - temperaturas do ar de secagem;
 - potências dos motores;
 - consumo de energia elétrica;
 - custo de energia;

pressão estática;
vazão de ar;
consumo de combustível;
custo de combustível;
poder calorífico inferior;
número de operadores envolvidos.

- **Parâmetros relacionados ao ambiente:**

Temperatura do ar ambiente;
Umidade relativa do ar ambiente;

5.3.1 Parâmetros relacionados ao produto

a) Teor de umidade

A amostragem foi feita por meio de coleta de produto úmido, no pé do elevador de carga, antes de sua entrada no secador, e de produto seco ou parcialmente seco, na descarga do secador, em intervalos de meia hora.

No armazém graneleiro, foram coletadas amostras diariamente, com calador (comprimento de 2,0 metros) introduzido na superfície da massa de grãos, e por abertura de um registro na parte inferior do armazém, deixando escorrer o produto e retirando uma amostra a cada minuto, durante 10 minutos, que é o tempo estimado para deslocamento dos grãos da superfície localizada acima do registro, atingirem o registro de descarga.

O teor de umidade foi determinado, durante a secagem, por meio de determinador rápido (tipo Universal). Por ser este um método indireto, as amostras foram analisadas, também, pelo método direto utilizando uma estufa elétrica a temperatura de 105°C, por 24 horas, conforme citado nas Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 1992).

b) Temperatura

A temperatura dos grãos, no secador em alta temperatura, foi medida usando termopares tipo T com os sensores colocados na parte interna do secador, em contato com os grãos. Foram utilizados quatro sensores, neste caso, sendo dois na parte intermediária do secador, na câmara de secagem (T11 e T12), a uma altura de aproximadamente 12 m, e outros

dois na câmara de resfriamento (T8 e T9), quando os grãos estavam saindo do secador (Figura 4).

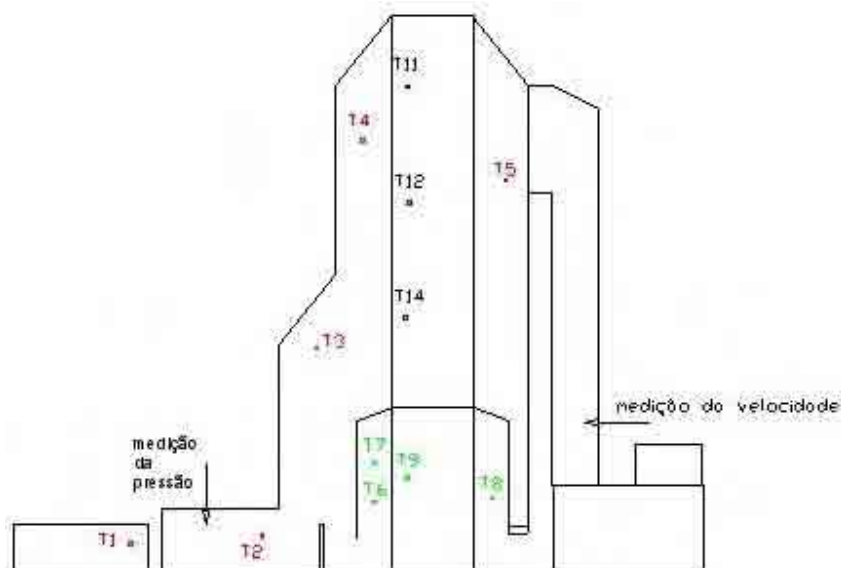


Figura 4 – Sensores de medição de temperatura no secador a Alta Temperatura

A temperatura no sistema de secagem em baixa temperatura foi monitorada e registrada por meio de um sistema de termometria do próprio armazém, com cabos contendo sensores tipo T, interligados a caixas de comutação e um sistema computadorizado que registrou os dados coletados uma vez por dia.

5.3.2 Parâmetros relacionados aos equipamentos

a) Determinação do volume de produto

O volume de grãos foi baseado nos dados de capacidade estática, informados pelo fabricante do secador em alta temperatura e nas medidas do armazém graneleiro para secagem em baixa temperatura.

b) Determinação da duração dos testes

O tempo de cada operação de secagem foi medido por meio de cronômetro digital simples. E o tempo de duração da aeração, foi baseado no banco de dados do sistema computadorizado de controle do sistema de aeração, que estava dotado de um

contador de horas de funcionamento de cada ventilador, devido a uma interligação de comando com o painel elétrico para ligar e desligar cada motor.

c) Temperatura do ar no secador

Os dados de temperatura de secagem foram medidos com termopares, posicionados nos seguintes locais (Figura 4): saída da fornalha (T1); entrada da câmara de secagem (T2), logo após o ciclone; ar de secagem na parte superior da câmara de secagem (T11); ar de secagem na parte intermediária da câmara de secagem (T12); e o ar de saída do secador (T5), antes dos ventiladores.

Para a leitura dos dados, os termopares foram conectados a um termômetro com indicador digital, alimentado por bateria 9,0 volts, com escala de 0 a 999 °C, precisão de 0,1°C, para os sensores tipo T, utilizados nos pontos com temperatura até o limite de 100 °C. Para utilização dos sensores tipo K e J, com capacidades entre 0 e 1.300 °C e entre 0 e 900 °C, respectivamente, foi utilizado um indicador digital, com escala de 0 a 9.999 °C com precisão de 0,1 °C, com alimentação direto na energia elétrica de 220 volts.

d) Consumo de energia elétrica

Os dados de consumo de energia elétrica foram baseados na potência dos equipamentos, com base nas informações de placas dos motores elétricos instalados. Foi medida, também, a corrente elétrica em cada equipamento, com um alicate elétrico digital, modelo Bravo 155, alimentado com bateria de 9 volts, calibrado para corrente contínua com escala de 0 a 200 ampéres, com resolução de 100 miliampéres, e acuracidade de +/- 2% . As medidas de corrente foram realizadas a intervalos de uma hora. Para o sistema de secagem a baixa temperatura, foram feitas algumas medidas em intervalos aleatórios, para comparação com os dados informados pelo sistema computadorizado existente.

Com os dados de corrente consumida e o tempo para cada operação, foi possível calcular o consumo de energia elétrica, conforme a equação 1:

$$P_M = V \cdot I \quad \text{(equação 1)}$$

onde:

P_M = potência do motor, kW;

V = tensão elétrica, V;

I = corrente elétrica, A

e) Pressão estática e vazão do ar

A medição da pressão estática do secador foi realizada no duto de entrada do ar de secagem (Figura 4), logo após o ciclone da fornalha, e no duto de saída do ar saturado, em um duto que interliga o ar de saída dos três ventiladores, conduzindo-o para um sistema de captação de impurezas. Nestes pontos fez-se orifícios com diâmetro de 4 mm, onde foi conectada a mangueira para entrada de ar para medição de pressão. Para a leitura da pressão utilizou-se um manômetro digital Fockink, alimentado por bateria de 9 volts, com faixa de variação de 0 a 350 mmCA.

Nos ventiladores do armazém graneleiro, a pressão estática foi medida, utilizando o mesmo manômetro digital, num orifício feito no duto metálico de interligação entre o ventilador e o canal aerador, realizando-se uma medida para cada ventilador em intervalos de tempo aleatórios.

Para determinar a vazão do ar de secagem, foi medida a velocidade do ar junto à saída dos três ventiladores, no duto que interliga-os com o sistema de captação de impurezas. Utilizou-se um anemômetro de fio quente com escala de 0,0 a 30,0 m.s⁻¹ e precisão de +/- 0,2 m.s⁻¹, alimentado por baterias de 1,5 volts, do tipo AA. Um quadro reticulado, distribuindo a seção do duto em 25 seções de 0,25 m², permitiu medidas mais precisas. Nos ventiladores do armazém, fez-se o mesmo sistema reticulado, no duto de captação de ar na entrada do ventilador, distribuindo-o em 9 seções de 0,20 m². Com os dados de velocidade em cada quadro, foi calculada a vazão média do ar em cada ventilador, e, conseqüentemente, a vazão que passou pela massa de grãos.

f) Combustível

A determinação do consumo de combustível, para aquecimento do ar de secagem, foi feita por pesagem da lenha em uma balança rodoviária com dimensões de 18 x 3m, capacidade de 80 toneladas e precisão de 1,0 kg. Foram medidos lotes de, aproximadamente,

1.000 kg, e colocados em porções separadas que foram utilizados pelos operadores até completar a repetição de cada ensaio. Nos casos em que apenas uma fração do lote foi utilizada, o material excedente foi novamente pesado, para deduzir do peso inicial.

A umidade do combustível foi determinada pelo método da estufa elétrica, até peso constante, a temperatura de 105 °C (+/- 2 °C), pelo período de 72 horas, com três repetições, de acordo com SKARR (1972).

Com base na umidade da lenha, foi possível determinar o poder calorífico inferior para o combustível utilizado, baseado na equação de Tiliman, citada por Biaggioni (1994):

$$PCI = 17.974 [1 - 0,0114 \cdot U_c] \quad (\text{equação 2})$$

onde:

PCI = poder calorífico inferior de combustível, kJ.kg^{-1} ;

U_c = teor de umidade do combustível, %b.u.

5.3.3 Parâmetros relacionados ao ambiente

Os dados de umidade relativa e temperatura do ar ambiente foram disponibilizados pela estação meteorológica instalada junto ao sistema controlador automático da aeração, que consiste de um termômetro formado por termopar de cobre e constantan, com escala de 0 a 999 °C, com precisão de 0,1°C, e sensor capacitivo de absorção de umidade, que enviam, instantaneamente, sinais para registros no computador.

