



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
FACULDADE DE AGRONOMIA “ELISEU MACIEL”
DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SEMENTES

DESEMPENHO DE SECADORES CONTÍNUOS OPERANDO EM SISTEMA INTERMITENTE

ALISSON LUIS BACH FERREIRA

Tese apresentada à Faculdade de
Agronomia “Eliseu Maciel” da
Universidade Federal de Pelotas, sob
orientação do Professor Wolmer Brod
Peres, para obtenção do Título de
Doutor em Ciências.

PELOTAS
RIO GRANDE DO SUL – BRASIL
2006

DESEMPENHO DE SECADORES CONTÍNUOS OPERANDO EM SISTEMA INTERMITENTE

ALISSON LUIS BACH FERREIRA

Engenheiro Agrícola

Comitê de Orientação:

Prof. Dr. Wolmer Brod Peres

Prof. Dr. Silmar Teichert Peske

Prof. Dr. Francisco Amaral Villela

Aprovada em:

12 de julho de 2006

Comissão examinadora:

Prof. Dr. Wolmer Brod Peres

Prof. Dr. Silmar Teichert Peske

Prof. Dr. Francisco Amaral Villela

Prof. Dr. Carlos Alberto Silveira da Luz

Prof. Dra. Adriana Maria De Grandi

**Aos meus pais, Helio e Avani, pelo
amor incondicional, amizade e
incentivo.**

DEDICO

AGRADECIMENTO

À Universidade Federal de Pelotas e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, pela oportunidade de realização do curso.

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

À direção e funcionários da Cooperativa Agrícola Consolata (COPACOL), Cooperativa Agrícola Mista São Cristóvão (CAMISC) e a Bocchi Indústria, Comércio, Transportes e Beneficiamento de Cereais Ltda, por permitirem e auxiliarem na realização deste trabalho.

Em especial, ao amigo e professor Wolmer Brod Peres, pela orientação, incentivo, dedicação, confiança e participação na execução deste trabalho e apoio constante.

Ao professor Silmar Teichert Peske, pela amizade, apoio, valiosos ensinamentos e conselhos.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Sementes, pelos conhecimentos transmitidos.

Aos funcionários do Laboratório Didático de Sementes Silvio, Maria Alice, Irene e ao secretário Antonio Bandeira, pela colaboração em diversas etapas do curso de pós-graduação.

Ao professor da Faculdade de Engenharia Agrícola Alfredo Mendes d'Ávila, pela amizade.

Ao secretário da Faculdade de Engenharia Agrícola José Luiz Carvalho da Silva, pela dedicação, amizade e cooperação em todos os anos de estudo.

Aos alunos da Faculdade de Engenharia Agrícola Rogério Marin e Flávio Tomiello, pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas e amigos Denise Meza de Miranda, Elias Abraão Jacob Junior e Helen Lucia da Cruz, pelo apoio, incentivo e momentos de descontração.

Aos colegas do curso de pós-graduação, em especial, Rafael Christi, Hilton Grimm, Geri Meneghello e Cristine Saravia, pela ajuda, amizade, idéias e incentivo.

À minha namorada Marilvana Giacomelli Tavares, pelo amor, carinho, incentivo, companheirismo e paciência.

Ao amigo de infância Fábio Gonçalves Faria, pelo apoio, incentivo e agradável convivência “quase” diária.

Aos amigos Fabrício Lucena, Roger Pereira e André Vasconcelos, pelo apoio e amizade.

Ao meu sobrinho Miguel Ferreira Aguiar, por me dar uma nova perspectiva da vida.

Ao meu afilhado Daniel Moraes, por me proporcionar muitos momentos divertidos.

Aos meus familiares, amigos, professores e a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, aqui não citados, porém não esquecidos.

BIOGRAFIA

ALISSON LUIS BACH FERREIRA, filho de Helio Ferreira e Avani Maria Bach Ferreira, nasceu em Pelotas, estado do Rio Grande do Sul, em 25 de agosto de 1976.

Em 1996, iniciou o Curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Pelotas, graduando-se em fevereiro de 2001.

Em março de 2001, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, na área de Pré-Processamento e Armazenagem de Produtos Agrícolas, defendendo a dissertação em março de 2003.

Em março de 2003, iniciou o curso de Doutorado em Ciência e Tecnologia de Sementes, Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel” na Universidade Federal de Pelotas, submetendo-se à defesa de tese, requisito indispensável para obtenção do título de Doutor em Ciências, em julho de 2006.

CONTEÚDO

LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	xi
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Considerações gerais.....	3
2.2. Secagem e secadores.....	4
2.3. Energia nos sistemas de secagem.....	7
2.4. Vazão de ar.....	9
2.5. Qualidade do produto.....	10
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	13
3.1. Sistemas de secagem.....	14
3.1.1. Secador A.....	14
3.1.2. Secador B.....	15
3.1.3. Secador C.....	15
3.1.4. Secador D.....	16
3.1.5. Secador E.....	17
3.2. Avaliação energética dos sistemas de secagem.....	17
3.2.1. Energia requerida pela movimentação do ar de secagem.....	18
3.2.2. Energia requerida pelo sistema de aquecimento do ar.....	18
3.3. Instrumentação.....	19

3.3.1. Temperatura.....	19
3.3.2. Vazão de ar.....	21
3.4. Amostragens.....	22
3.5. Umidade do produto.....	23
3.6. Qualidade do produto.....	24
3.7. Procedimento experimental.....	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
4.1. Desempenho dos secadores.....	27
4.2. Características do ar observadas durante os procedimentos experimentais.....	30
4.3. Variação da umidade do produto em função do tempo.....	32
4.4. Variação da temperatura do ar de secagem.....	35
4.5. Consumo de combustível.....	38
4.6. Potência instalada e energia elétrica consumida.....	39
4.7. Entalpia específica.....	41
4.8. Vazão de ar.....	44
4.9. Qualidade física do produto.....	44
4.10. Temperatura da massa do produto.....	46
4.10. Considerações gerais.....	47
5. CONCLUSÕES.....	49
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
APÊNDICES.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Desempenho dos secadores A, B, C, D e E.....	28
Tabela 2 - Capacidade operacional de secagem, capacidade de secagem declarada e capacidade estática para os secadores A, B, C, D e E.....	29
Tabela 3 - Temperaturas médias do ar de secagem e ambiente, umidades relativas médias do ar de secagem e ambiente para os experimentos realizados com os secadores A, B, C, D e E.....	31
Tabela 4 – Consumo horário, consumo total de combustível e a energia total consumida por experimento, para os secadores A, B, C, D e E.....	38
Tabela 5 – Potência instalada em motores elétricos de indução, demanda de energia elétrica horária e total e energia total consumida para os secadores A, B, C, D e E.....	40
Tabela 6 - Vazão total e vazão específica de ar para os secadores A, B, C, D e E.....	44
Tabela 7 – Porcentagem de grãos trincados e quebrados, antes e após o processo de secagem.....	45
Tabela 8 – Temperaturas médias e máximas alcançadas pela massa do produto durante o processo de secagem.....	47
Tabela 9 – Resultados obtidos experimentalmente com secador A.....	54
Tabela 10 – Resultados obtidos experimentalmente com secador B.....	55

Tabela 11 – Resultados obtidos experimentalmente com secador C.....	56
Tabela 12 – Resultados obtidos experimentalmente com secador D.....	57
Tabela 13 – Resultados obtidos experimentalmente com secador E.....	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Determinação das dimensões da pilha para avaliação do consumo de combustível (altura x largura x comprimento).....	19
Figura 2 – Psicrômetro de ventilação forçada.....	20
Figura 3 – Software GRAPSI versão 4.0.....	20
Figura 4 - Pontos de medição de velocidade do ar na saída dos ventiladores.....	22
Figura 5 – a) Janela de inspeção; b) sistema de eclusas rotativas.....	22
Figura 6 – Amostragem no transportador helicoidal inferior.....	23
Figura 7 – Determinador de umidade capacitivo Burrows.....	24
Figura 8 - Teste de coloração com tintura de iodo.....	25
Figura 9 - Exemplos de danos mecânicos encontrados no produto.....	25
Figura 10 - Variação da umidade do produto em função do tempo para o secador A.....	32
Figura 11 - Variação da umidade do produto em função do tempo para o secador B.....	33
Figura 12 - Variação da umidade do produto em função do tempo para o secador C.....	33
Figura 13 - Variação da umidade do produto em função do tempo para o secador D.....	34
Figura 14 - Variação da umidade do produto em função do tempo para o secador E.....	34