Posteriormente, com base nos dados de entrada coletados, foi feita uma comparação dos resultados entre a secagem convencional e secagem combinada.

Para simulação e determinação da vazão mínima recomendada para a região de Pedrinhas Paulista, foi utilizado um banco de dados de temperatura e umidade relativa médios do ar na região de Cambará dos últimos dez anos, fornecidos pelo IAPAR – Instituto Agrônômico do Paraná, por não se dispor registros dos dados específicos para a região de Pedrinhas Paulista. O município de Cambará é limítrofe com o município de Pedrinhas Paulista, com características semelhantes de altitude, temperatura e umidade relativa média do ar.

5.4 Análise da qualidade

Para a análise da qualidade dos grãos, foi separada uma parte de cada amostra coletada, cerca de 100 grãos de milho, que foram enviados ao laboratório de processamento de grãos da UNESP de Botucatu, e examinados individualmente em um diafanoscópio. O objetivo desta análise foi classificar os grãos em “grãos trincados” e “grãos não trincados”.

5.5 Avaliação energética

Com base nos parâmetros coletados, foi feita a avaliação energética para cada um dos sistemas de secagem em análise: secagem convencional e secagem combinada.

Foram avaliados os seguintes itens:

5.5.1 Energia total do sistema

A energia total do sistema representa o somatório de todos os tipos de energia (energia do combustível e energia elétrica), dispensados para promover a secagem dos grãos, dentro dos parâmetros de umidade determinados.

A energia total do sistema é indicada pela equação:

$$Et = Ee + Ec \quad (\text{equação 3})$$

onde:

Et = energia total do sistema, kJ;

$$Ec = mc \cdot PCI \quad (\text{equação 4})$$

sendo:

Ec = energia consumida pelo combustível, kJ;

mc = massa de combustível consumida, kg;

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

$$Ee = 3,6 . P_M . to \quad \text{(equação 5)}$$

sendo:

Ee = energia elétrica consumida, kJ;

P_M = potência do motor, kW;

to = tempo de operação, s.

A energia elétrica considerada na secagem em alta temperatura, engloba o consumo de energia, citado na equação 1, calculada para os ventiladores do secador, o elevador de carga, a mesa de descarga do secador e a rosca transportadora de descarga. A energia elétrica considerada na secagem em baixa temperatura, engloba o consumo de energia dos ventiladores de aeração.

5.5.2 Rendimento térmico do secador

O rendimento térmico do secador representa a relação percentual entre a energia total do sistema e a energia do ar de secagem, e é expressa pela equação:

$$Rt = (Eas / Et) . 100 \quad \text{(equação 6)}$$

sendo:

Rt = rendimento térmico do secador, %;

Eas = energia do ar de secagem, kJ;

Et = energia total do sistema, kJ.

A energia do ar de secagem representa a quantidade de energia consumida em uma determinada quantidade mássica do ar de secagem, por unidade de tempo, para elevar a temperatura deste ar desde uma condição de ar ambiental até uma condição de ar de secagem, e é expressa por:

$$Eas = m_{ar} . c_{ar} . (T2 - T1) . t \quad \text{(equação 7)}$$

sendo:

E_{as} = energia do ar de secagem, kJ;

$\dot{m}_{ar}$ = vazão mássica do ar de secagem, kg.s^{-1} ;

c_{ar} = calor específico do ar de secagem, $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$;

T_2 = temperatura do ar de secagem, K;

T_1 = temperatura do ar ambiente, K;

t = tempo de duração da secagem, s.

5.5.3 Eficiência energética do sistema

A eficiência energética de um sistema de secagem de grãos representa a quantidade total de energia (energia do combustível mais energia elétrica), dispendida para evaporar uma unidade de água dos grãos, e é expressa pela equação:

$$E_f = E_t / \Delta M \quad (\text{equação 8})$$

onde:

E_f = eficiência energética do sistema, kJ.kg^{-1} ;

E_t = energia total do sistema, kJ;

ΔM = quantidade de água evaporada, kg.

A quantidade de água evaporada é expressa por:

$$\Delta M = M (U_i - U_f) / (100 - U_f) \quad (\text{equação 9})$$

onde:

M = massa total de grãos úmidos, kg;

U_i = teor de umidade inicial dos grãos, %;

U_f = teor de umidade final dos grãos, %.

5.5.4 Vazão mássica de combustível

A vazão mássica de combustível, indica a quantidade de combustível consumida por unidade de tempo, e fornece um parâmetro comparativo entre consumo de combustível para distintos sistemas de secagem.

A vazão mássica de combustível é expressa pela equação:

$$V_{mc} = M_c / t_o \quad (\text{equação 10})$$

onde:

V_{mc} = vazão mássica de combustível, kg.h^{-1} ;

M_c = massa de combustível consumida, kg;

t_o = tempo de operação, h.

5.6 Custo operacional do sistema

O custo operacional do sistema foi representado pelo somatório dos custos variáveis envolvidos no processo, considerando-os como função da capacidade unitária de processamento, pelo tempo consumido em cada um dos métodos de secagem realizados experimentalmente. Foram considerados os custos de combustível, energia elétrica e mão-de-obra, desprezando-se os custos fixos como depreciação dos equipamentos, juros, manutenção, seguros e impostos.

Para a composição dos custos foram considerados os valores unitários de mercado, na época da realização do experimento.

O custo operacional é expresso pela equação:

$$C_o = (q_c.V_c) + (q_{ee}.V_{ee}) + (q_{mo}.V_{mo}) \quad (\text{equação 11})$$

onde:

C_o = custo operacional total, R\$;

q_c = quantidade de combustível consumido na secagem, kg;

V_c = valor do combustível, R\$/kg;

q_{ee} = quantidade de energia elétrica consumida na secagem, kW;

V_{ee} = valor da energia elétrica, R\$/kW;

q_{mo} = quantidade de mão-de-obra, horas;

V_{mo} = valor total da mão-de-obra, R\$/h.

Para cada um dos experimentos realizados, foi determinado o custo operacional total do processo e o custo operacional por tonelada de produto seco.

5.7 Determinação das vazões mínimas para secagem em baixa temperatura

Para determinação das vazões mínimas para secagem em baixa temperatura, utilizou-se o programa de computador com simulação de secagem de milho, com base no modelo proposto por Morey, utilizado por Biaggioni e Ferreira (1997), analisando o potencial adiabático de secagem do ar ambiente, para diferentes teores de umidade dos grãos.

Como dados de entrada, foram utilizados os valores médios diários de temperatura e umidade relativa do ar ambiente, do banco de dados meteorológicos do IAPAR – Instituto Agrônomo do Paraná, considerando um incremento de temperatura no ar de secagem de 1°C, devido à sua passagem pelos ventiladores, e o teor de umidade (%b.u.) e temperatura (°C) dos grãos de milho após sua saída do secador em alta temperatura. Foram utilizadas duas possibilidades no teor de umidade dos grãos (16% e 18% b.u.) e, duas possibilidades na temperatura dos grãos (20°C e 30°C), na saída do secador. O objetivo em variar as características dos grãos na saída do secador, é avaliar o ganho obtido ao trabalhar com grãos mais secos (16 % b.u.) e, retirar os grãos aquecidos (30°C) do secador em alta temperatura, utilizando a sua câmara de resfriamento como câmara de secagem, aumentando a sua capacidade estática de secagem.

Como dados resultantes, na saída, usou-se como objetivo um teor de umidade médio dos grãos de 13% b.u., e uma perda máxima de matéria seca durante a secagem de 0,5%. Quando o programa registrava uma perda de matéria seca superior a este percentual, não era apresentada a vazão mínima recomendada, indicando que o sistema era insuficiente

para promover a secagem, para aqueles valores médios de temperatura e umidade relativa do ar ambiente.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O início do processo de secagem combinada ocorreu em 12 de julho de 2003, com os grãos sendo secos até, aproximadamente, 16,5% b.u. e colocados no armazém graneleiro. O sistema de aeração foi ligado quando os grãos, nivelados atingiram cerca de 1,0 m acima dos dutos de distribuição de ar, o que ocorreu ao final do primeiro dia de secagem. Nos dias 23 e 24 de agosto, quando faltavam cerca de 500 t para completar a carga do armazém, foram monitoradas 03 cargas consecutivas, na secagem combinada a alta temperatura, para a coleta dos dados. Os dados da secagem convencional, foram coletados logo após, com grãos provenientes da mesma safra. Os dados da secagem a baixa temperatura foram coletados entre os dias 12 de julho e 10 de setembro, quando foi considerada a carga total do armazém graneleiro em equilíbrio do teor de umidade em, aproximadamente, 12,5% b.u.

Os parâmetros coletados estão apresentados, separadamente, considerando dados em alta e baixa temperatura, sendo os dados em alta temperatura, subdivididos em secagem combinada (lotes 1, 2 e 3) e secagem convencional (lotes 4, 5 e 6).

Foram considerados como parâmetros gerais nos processos em alta temperatura, o teor de umidade inicial e final dos grãos, a temperatura e a umidade relativa do ambiente, a temperatura média no “plenum”, a vazão do ar de secagem, o tempo de operação do secador até atingir o teor de umidade final, o consumo de combustível e o consumo de energia elétrica do processo. Estes dados serviram como base para o cálculo da avaliação energética.

Tabela 1 – Resultados médios obtidos durante a secagem combinada (primeira fase) e a secagem convencional, no secador em alta temperatura.