Figura 15 - Variação da temperatura do ar de secagem em função do tempo, para os três experimentos, secador A.....	35
Figura 16 - Variação da temperatura do ar de secagem em função do tempo, para os três experimentos, secador B.....	36
Figura 17 - Variação da temperatura do ar de secagem em função do tempo, para os três experimentos, secador C.....	36
Figura 18 - Variação da temperatura do ar de secagem em função do tempo, para os três experimentos, secador D.....	37
Figura 19 - Variação da temperatura do ar de secagem em função do tempo, para os três experimentos, secador E.....	37
Figura 20 - Entalpia específica para os três experimentos do secador A...	41
Figura 21 - Entalpia específica para os três experimentos do secador B...	42
Figura 22 - Entalpia específica para os três experimentos do secador C...	42
Figura 23 - Entalpia específica para os três experimentos do secador D...	43
Figura 24 - Entalpia específica para os três experimentos do secador E...	43

RESUMO

FERREIRA, Alisson Luís Bach, D.S., Universidade Federal de Pelotas, Julho de 2006. **Desempenho de Secadores Contínuos Operando em Sistema Intermitente.** Orientador: Wolmer Brod Peres.

O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho de cinco secadores contínuos, de diferentes fabricantes, operando em sistema intermitente e secando milho. Foram realizados três testes em cada secador e os resultados de cada teste foram analisados independentemente e comparados como um experimento, uma vez que cada teste não caracteriza uma repetição. A umidade inicial do produto foi diferente para cada teste realizado. Para avaliação da qualidade física do produto foi realizado o teste de coloração com tintura de iodo. Para avaliação da eficiência energética do sistema, mediu-se o consumo de combustível e de energia elétrica. Levando em consideração as condições em que foram realizados os testes, foi possível observar que a velocidade de secagem de sementes de milho em secadores contínuos operando em sistema intermitente pode atingir dois a três pontos percentuais por hora, com o emprego de temperaturas do ar de secagem de 80 a 120 °C; a qualidade física do produto secado em secadores cujas temperaturas de secagem sofreram maiores variações, é inferior relativamente a do produto submetido à secagem com menores variações de temperatura.

Palavras-chave: secagem, milho, qualidade.

ABSTRACT

FERREIRA, Alisson Luís Bach, D.S., Universidade Federal Pelotas, July 2006.
Performance of Continuous Dryers Operating in an Intermittent System
Adviser: Wolmer Brod Peres.

The objective of this study was to evaluate the performance of five continuous dryers, of different manufacturers, operating in an intermittent system and drying maize. Three tests in each dryer were carried out and the results of each test were analyzed independently and compared as an experiment, since each test does not characterize a repetition. The initial moisture of the product was different for each test performed. For the evaluation of the physical quality of the product, the iodine coloration drying test was used. To evaluate the energy efficiency of the system, the consumption of both fuel and electric power was measured. Taking into account the conditions in which the tests were realized, it was possible to observe that the drying speed of the maize seeds in continuous dryers operating in an intermittent system may range from two to three percent points per hour, at drying air temperatures ranging from 80 °C to 120 °C; the physical quality of the product, dried in dryers whose drying temperatures suffered variations in a higher level, is relatively inferior to that of the product submitted to drying at lower levels of temperature variation.

Keywords: drying, maize, quality

1. INTRODUÇÃO

Em geral, as sementes na maturidade fisiológica apresentam máximo poder germinativo, vigor e matéria seca e, as de milho atingem este estágio com umidade entre 30 e 35%.

Produto mantido no campo, após a maturidade fisiológica, absorve ou perde água até entrar em equilíbrio higroscópico com o ambiente. Este equilíbrio depende da temperatura e da umidade relativa do ar, assim como da natureza de cada produto. Sementes ricas em óleo possuem menor umidade de equilíbrio em relação às amiláceas, nas mesmas condições de temperatura e de umidade relativa do ar.

O produto pode ser seco no campo, mas esta técnica apresenta inconvenientes com relação à qualidade do produto. Um tempo maior de exposição do produto no campo pode gerar perdas elevadas, inviabilizando economicamente uma lavoura. Portanto, a colheita deve ser realizada assim que for possível, para posterior secagem artificial do produto, se necessária.

Muitas técnicas são empregadas na secagem de produtos agrícolas, dependendo da finalidade e do produto a ser seco. Avanços vêm ocorrendo na evolução destas técnicas, principalmente com relação à energia utilizada no processo e à qualidade final do produto. Nossos antepassados já sabiam da importância de secar produtos agrícolas, entretanto, aplicavam técnicas rudimentares para a realização desta operação. Os processos empregados eram demorados ou danificavam as sementes, combinados ainda a um longo

tempo de exposição no campo, o que resultava em um produto de baixa qualidade.

O processo de secagem permite antecipar a colheita, minimizando perdas e danos ocorridos no campo, proporcionando armazenagem segura do produto e por longos períodos, diminuindo o desenvolvimento de microorganismos e insetos, reduzindo as perdas na germinação e vigor durante a armazenagem.

Os secadores de grãos e sementes disponíveis no mercado apresentam um elevado nível de tecnologia, alguns dispõem de sistemas de carregamento automático de combustível, controle automático do sistema de mistura de ar, medidores de umidade do produto em fluxo no secador e elaborados painéis de controle. Produtores, cooperativas e empresas do ramo agrícola vêm investindo na aquisição de equipamentos para secagem de produtos agrícolas, mas para realizar um investimento deste porte é necessário conhecer alguns parâmetros, como, rendimento do secador, eficiência térmica, e qualidade do produto após a secagem.

Este trabalho teve por objetivo avaliar o desempenho de secadores contínuos, operando em no sistema intermitente, secando milho em diferentes locais, em diferentes empresas e de diferentes fabricantes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Considerações gerais

Os produtos agrícolas podem ser classificados em dois grupos com relação às perdas de pós-colheita. Sementes e grãos são classificados como deterioráveis, já que a velocidade de deterioração pode ser considerada lenta, se comparada aos perecíveis, produtos estes que deterioram com maior velocidade. Estas diferenças implicam no uso de técnicas distintas para a conservação destes produtos.

As operações de pós-colheita e pré-condicionamento de sementes e grãos constituem etapas indispensáveis ao sistema de produção por disporem de tratamentos que proporcionam ao produto a preservação das suas características naturais e o seu preparo para uma armazenagem segura, garantindo a longevidade de tais características até o momento de sua utilização (LACERDA FILHO, 1998).

A umidade adequada para a colheita de sementes e grãos é mais elevada que a indicada para o armazenamento e beneficiamento, por isso é necessária à utilização de secagem artificial. A manutenção das propriedades químicas, físicas e biológicas do produto, bem como sua finalidade, indicará qual a característica necessária da qualidade que deverá ser conservada. Dessa forma, é a manutenção da qualidade que dita as técnicas empregadas no processo de secagem (FERREIRA, 2003).

Além de ser o processo mais utilizado para possibilitar a preservação da qualidade dos produtos agrícolas, a secagem pode ser vista, também, como a operação que permite obter sementes de melhor qualidade, possibilitando colheitas antecipadas, além de evitar as deteriorações que poderiam ocorrer no campo (TOLEDO e MARCOS FILHO, 1977; ROSSI e ROA, 1980).

Sob o ponto de vista tecnológico, o beneficiamento de sementes envolve praticamente as mesmas operações aplicadas ao processamento de grãos. Entretanto, a metodologia de utilização desses processos deve apresentar conceitos diferentes daqueles, pelo fato das sementes serem sistemas biológicos, cuja viabilidade deve ser preservada, exigindo-se, portanto, maiores cuidados na seleção dos sistemas operacionais e dos equipamentos de manejo (LACERDA FILHO, 1998).

2.2. Secagem e secadores

O processo de secagem consiste na transferência simultânea de energia e massa. O ar, ao mesmo tempo em que fornece energia ao produto, absorve água do mesmo, na forma de vapor. A energia despendida para evaporação da água é acompanhada pelo resfriamento do ar. Contudo, o ar absorve massa na forma de vapor, compensando o dispêndio energético na forma de calor, caracterizando o processo isoentálpico (MILMAN, 2002).