Parâmetros	Secagem combinada	Secagem convencional
Umidade inicial (%b.u.)	22,3	20,8
Umidade final (%b.u.)	15,4	12,3
Tempo de operação (h)	3,08	4,76
Temperatura de secagem (°C)	114	119
Consumo lenha (kg)	2.996	5.013
Vazão de ar (m ³ .s ⁻¹)	34	34
Consumo elétrico (kWh)	30,3	31
Temperatura ambiente (°C)	33	24
Umidade relativa ambiente (%)	59	69
Numero de operadores	6	9

A quantidade de produto para cada ensaio foi considerada com base na capacidade estática do secador, que era de 90.000 kg de milho úmido.

O valor do PCI – poder calorífico inferior da lenha – foi obtido com base no teor de umidade da lenha, cujo valor médio foi de 19,47%, resultando em um PCI de 13.985 kJ.kg⁻¹ (Equação 2).

Analisando a Tabela 1, observa-se teores de umidade mais elevados para o tratamento em “secagem combinada”. Esta pequena diferença é devida ao fato deste tratamento ter iniciado a pesquisa, sendo os lotes formados por grãos colhidos um pouco mais cedo em relação aos lotes do tratamento em “secagem convencional”.

Apesar dos teores de umidade iniciais mais altos, verifica-se, ainda pela Tabela 1, que a secagem combinada, na fase de alta temperatura, apresentou um tempo de operação menor e, conseqüentemente, menor consumo de lenha. Isto pode ser explicado pelo fato da secagem combinada, além de encerrar antes, processar-se numa fase mais favorável à evaporação da água dos grãos.

Os demais parâmetros, como temperatura de secagem e vazão de ar, não tiveram variações expressivas, mesmo em função das variações ambientais.

Na secagem convencional, foi exigido um número maior de operadores para coleta das impurezas nas máquinas de limpeza após a secagem. Ao secar os grãos até teores de umidade mais baixos (12,5% b.u.), um grande volume de impurezas vai se desprendendo e ocupando os espaços intergranulares, o que prejudica a passagem de ar, do sistema de aeração, pois tendem a concentrar-se no centro da massa de grãos, logo abaixo do ponto onde são descarregados os mesmos. Com teores de umidade dos grãos em torno de 16% b.u., estas impurezas ficam retidas aos grãos, facilitando a aeração, e a medida em que se processa a secagem, há um desprendimento das mesmas, de forma uniforme na massa de grãos, sem prejuízos a passagem do ar.

Como parâmetros gerais na secagem a baixa temperatura, foram considerados a umidade inicial e final dos grãos, a quantidade de grãos armazenados, a vazão de ar, o tempo do processo de secagem e o consumo de energia elétrica. Estes dados estão identificados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados obtidos durante a segunda etapa da secagem combinada (baixa temperatura), no armazém graneleiro.

Parâmetros	Armazém graneleiro completo
Umidade inicial média (%b.u.)	16,5
Umidade final média (%b.u.)	12,5
Quantidade de grãos (t)	9.000
Tempo de operação (h)	1.239
Vazão de ar ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)	2.350
Consumo elétrico (kWh)	69,0
Número de motores	8

O processo de secagem a baixa temperatura, considerando a capacidade total do armazém, durou 1.239 horas, com os grãos passando de um teor de umidade inicial médio de 16,5% para 12,5 % b.u.

Analisando a vazão média de ar, em relação a quantidade total de grãos armazenados, observa-se uma vazão específica de ar de $0,26 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$

Com base nos parâmetros coletados e nas equações anteriormente apresentadas, pôde-se fazer a avaliação energética da secagem combinada, em relação a secagem convencional, para cada uma das amostras consideradas.

6.1 Avaliação energética da secagem

Para a avaliação energética da secagem, com os sistemas divididos em secagem combinada e secagem convencional, determinou-se o consumo total de energia de cada fonte geradora, incluindo a energia térmica da secagem, e a quantidade de água evaporada, o que permite calcular o rendimento térmico dos sistemas de secagem, sua eficiência energética e a vazão mássica de combustível consumido (Tabela 3).

Tabela 3 – Resultados obtidos na secagem combinada, em lotes de 90 t, em alta temperatura (AT) e em baixa temperatura(BT).

Parâmetros	Lote 1	Lote 2	Lote 3
Ec – energia de combustível, kJ	41.953.581	43.352.033	40.415.283
Ee – energia elétrica, kJ (AT)	372.574	349.646	338.182
Ee – energia elétrica, kJ (BT)	4.103.737	4.103.737	4.103.737
Et – energia total , kJ	46.429.892	47.805.416	44.857.202
Água evaporada, kg (AT)	8.394	7.268	6.360
Água evaporada, kg (BT)	2.611	3.120	2.485
Eas – energia do ar de secagem, kJ (AT)	29.491.313	31.790.531	30.748.219
Rt – rendimento térmico, % (AT)	70	73	76
Eficiência energética, kJ.kg ⁻¹ (AT)	4.206	4.589	5.057
Vazão mássica combustível, kg.h ⁻¹ (AT)	923	1.016	978

A determinação da energia elétrica consumida na secagem em baixa temperatura foi com base no consumo de energia elétrica para secar a carga total do armazém (9.000 t), dividida pela quantidade de cargas do secador de 90 t, necessárias para completar essa carga total, representada por 4.103.737 kJ (Tabela 4).

Tabela 4 – Resultados obtidos na secagem convencional, em lotes de 90 t, em alta temperatura.

Parâmetros	Lote 4	Lote 5	Lote 6
Ec – energia de combustível, kJ	67.405.420	68.104.646	74.817.219
Ee – energia elétrica, kJ	478.040	553.702	605.289
Et – energia total, kJ	67.883.460	68.658.348	75.422.508
Água evaporada, kg	8.556	7.686	9.857
Eas – energia do ar de secagem, kJ	49.089.240	54.015.822	57.623.940
Rt – rendimento térmico, %	73	79	77
Eficiência energética, kJ.kg ⁻¹	7.934	8.933	7.651
Vazão mássica combustível, kg.h ⁻¹	1.155	1.008	1.013

6.1.1 Energia total do sistema

Analisando a energia total envolvida em cada caso, nota-se que a energia total consumida na secagem combinada foi menor, em comparação ao sistema de secagem convencional (Tabelas 3 e 4). Tal fato, deve-se à redução de energia consumida no sistema de secagem a alta temperatura, reduzindo o teor de umidade para, aproximadamente, 15,3% b.u. Baseado nisso, pode-se supor que, se a secagem a alta temperatura tivesse ocorrido até um teor maior de umidade, cerca de 17% b.u., o ganho em energia consumida seria ainda maior.

Mesmo a secagem combinada utilizando uma grande quantidade de energia elétrica para acionamento dos motores dos ventiladores, apresentou vantagem no consumo total de energia, pois os valores de energia consumida na secagem a baixa temperatura, utilizando-se os valores médios de energia elétrica em baixa temperatura, apresentados na Tabela 3, em relação a capacidade de cada lote processado (90 t), ficaram em torno de 45.600 kJ.t⁻¹, enquanto que na secagem convencional, utilizando-se os valores médios de energia elétrica mais a energia de combustível, da Tabela 3, em relação a capacidade de cada lote processado (90 t), o consumo médio de energia ficou em 470.290 kJ.t⁻¹.

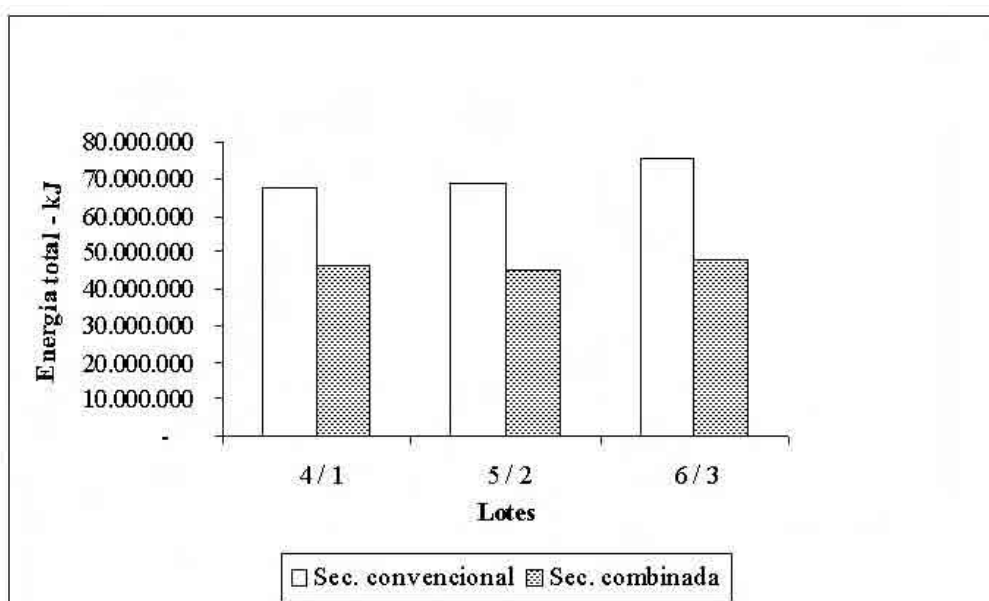


Figura 5 – Energia total consumida em cada sistema de secagem

Comparando os valores médios de energia na secagem combinada, com a secagem convencional, para cada lote, conforme mostra a Figura 5, observa-se um ganho de, aproximadamente, 30%, quando a secagem é combinada com alta e baixa temperatura, semelhante aos dados apresentados por Maier e Montross (2000), que citaram um ganho de 25%.

6.1.2 Rendimento térmico do secador

Observando as Tabelas 3 e 4, verifica-se que o rendimento térmico apresentado, em todos os casos, ficou em aproximadamente 70%, o que denota um bom desempenho do secador pois, normalmente, os dados teóricos de secadores contínuos de cavaletes, indicados pelos fabricantes dos mesmos, estão em torno de 75% (WEBER, 1995).

Na secagem em alta temperatura, observou-se que, à medida que reduziu a temperatura ambiente, aumentou o consumo de combustível, para recuperar e manter a temperatura do ar de secagem, com conseqüente redução no rendimento térmico, o que pode ser observado na Tabela 1.

6.1.3 Eficiência energética do sistema

Quanto à eficiência energética, em alta temperatura, nos dois métodos de secagem, observa-se que foi melhor no caso da secagem combinada, ficando próxima de 5.000 kJ.kg^{-1} de água evaporada, demonstrando que o uso de secador em alta temperatura é mais eficiente quando opera em maiores faixas de umidade dos grãos. A eficiência energética na secagem convencional (máxima de 8.933 kJ.kg^{-1}), ficou ligeiramente acima dos parâmetros normalmente indicados, que são 3.900 e 6.300 kJ.kg^{-1} , conforme citou Groff (2001), provavelmente devido ao baixo teor de umidade a que foram submetidos os grãos, aquém dos 13% b.u., que normalmente é utilizado em secadores comerciais. Analisando somente a secagem em baixa temperatura, a eficiência energética ficou em torno de 1.500 kJ.kg^{-1} , secando de 15,3% para 12,5% b.u., o que é considerado um valor favorável aos valores citados por Biaggioni (1994), que encontrou 3.761 kJ.kg^{-1} para secagem em baixa temperatura, na faixa de umidade entre 22 e 13,5% b.u., na região de Botucatu/SP.

Entretanto, salienta-se que este baixo consumo energético na secagem em baixa temperatura, deve-se à reduzida vazão de ar encontrada no sistema, o que pode ser comprometedora quanto à qualidade dos grãos em processo de secagem.

6.1.4 Vazão mássica de combustível

A vazão mássica foi determinada por medição do consumo de combustível de cada lote seco em alta temperatura, dividido pelo número de horas em que ocorreu o processo.

Pela Figura 6, pode-se observar que os valores encontrados situam-se entre os padrões normalmente indicados pelos fabricantes de secadores para estas capacidades, entre 900 e 1.100 kg.h^{-1} , conforme citado por Weber (1995).

No lote 4 (secagem convencional), observa-se um maior consumo de combustível (1.156 kg.h^{-1}), relacionado a menor temperatura ambiente (22°C), enquanto que no lote 1 (secagem combinada), onde a temperatura ambiente estava em torno de 37°C , o consumo horário de combustível foi de 923 kg.h^{-1} .

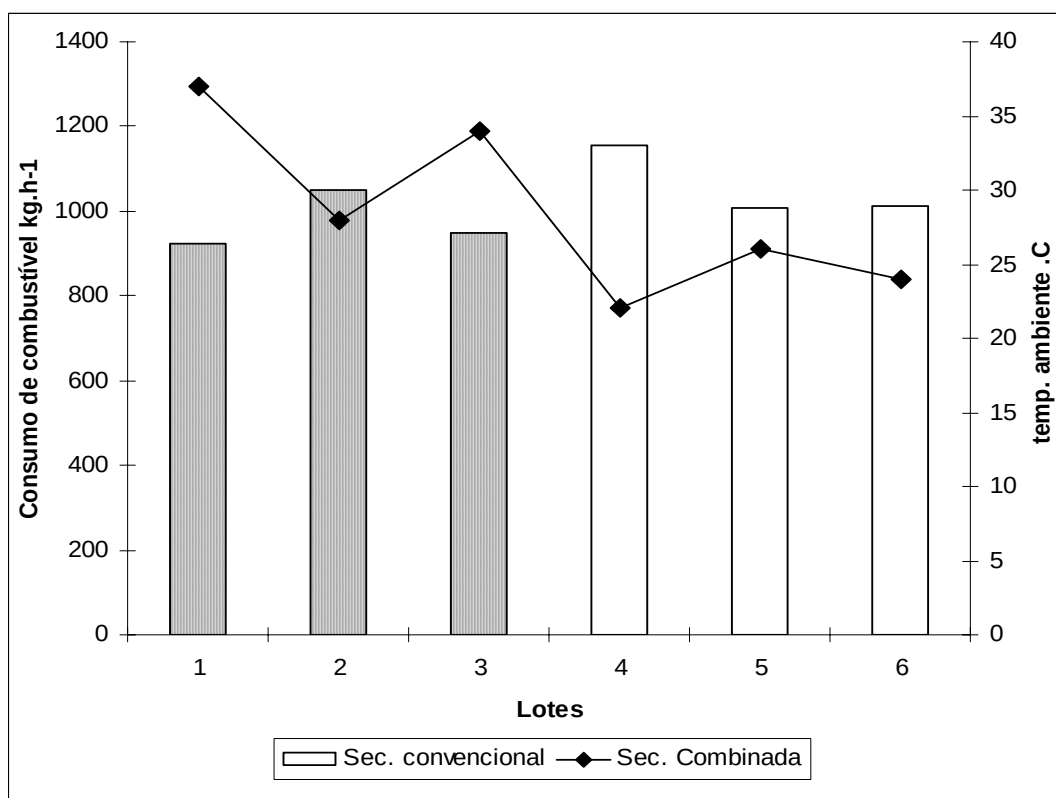


Figura 6 – Consumo horário de combustível e temperatura ambiente

6.2 Curvas de secagem experimental

As curvas de secagem, para cada uma das situações de secagem em alta e baixa temperatura, foram determinadas pela análise do teor de umidade dos grãos, em função do tempo.

Para facilitar a análise, as curvas de secagem foram divididas em secagem convencional (em alta temperatura), onde os grãos foram secados de aproximadamente 20% b.u., diretamente para cerca de 12,5%, e secagem combinada (em alta temperatura), onde os grãos foram secados de aproximadamente 21% b.u. até cerca de 15,5% b.u., e secagem em baixa temperatura, onde a secagem foi realizada nas faixas entre 15,5% e 12,5% b.u.

Analizando a Figura 7, pode-se verificar que a variação do teor de umidade foi proporcional em todas as amostras, sendo mais eficiente a secagem quando o teor de umidade estava mais alto, conforme esperado.

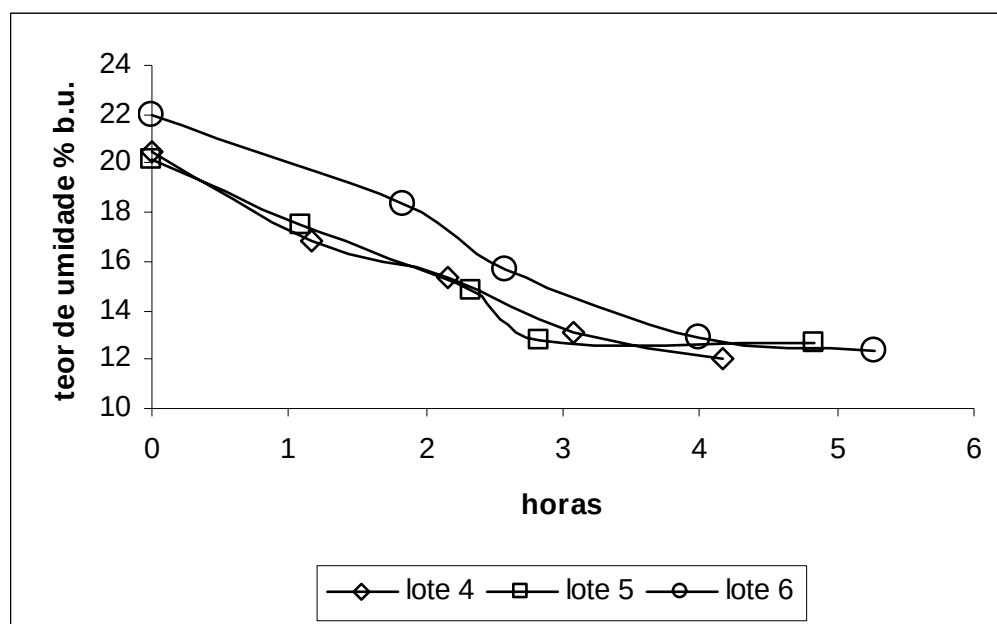


Figura 7 – Curvas de secagem convencional

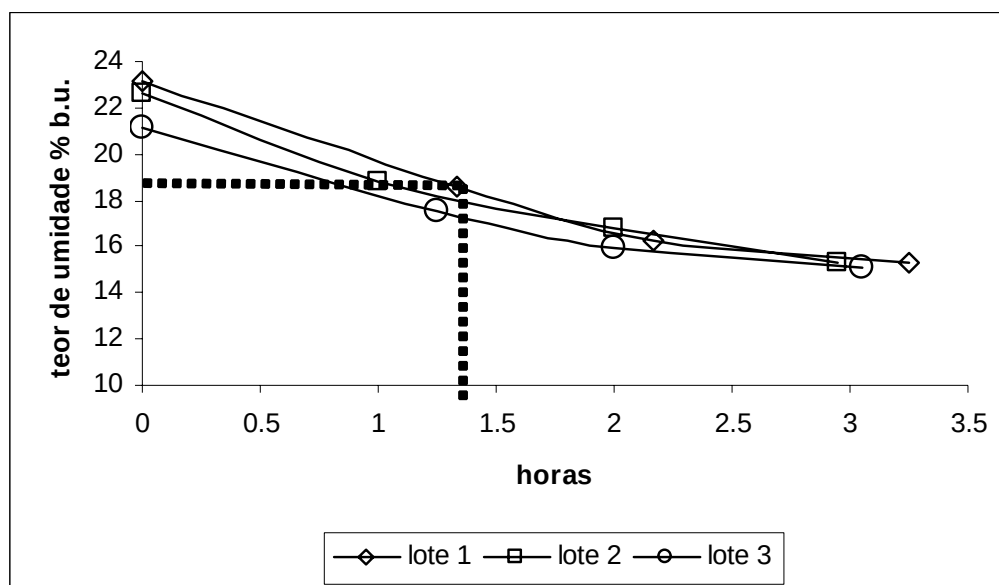


Figura 8 – Curvas de secagem combinada, em alta temperatura

Pela Figura 8, pode-se perceber que o tempo de secagem foi relativamente longo, para um pequeno ganho na capacidade de secagem, secando os grãos até cerca de 15% b.u. Entretanto, pode-se observar, também que, caso a secagem combinada tivesse ocorrido até o teor de umidade de 17% b.u., o tempo de secagem seria menor, proporcionando maior ganho no sistema de secagem.