O processo de secagem visa à retirada parcial da água da semente, por meio do fluxo de vapor de água, da semente para o ar. É um processo dinâmico, em função da umidade relativa do ar (PESKE e VILLELA, 2003; VILLELA e PERES, 2004).

Na seqüência de colheita, secagem, armazenagem, manuseio e transporte, a secagem é a operação crítica, conforme afirmaram Brooker et al. (1992). Eles consideraram que se inadequada, a secagem constitui a principal causa de deterioração de sementes.

Na secagem, o ar é usado para transportar a umidade das sementes para fora do sistema. O ar forçado e quente serve para aquecer as sementes fazendo com que a umidade interna migre para a superfície externa destas e seja evaporada da periferia, para assim diminuir a umidade da massa de

sementes que está sendo secada (BAUDET et al., 1999; PESKE e VILLELA, 2003; PERES, 2001).

Os métodos de secagem podem ser divididos em naturais, que utilizam a energia solar e eólica, e artificiais, que podem ser estacionário, contínuo, intermitente ou combinados. Os métodos naturais de secagem dependem de condições climáticas favoráveis, sobre as quais não se pode ter controle; por isso, são limitados e pouco utilizados (ELIAS, 2000; BARBOSA, 2002).

Os métodos de secagem obtidos pela exposição das sementes, em um secador, a um fluxo de ar aquecido, ou não, podem ser divididos, conforme o fluxo das sementes no secador, em estacionário e de fluxo contínuo, podendo este último ser contínuo ou intermitente (VILLELA e PERES, 2004).

Secadores contínuos podem ser operados no sistema contínuo, ou seja, o produto úmido entra no secador, se desloca na torre de secagem e com apenas uma passagem por esta, é descarregado. Dessa forma, há um fluxo constante de produto no seu interior, ocorrendo simultaneamente, grãos úmidos entrando no secador, grãos em pleno processo de secagem e grãos secos sendo descarregados. Este mesmo secador pode ser operado também na forma intermitente, que consiste na circulação do produto pelo sistema secador-elevador, fazendo o produto passar mais de uma vez pela torre de secagem até atingir a umidade final desejada. Durante ambos os processos de operação, contínuo e intermitente, o secador pode trabalhar com a coluna inteira secando ou parte secando e outra resfriando o produto (FERREIRA, 2005).

De modo geral, os secadores contínuos não são recomendados para a secagem de sementes, porém admite-se essa possibilidade desde que se proceda a determinadas modificações, tais como, o aumento do número de passagens e da velocidade de fluxo da massa de sementes através da câmara de secagem (AGUIRRE e PESKE, 1992). Estas modificações tornam-se necessárias, visto que na secagem contínua a manutenção de temperaturas e fluxos de ar elevados promove rápida remoção da água das sementes e, como consequência, pode provocar fissuras e afetar negativamente a qualidade fisiológica das sementes, particularmente durante o período de armazenamento (VILLELA e PESKE, 1996).

No processo de secagem, a temperatura alcançada pela semente e o tempo de exposição a essa temperatura são os fatores que mais influenciam na qualidade do produto. Dependendo do método de secagem é fundamental que a temperatura da massa de sementes seja mantida dentro de limites seguros (VILLELA e PESKE, 1996).

Um sistema de secagem contínuo, com fluxo de ar aquecido através das duas câmaras do secador e passagem das sementes diversas vezes pelo conjunto secador-elevador, poderá constituir-se numa opção capaz de reduzir custos operacionais, pela possibilidade de diminuir o tempo de secagem e a energia consumida (MOTTA et al., 1999).

Os principais parâmetros de secagem associados à qualidade das sementes são temperatura, umidade relativa, vazão de ar, tempo de residência do produto na câmara de secagem e os teores de água inicial e final do produto. Verificou que, em geral, as recomendações para a secagem de sementes têm sido sugeridas, sem considerar as variações de umidade relativa do ar ambiente durante o dia, a época do ano e o local de execução, resultando em diferentes condições de secagem para a mesma temperatura (BORÉM, 1992).

Segundo Baudet et al. (1999), a temperatura de secagem deve ter como referência a temperatura da massa das sementes; assim, valores entre 40 e 43°C são considerados máximos e, acima dos quais, danos físicos ou fisiológicos podem ser gerados.