Atentos à segurança e à qualidade dos grãos, os responsáveis pela qualidade de grãos na Cooperativa de Pedrinhas Paulista operam o início da secagem a baixa temperatura com percentuais de umidade entre 15 e 16% b.u.

Analisando o teor de umidade ao longo da altura da camada de grãos (Figura 9), entre o início e o final do processo, observa-se um importante gradiente de umidade, devido ao excesso de secagem na parte inferior da camada de grãos, evidenciando um longo período de tempo entre a carga das primeiras e últimas camadas de grãos.

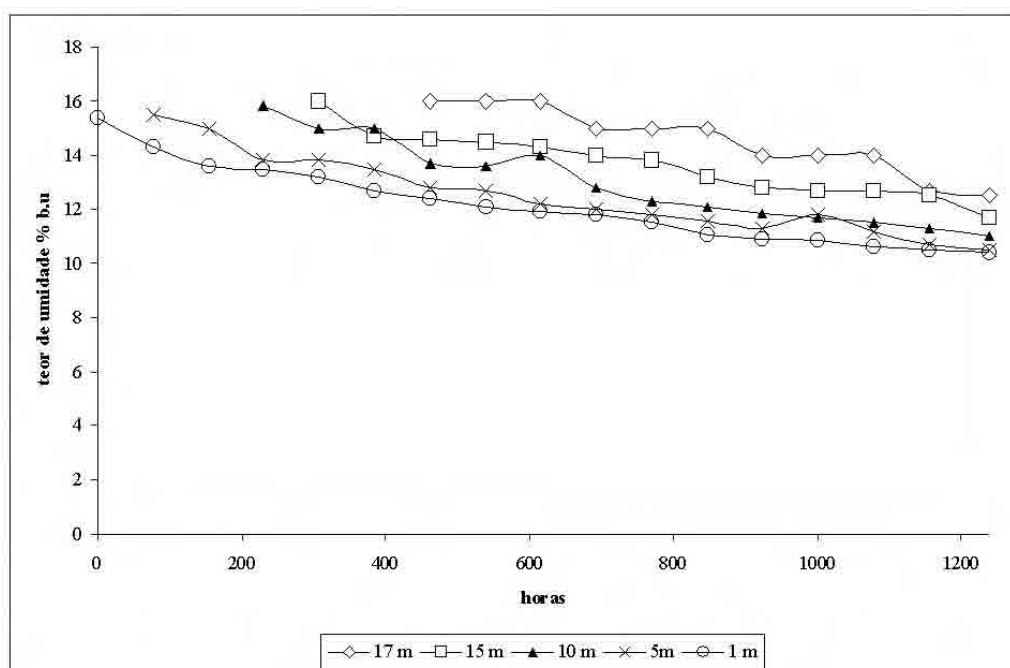


Figura 9 – Curvas de secagem combinada, em baixa temperatura

Este gradiente de umidade, aliado ao tempo de secagem é um indicativo do grande cuidado que deverá ser tomado no manejo do sistema de secagem a baixa temperatura, visto que, em condições ambientais adversas, poderá ocorrer a deterioração das camadas superiores dos grãos, antes que se processe a sua secagem.

Pela Figura 9, verifica-se que o tempo para completar a secagem foi longo, provavelmente em função da baixa vazão de ar, já que as condições ambientais durante o período analisado, comprovaram o bom potencial de secagem da região de Pedrinhas Paulista. O resultado negativo desta baixa vazão de ar, foi corroborado na qualidade dos grãos armazenados, apresentando alguns pontos de pigmentação, indicando a presença de fungos, devido ao teor de umidade dos grãos e à alta temperatura em que se manteve a massa de grãos. Provavelmente, o problema teria sido pior se os grãos tivessem sido colocados no armazém graneleiro, com maior teor de umidade, conforme recomenda a literatura.

6.3 Avaliação da temperatura de secagem

O monitoramento da temperatura no interior do secador, em alta temperatura, serve como base para identificar possíveis perdas que estejam ocorrendo no sistema, comparando as variações de temperatura da fornalha com a do ar de secagem. Permite, também, avaliar a temperatura máxima do ar de secagem que, atingindo valores acima de 120°C, pode prejudicar a qualidade dos grãos secos (WEBER, 1995).

As Figuras 10 e 11, mostram os valores de temperatura na fornalha, no ciclone e na câmara de entrada do ar de secagem, para os lotes analisados na metodologia de secagem combinada e secagem convencional.

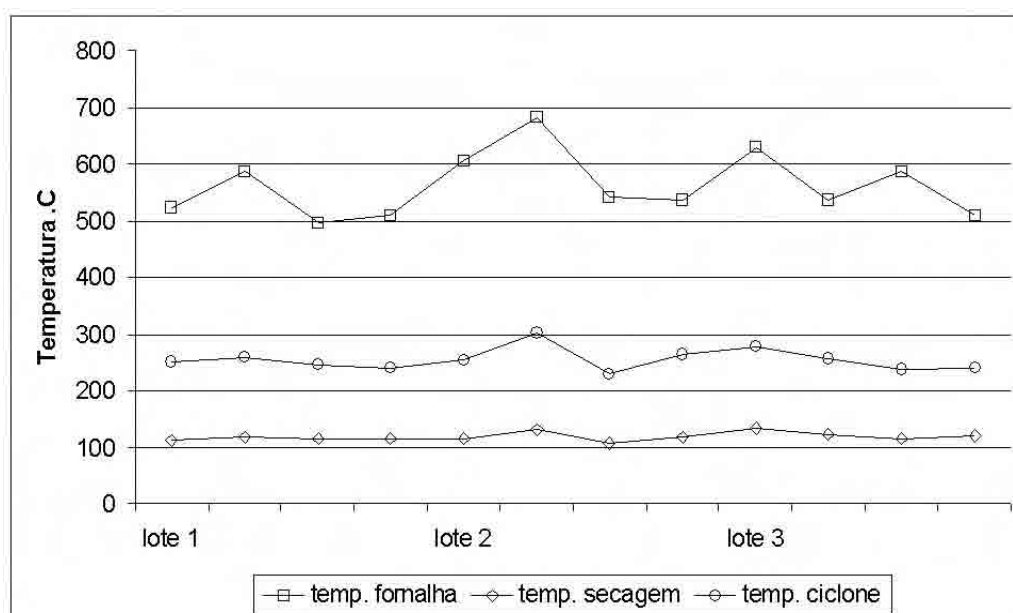


Figura 10 – Variação da temperatura na fornalha, no ciclone e ar de secagem, na secagem combinada

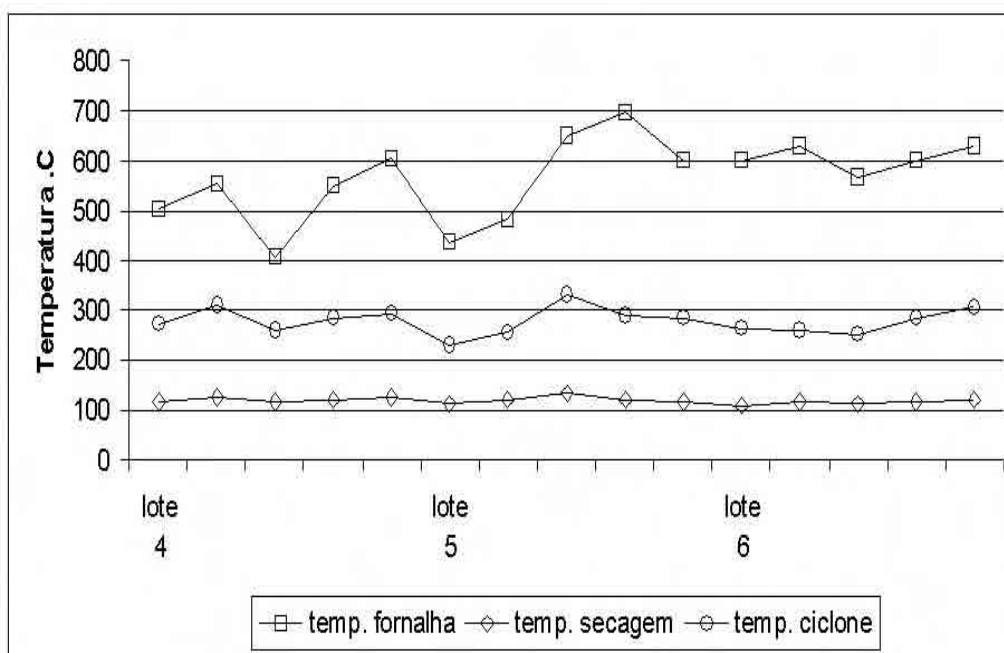


Figura 11 – Variação da temperatura na fornalha, no ciclone e ar de secagem, na secagem convencional

Analisando as figuras 10 e 11, o que se pode observar foi a grande variação de temperatura na fornalha, e uma redução entre a temperatura da fornalha e a temperatura de secagem, sendo que esta apresentou pequena variação. Tal fato foi mais evidente quando feita a medição de temperatura após o ciclone de ar, observando-se que a temperatura nesta fase baixava de aproximadamente 500 °C para valores entre 210 e 300 °C, indicando muita redução de temperatura nesta parte do secador. devido a entrada de um grande volume de ar ambiente

Analisando as temperaturas no interior do secador, conforme mostrado nas Figuras 12 e 13, para as diferentes posições de sensores, relaciona-se a temperatura na câmara de entrada do ar de secagem, à temperatura dos grãos no sistema de descarga e a temperatura ambiente, para todos os lotes analisados em alta temperatura.

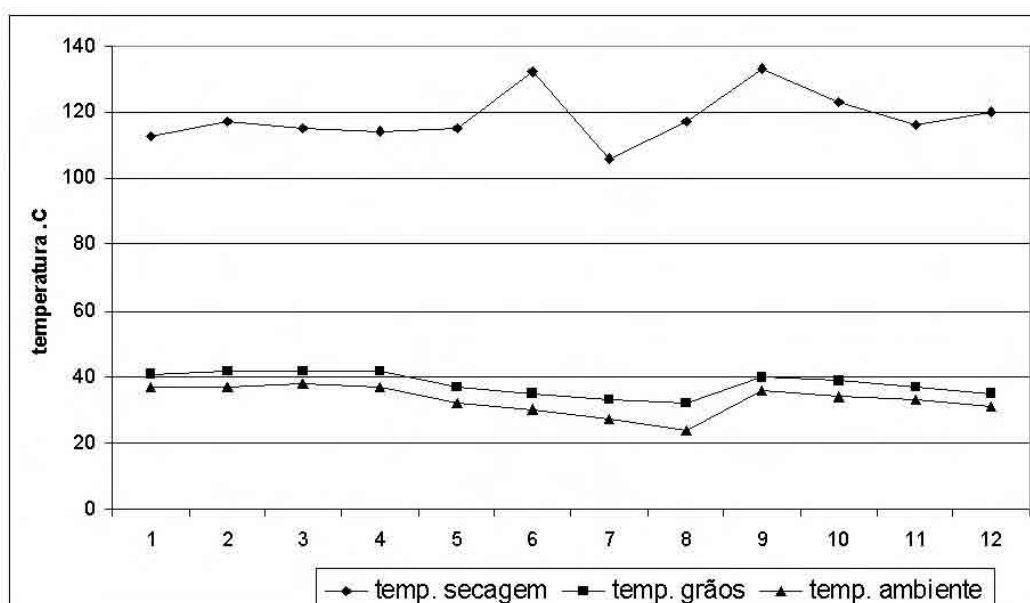


Figura 12 – Variação da temperatura em alta temperatura na secagem combinada

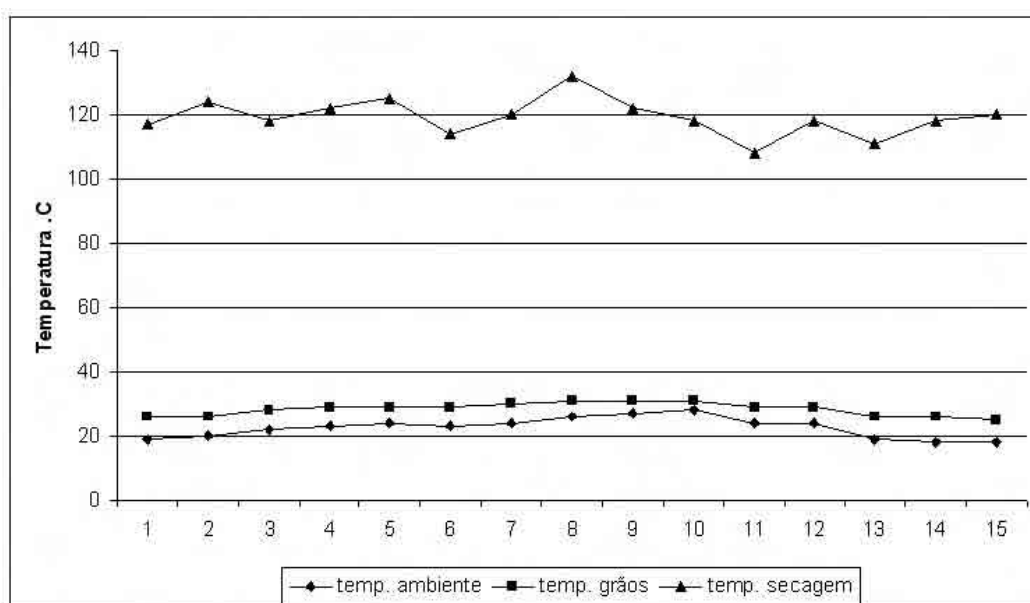


Figura 13 – Variação das temperaturas na secagem convencional

Os dados de temperatura apresentados são semelhantes para as duas situações de secagem, não evidenciando mudanças quando se altera a metodologia de secagem, visto que as faixas de umidade dos grãos não foram tão expressivas, e o manejo da fornalha foi da mesma forma, independente do tipo de secagem executado.

Nas Figuras 12 e 13, observa-se variações mais acentuadas da temperatura do ar de secagem, medida na câmara de entrada de ar quente no secador, quando ocorrem variações na temperatura ambiente, pelo fato da alimentação de combustível na fornalha ser manual e não uniforme, provocando maiores perdas, já que o teor de umidade e demais características físicas da lenha eram uniformes. Analisando a temperatura dos grãos na saída do secador, em relação a temperatura ambiente, observa-se que a mesma manteve-se em um gradiente médio de 5 °C, o que é considerado normal em um secador contínuo de fluxo misto (WEBER, 1995).

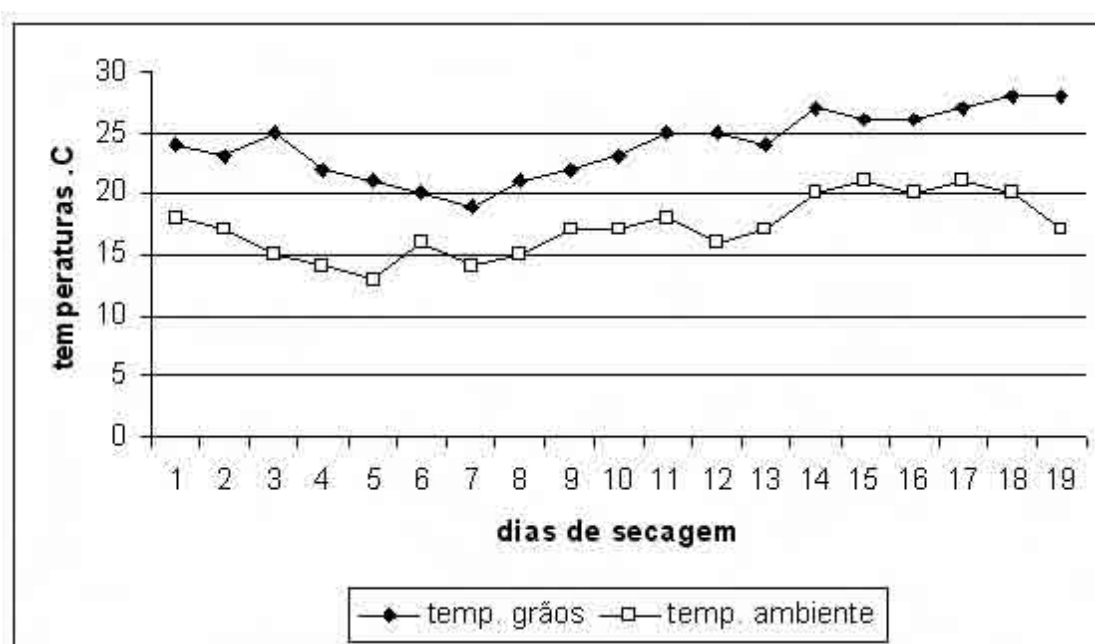


Figura 14 – Variação da temperatura em baixa temperatura na secagem combinada

A temperatura dos grãos no armazém foi monitorada pelo sistema de termometria existente na unidade, e considerou-se a média dos pontos onde foram descarregados os lotes analisados na secagem em alta temperatura.

A temperatura da massa de grãos é um indicativo da qualidade dos mesmos, pois a ocorrência de focos de aquecimento evidencia sua deterioração, principalmente quando a vazão de ar é deficiente e a frente de secagem avança lentamente até as camadas superiores.

Observando a Figura 14, nota-se uma tendência de aquecimento da massa de grãos, a partir do 13º dia de secagem. Embora esta diferença de temperatura não tenha excedido, em média, o limite de 5 °C, o que é considerado normal em grãos armazenados a granel, a temperatura dos grãos acima de 25°C acelera a deterioração (PUZZI, 1986).