Brooker et al. (1992) afirmaram que a temperatura máxima de exposição das sementes depende de sua umidade e do tempo de exposição à temperatura aplicada. Citaram os resultados de Nellist, segundo os quais as sementes de milho com 18% podem ser secadas em silos à temperatura de 67°C; com 26% podem ser secadas a 59°C. Informaram que estas temperaturas são consideradas altas para as referências entre 38 e 43°C, comumente recomendadas por Copeland e McDonald (1985). Verificaram que as sementes de milho com 32%, secadas à temperatura de 65°C, mantiveram a viabilidade de 90%, quando a exposição durou 5 minutos e 20% em 9 minutos. Comentaram que os sistemas operando em altas temperaturas, para curtos períodos de duração, podem ser adequados à secagem deste tipo de produto, sem afetar sua viabilidade.

A operação de sistemas de secagem exige do operador treinamento e nível de conhecimento das características do equipamento e do produto a ser seco. É o operador que controla quantidade de combustível e conseqüentemente a temperatura de secagem, fator este que pode ser decisivo na eficiência do sistema e na qualidade do produto (FERREIRA, 2005).

2.3. Energia nos sistemas de secagem

Hall, citado por Bakker-Arkema et al. (1978), definiu três expressões para a eficiência de energia nos processos de secagem, ou seja, eficiência de combustível, eficiência térmica e eficiência de secagem. A eficiência de combustível é a razão entre a energia utilizada na evaporação da água e a energia fornecida ao sistema. A energia total corresponde à soma de energia para aquecer o ar, operar o secador, resfriar e movimentar o produto, a partir de determinadas condições iniciais. A eficiência térmica é a razão entre o calor utilizado na secagem e o calor fornecido, relacionando-se apenas o processo térmico.

Eficiência energética é expressa pela razão entre a energia requerida para evaporar a água do produto e a quantidade de energia fornecida ao sistema. A energia fornecida ao sistema inclui a energia para o aquecimento do ar e a energia elétrica utilizada. Os gastos com energia para secagem, movimentação do ar e do produto são parâmetros que devem ser analisados com profundidade, pois se não forem satisfatórios, podem inviabilizar financeiramente um projeto (FERREIRA, 2005).

Para o aquecimento do ar durante o processo de secagem, pode ser utilizada qualquer fonte de calor. A praticidade, o potencial energético, a disponibilidade e o custo são o que normalmente definem o que utilizar. Há que se considerar também as eficiências técnica e econômica, os efeitos sobre o meio ambiente, o domínio tecnológico do processo e o produto, bem como o efeito sobre a qualidade do produto secado e o conforto aos operadores dos equipamentos (ELIAS, 1999; BARBOSA, 2002).

Geralmente, para aquecimento do ar de secagem são utilizados combustíveis sólidos, mas já existem no mercado de secadores algumas opções que utilizam gás liquefeito de petróleo (GLP), em substituição à lenha ou resíduos agrícolas, porém sua utilização está ligada ao custo e disponibilidade.

Segundo Lopes et al. (2000), quando se utiliza a lenha na forma de tora com grande diâmetro em uma fornalha, há necessidade de maior quantidade de ar. Assim, para facilitar a combustão, a lenha deve ter seu tamanho reduzido. A eficiência de combustão aumenta com o aumento da área superficial do combustível e com o contato oxigênio combustível. As fornalhas de grelha destinadas à queima de lenha podem ser classificadas, de acordo com o aproveitamento dos gases da combustão, em fornalhas com aquecimento direto e fornalhas com trocador de calor ou de aquecimento indireto.

Pesquisando a variação do teor de água da madeira roliça de eucalipto estocada em pátios industriais, Ferreira et al. (1983) concluíram que existe uma variação no teor de água da madeira ao longo da altura das pilhas, sendo maior, quanto mais próxima ao solo. A madeira situada na parte superior das pilhas seca mais rapidamente quando comparada a situada nas camadas mais baixas.

Segundo Silva et al., citado por Gatto et al. (2003), comparando a biomassa de diferentes espécies para a produção de energia, encontraram para o *Eucalyptus viminalis* com umidade de 12%, um poder calorífico de 4.691 kcal.kg⁻¹ para a madeira e 3.495 kcal.kg⁻¹ para casca.