6.4 Avaliação da capacidade de secagem do secador

A capacidade de secagem é medida em função da quantidade de produto capaz de ser seco na unidade de tempo, relacionado a um determinado percentual de redução de umidade.

Esta variável é de extrema importância no dimensionamento de uma unidade de processamento de grãos, pois o secador é o equipamento que determina a seleção de capacidade dos demais equipamentos no fluxo da unidade.

A capacidade de secagem foi calculada pela quantidade de água retirada por unidade de tempo, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Capacidade unitária de secagem em alta temperatura

Parâmetros	Secagem convencional			Secagem combinada		
	Lote 4	Lote 5	Lote 6	Lote 1	Lote 2	Lote 3
Umidade inicial (%b.u.)	20,42	20,11	21,95	23,2	22,6	21,1
Umidade final (%b.u.)	12,06	12,65	12,35	15,3	15,8	15,1
Tempo de operação (h)	4,17	4,83	5,28	3,25	3,05	2,95
Água evaporada total (kg)	8.556	7.686	9.857	8.394	7.268	6.360
Água evaporada por hora (kg. h ⁻¹)	2.051,8	1.591,3	1.866,8	2.582,8	2.383,0	2.155,9

Com base na Tabela 5, pode-se verificar que a quantidade de água evaporada por unidade de tempo é maior na secagem combinada. Obteve-se valores médios de 1.836,6 kg. h⁻¹ para a secagem convencional e 2.373,9 kg. h⁻¹ para a secagem combinada.

Visto isto, pode-se determinar o tempo total de processamento de secagem para a capacidade total de grãos recebidos na unidade, utilizando os valores médios de umidade dos grãos e a quantidade de água evaporada por hora, para cada uma das metodologias de secagem.

Capacidade total: 9.000 t

Umidade inicial média: 20 % b.u.

Umidade final média: 13% b.u.

Quantidade de água a evaporar: 724.137 kg.

Secagem convencional:

Média de água evaporada por hora: 1.836,6 kg. h⁻¹

Tempo necessário: 394,28 horas

Secagem combinada:

Média de água evaporada por hora: 2.373,9 kg. h⁻¹

Tempo necessário: 305,04 horas

Analisando o tempo necessário para promover a secagem, considerando a quantidade de água evaporada por hora, observa-se um aumento médio de 29% na capacidade, quando utilizada a metodologia de secagem combinada.

Aumentando a capacidade de secagem, ocorre aumento na capacidade de recepção de grãos, visto que o secador é o equipamento base para o dimensionamento de uma unidade de pré-processamento são regulados de acordo com a capacidade do secador em alta temperatura.

6.5 Custo operacional total

O custo operacional total foi composto com base em valores de insumos praticados à época da realização dos testes, conforme mostrado na Tabela 6.

Para a determinação dos valores unitários de energia elétrica, foram considerados os valores gastos com energia na secagem em alta temperatura (AT) e baixa temperatura (BT).

Tabela 6 – Custos operacionais com combustível, energia elétrica e mão-de-obra, para cada metodologia de secagem.

Parâmetros	Secagem combinada			Secagem convencional		
	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Lote 4	Lote 5	Lote 6
qc – Combustível, R\$. t ⁻¹	1,54	1,59	1,49	2,48	2,51	2,75
qe – En. elétrica, R\$. t ⁻¹						
Alta Temperatura	0,12	0,11	0,11	0,16	0,18	0,20
Baixa Temperatura	1,25	1,25	1,25	-	-	-
qmo – Mão-de-obra, R\$. t ⁻¹	1,12	1,01	1,05	1,84	2,14	2,34
Custo Total, R\$. t ⁻¹	4,03	3,96	3,90	4,48	4,83	5,29

Pode-se observar pela Tabela 6, que a metodologia de secagem combinada apresentou um custo unitário médio de combustível menor em relação a secagem convencional (aproximadamente 60%), enquanto o custo com energia elétrica na mesma metodologia ficou

significativamente maior, representando cerca de 8,5 vezes mais, devido à grande quantidade de energia elétrica necessária para realizar a secagem em baixa temperatura.

O custo com mão de obra, na secagem convencional, foi o dobro do custo da secagem combinada. Este fato ocorreu porque a quantidade de impurezas liberadas pelas máquinas de limpeza, é maior quanto mais secos estiverem os grãos, exigindo a retirada dos sacos coletores de impurezas com maior frequência.

Entretanto, a composição do custo total ficou relativamente próxima, devido à influência destes parâmetros na composição total dos custos, já que os valores unitários de energia elétrica são relativamente baixos, comparados aos valores da lenha.

Analisando o custo total da secagem, pode-se verificar que na secagem combinada, o custo com combustível representou 48% do custo total, a energia elétrica representou 20% e a mão-de-obra representou 32%. Na secagem convencional, o custo com combustível representou 53%, a energia elétrica representou 4% e o custo com mão de obra representou 43%.

A partir dos valores médios dos lotes analisados, observa-se um custo total de secagem de 3,96 R\$. t⁻¹ para a metodologia de secagem combinada e um custo de 4,87 R\$. t⁻¹ para a metodologia de secagem convencional, representando uma diferença de 22%.

6.6 Determinação das vazões mínimas

A determinação das vazões mínimas recomendadas para a região de Pedrinhas Paulista, foi com base em um programa de simulação, utilizando dados históricos de condições ambientais e dados característicos da massa de grãos.

Pelo fato dos agricultores desta região executarem duas safras de milho por ano, calculou-se o potencial adiabático de secagem para as duas épocas de colheita que, normalmente, inicia no mês de abril, para a safra normal, e no mês de julho para a safra intermediária, chamada de “safrinha”. Como o período de secagem pode durar cerca de 75 dias, utilizou-se os dois meses subsequentes ao mês de colheita para cálculo do potencial adiabático de secagem, que foram os meses de abril, maio e junho, para uma fase e os meses de julho, agosto e setembro para a outra fase.

Realizados estes cálculos, observou-se que os meses de abril, maio e junho têm o menor potencial adiabático de secagem, sendo, então, escolhidos para o cálculo das vazões mínimas a serem indicadas para a região em estudo.

A Tabela 7 mostra que na época selecionada, com o aumento da umidade relativa do ar ambiente, diminui o potencial adiabático de secagem do ar ambiente.

Tabela 7 – Valores para potencial adiabático de secagem (PAS) e umidade relativa média do ar ambiente (U.R.), na região de Pedrinhas Paulista, SP.

Ano	Abril		Maio		Junho	
	U.R. (%)	PAS (g.m ⁻³)	U.R.(%)	PAS(g.m ⁻³)	U.R.(%)	PAS(g.m ⁻³)
1994	74,2	1,58	76,9	1,36	77,0	1,19
1995	73,3	1,59	77,8	1,24	73,9	1,46
1996	73,5	1,61	72,9	1,53	74,3	1,40
1997	73,6	1,57	76,7	1,32	83,2	0,87
1998	79,3	1,23	79,3	1,13	78,3	1,13
1999	69,8	1,80	72,6	1,51	85,6	0,76
2000	61,6	2,47	71,7	1,57	65,6	2,07
2001	66,1	2,22	78,9	1,15	80,9	1,03
2002	57,4	2,91	83,4	0,94	69,8	1,75
2003	68,6	1,97	75,1	1,37	80,4	1,21
2004	74,7	1,59	81,9	0,98	80,2	1,06

Comparativamente, os meses de maio e abril apresentaram os menores valores de potencial adiabático de secagem, o que é característico da região, onde ocorre nestes meses a tendência a baixa temperatura e alta umidade relativa ambiente.

A partir dos valores obtidos com o potencial adiabático de secagem, através do programa de simulação implementado por Queiroz, Pereira e Melo (1986), determinou-se o valor mínimo de vazão específica indicada para a região de Pedrinhas Paulista.

Foram utilizadas duas possibilidades de teor de umidade de entrada dos grãos no sistema de secagem com temperatura próxima a ambiente, 16 e 18% b.u., e para cada um destes, simulou-se uma variação na temperatura dos grãos no início do processo. Esta análise serviu para avaliar o ganho que se tem na secagem em baixa temperatura, transformando a câmara de resfriamento do secador em câmara de secagem, o que além de melhorar a condição de secagem em baixa temperatura, devido ao aproveitamento da energia armazenada nos grãos,

na forma de calor sensível, aumenta a capacidade do secador em alta temperatura, representando um ganho de cerca de 30% no volume da câmara de secagem.

Pela Tabela 8, pode-se observar que grãos com teor de umidade em 16% b.u., necessitam menores valores de vazão de ar, mantendo praticamente constante o número total de horas utilizadas para promover a secagem.

Tabela 8 – Valores de vazão mínima de ar e tempo de secagem, para redução do teor de umidade do milho até 13 % b.u.

Teor de umidade	18%b.u.				16%b.u.			
Temperatura dos grãos	20 °C		30 °C		20 °C		30 °C	
	Q min $\text{m}^3.\text{min}^{-1}.\text{t}^{-1}$	Horas	Q min $\text{m}^3.\text{min}^{-1}.\text{t}^{-1}$	horas	Q min $\text{m}^3.\text{min}^{-1}.\text{t}^{-1}$	horas	Q min $\text{m}^3.\text{min}^{-1}.\text{t}^{-1}$	horas
1994	1,05	981	0,99	984	0,99	978	0,99	975
1995	1,42	834	1,38	840	1,38	813	1,31	840
1996	0,99	978	0,99	978	0,99	969	0,99	969
1997	1,19	1029	1,19	1020	1,19	954	1,04	1029
1998	0,93	813	0,93	801	1,99	648	1,92	648
1999	2,31	648	2,31	634	0,81	807	0,81	756
2000	0,69	963	0,69	876	0,54	975	0,55	879
2001	0,81	828	0,73	831	0,69	825	0,62	828
2002	1,12	651	0,99	681	0,92	663	0,88	660
2003	2,03	429	1,99	429	1,85	429	1,81	408
2004	1,92	789	1,92	789	1,85	792	1,80	792

Com relação à temperatura de entrada dos grãos no início do processo, observa-se que temperaturas mais elevadas, reduzem a vazão mínima necessária, para, praticamente, a mesma quantidade de horas de operação.

O segundo pior valor de vazão encontrada pelo programa de simulação foi de $2,03 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}.\text{t}^{-1}$, indicando a vazão mínima de ar necessária para a secagem de milho com ar a temperatura próxima a ambiente para a região de Pedrinhas Paulista, para grãos de milho com teor de umidade de 18 % b.u. e temperatura de 20 °C. Para as mesmas condições de ar ambiente e teor de umidade dos grãos, considerando os grãos com temperatura de 30 °C, a vazão mínima de ar recomendada reduz para $1,99 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}.\text{t}^{-1}$.

Como o armazém graneleiro em estudo tem capacidade de 9.000 toneladas, a vazão total segura seria de $18.270 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$, para secagem de grãos com 18 %

e temperatura inicial de 20 °C , comparada à vazão real instalada de 2.360 m³.min⁻¹. Considerando grãos com teor de umidade inicial de 16 % b.u., pode-se utilizar uma vazão de ar de 17.910 m³.min⁻¹. A vazão instalada, com valores muito abaixo da vazão segura recomendada, coloca em risco a qualidade dos grãos, exigindo um tempo maior para complementar a secagem e expondo-os às condições propícias a deterioração.

6.7 Análise da qualidade

Para analisar a qualidade do produto, foram coletados 100 grãos de cada amostra, no início e no final do processo, para exame individual no diafanoscópio, classificando-os entre grãos trincados e grãos não trincados.

O resultado deste teste demonstrou que a totalidade dos grãos apresentou trincas, sendo todos classificados como “grãos trincados” independente das amostras serem coletadas antes ou após a secagem. Isto inviabilizou a comparação entre os resultados de início e final do processo em função da temperatura.

Uma possível causa deste resultado, seria o fato dos grãos terem origem de diversas lavouras de cooperados, colhidos das mais diferentes formas e, provavelmente, com equipamentos de colheita mal regulados.

7 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos nos testes experimentais e simulados pelos programas computacionais, pode-se chegar às seguintes conclusões:

- A metodologia de secagem combinada apresentou uma redução média de 30% no consumo total de energia, comparativamente à secagem convencional;
- O rendimento térmico e a vazão mássica de combustível, independem da metodologia de secagem utilizada;
- A secagem combinada, que utilizou o secador a alta temperatura somente na faixa de umidade elevada dos grãos, apresentou melhor eficiência energética, em relação a secagem convencional;
- A secagem a baixa temperatura apresentou gradiente de umidade de 2,1% b.u., com sobressecação nas camadas inferiores;
- A metodologia da secagem combinada promoveu um aumento médio de 29% na capacidade de secagem do secador em alta temperatura, comparado à metodologia da secagem convencional, agilizando a capacidade de recepção da unidade na mesma proporção, sem considerar o aumento da capacidade do secador, que poderá ser obtida, transformando-se a câmara de resfriamento em câmara de secagem;
- A secagem combinada provocou menor liberação de impurezas da massa de grãos nas máquinas de limpeza, após a passagem pelo secador a altas temperaturas, reduzindo a necessidade de mão-de-obra nas mesmas;

- O custo operacional de secagem combinada, considerando custos de combustível, energia elétrica e mão-de-obra, foi 22% inferior ao custo operacional da secagem convencional, para os lotes analisados, mesmo que o custo com energia elétrica tenha sido cerca de 85% maior;

- Nos modelos simulados, a região de Pedrinhas Paulista apresenta um potencial adiabático que permite a secagem do milho a baixa temperatura, com teor de umidade inicial de 18 % b.u. e 20 °C, com uma vazão mínima indicada de $2,03 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$, indicando que o sistema analisado, com vazão específica de $0,26 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$, está abaixo do mínimo recomendado, com grandes riscos de deterioração do produto antes de completar a secagem, quando as condições ambientais forem desfavoráveis.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIMILHO. **Notícias ABIMILHO**. São Paulo, 2004. Disponível em: <<http://www.abimilho.com.br/noticias/noticias2.htm>>. Acesso em: 09 jan. 2004.

ALVES, W.M. et al. 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. ; BROOKER, D. B.; HALL, C. H. **Drying cereal grain**. Westport: AVI, 1978. 265 p.

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

BIAGGIONI, M.A.M. **Análise da secagem de grãos de milho com ar em temperatura próxima à ambiente, para as condições climáticas de Botucatu-SP**. 1994. 62f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, 1994.

BIAGGIONI, M.A.M; FERREIRA, W.A. Determinações de vazões mínimas para secagem de milho, com ar a temperatura próxima à ambiente, para a região de Botucatu, SP. **Científica**, São Paulo, SP, v. 25 n. 1, p. 127-138, 1997.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanço energético nacional_2002**. Brasília, 2004. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/paginasInternas.asp?url=...BEN>>. Acesso em: 09 jan. 2004.

CLOUD, H; MOREY, V. Dryeration and In-storage cooling for corn drying. **Extension Service**. University of Minnesota. Minnesota, 1998. Disponível em:
<<http://www.extension.umn.edu/distribution/cropsystems/dc7356.html>>. Acesso em: 29 jul. 2004.

CORDEIRO, J.A.B. **Influencia da temperatura e tempo de repouso na secagem de café (*coffea arábica L.*) em camada fixa**. 1982. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, UFV, Viçosa, 1982.

DALPASQUALE, V.A. **Secagem em altas temperaturas**. Viçosa: Editora Centreinar, 1991. 29 p.

DAVIDSON, V.J.; NOBLE S.D; BROWN R.B. Effects of drying air temperature and humidity on stress cracks and breakage of maize kernels. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Londres, v. 77, n. 3, p. 303-308, 2000.

GROFF, R. Secagem de grãos: a questão energética. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE MILHO SAFRINHA, 6., 2001, Londrina. **Resumos e palestras**. Londrina: FAPEAGRO, 2001. p. 255 – 271.

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

GUNASEKARAN, S. Optimal energy management in grain drying. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, Newark, v. 25, n. 1, p. 1-48, 2002.

IBGE – **Produção agrícola municipal**. Rio de Janeiro, RJ, v. 29, p. 1-88, 2001.

LACERDA FILHO, A. F. **Avaliação de uma unidade de beneficiamento de sementes de milho**. 1998. 252 f. Tese (Doutorado em Agronomia / Energia na Agricultura). Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1998.

LASSERAN, J. C. **Aeração de grãos**. Série CENTREINAR n. 2. Viçosa: Editora Centreinar, 1981. 128 p.

LOPES, R.P et al. Consumo de energia em dois sistemas de secagem de café. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, MG, v. 26, n. 6, p. 1266-1274, 2002.

MAIER, D. E.; MONTROSS, M.D. Simulated performance of conventional high-temperature drying, dryeration, and combination drying of shelled corn with automatic conditioning. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 43, n. 3, p. 691-699, 2000.

McKENZIE, B.A . et al. **Dryeration – better corn quality with high speed drying**. Lafayette: Purdue University, 1972, 20 p.

MOREY, R.V.; CLOUD, H. A.; LUESCHEN, W.E. Practices of the efficient utilization of energy for drying corn. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 19, n. 1, p. 151-55, 1976.

MUHLBAUER, W. et al. Comparison of low-temperature wheat drying management procedures. In: **MEETING AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS**, Madison: University of Wisconsin, 1982. p. 13.

NELLIST, M. E. Modelling the performance of a cross-flow grain dryer. **Journal of Agricultural Engineering Research**. Londres, v. 37, n 1. p 43-57, 1987.

NOBLE, S.D.; BROWN, R.B.; DAVIDSON, V.J. Developmente of a maize breakage test method using a commercial food processor. **Journal of Agricultural Engineering Research**, Londres, v. 77, n. 4, p. 385-390, 2000.

OHJA, T.P. **Drying of paddy in post-harvest prevention of waste and loss of food grain**. Tóquio: Asia Productivity Organization, 1974, 375p.;

OMAF. Ontário Ministry of Agriculture and Food. **Agronomy Guide for Field Crops**. Pub.811.c3. Canadá, 2004. Disponível em: <<http://www.gov.on.ca/omafra/english/crops/pub811/p811toc3.htm>>. Acesso em: 08 jul. 2004.

PAULSEN, M.R.; GUNASEKARAN, S. Breakage resistance of corn as a function of drying rates. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 28, n. 6, p. 2071-2076, 1985.

PUZZI, D. **Abastecimento e armazenagem de grãos**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1986. 603 p.

QUEIROZ, D.M. de; PEREIRA, J.A. M.; MELO, E. de C. **Modelos matemáticos de simulação de secagem de grãos**. Viçosa: Editora Centreinar, 1986, 59 p.

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

SKAAR, C. **Water in wood**. Siracuse: Siracuse University Press, 1972. 218 p.

WEBER, E. **Armazenagem agrícola**. Porto Alegre: Kepler Weber Industrial, 1995. 400 p.