Segundo Weber (1995), o poder calorífico da lenha de eucalipto, considerando a madeira com umidade de 30%, pode variar de 2800 a 3340 kcal.kg⁻¹, conforme a espécie.

Estudando as características da lenha produzida no Rio Grande do Sul, Gatto et al. (2003) afirmaram que massa específica da lenha apresentou valores próximos de 440 kg.m⁻³ para eucalipto e 460 kg.m⁻³ para nativas, o que as inclui entre as madeiras levemente densas.

Temperaturas de secagem excessivamente baixas podem não aproveitar todo o potencial técnico do secador, resultando em maior tempo de secagem do produto e maior consumo de energia. Temperaturas de secagem

mais elevadas sugerem menor demanda de energia para evaporar uma unidade de massa de água do produto, isto é, o secador é mais eficiente energeticamente nessas condições. Mas excessivas temperaturas podem causar danos mecânicos e diminuição da germinação de produtos destinados à semente (FERREIRA, 2005).

Bakker-Arkema et al. (1978), recomendaram que os seguintes parâmetros e especificações devem ser considerados na avaliação do desempenho de secadores:

- a) na entrada do secador: teor de água, tipo e temperatura dos grãos; razão de umidade e temperatura do ar; grãos quebrados e material estranho;
- b) na saída do secador: teor de água (máxima, mínima e média) e temperatura média dos grãos, grãos quebrados e material estranho;
- c) no secador: fluxo de grãos, vazão de ar, temperatura e razão de umidade do ar e pressão estática; e
- d) energia necessária para aquecer o ar e para proporcionar a movimentação do ar e do produto.

Utilizando a metodologia descrita por Bakker-Arkema et al. (1978), Silva (1980) avaliou sistemas automáticos de secagem para milho, em lotes e em fluxos contra-correntes, e obteve eficiências de secagem de 6.584 e 4.699 kJ.kg^{-1} de água evaporada, respectivamente.

Estudando sistemas de secagem em fluxos cruzados, com reversão no fluxo de ar, durante a secagem de milho, Sabione (1986) obteve a eficiência de 5.607,9 kJ.kg^{-1} de água evaporada.

2.4. Vazão de ar

Existem duas maneiras para reduzir o tempo consumido na secagem de produtos agrícolas: a) aumentando-se a temperatura do ar de secagem, a capacidade do ar em absorver água é aumentada, isto é, aumenta-se o seu potencial de secagem; b) aumentando a vazão de ar que passa através do produto, aumenta-se a quantidade de água evaporada, ou seja, a velocidade de secagem, até certo ponto, é proporcional ao fluxo de ar (SILVA et al., 2000).

A vazão é uma grandeza análoga à intensidade de corrente em eletricidade. Podendo ser definida como a quantidade de fluído conduzido por unidade de tempo no circuito, ou como o volume de ar transportado por unidade de tempo, normalmente expresso em $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

Segundo Lasserran (1981) vazão específica, expressa em m^3 de ar por hora e por m^3 de grão ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^3$), é a relação da vazão total de ar, por hora, com o volume total de uma célula, coloca-se em evidência uma relação que traduz a quantidade total de ar que atravessa em uma hora 1m^3 de grãos.

A quantidade de ar utilizada na secagem é um fator de grande importância a ser observado, já que o ar aquecido é o elemento que transporta a umidade dos grãos para a parte externa do secador. Portanto, se o secador não apresentar quantidade suficiente de ar na secagem, esta poderá ser realizada de forma deficiente, aumentando o tempo e o custo da secagem.

As curvas características de ventiladores são possíveis de serem obtidas somente a partir de ensaios experimentais, onde são determinados os valores de vazão do fluido, pressão estática, potência demandada para uma determinada vazão e eficiência. Para tanto os equipamentos devem ser montados em bancadas de testes apropriadas e operados sob determinadas condições ambientes específicas tomadas como referência.

Segundo Silva et al. (2000), a Air Moving and Condition Association (AMCA) padronizou os testes para caracterização de ventiladores. O teste consiste em um duto conectado ao ventilador, com comprimento dez vezes maior que seu diâmetro. Na outra extremidade deste duto, uma válvula cônica serve para regular a resistência ao escoamento do ar, permitindo a variação da vazão. Então, a vazão é medida de forma indireta através da determinação da pressão por um tubo de pitot e manômetro.

2.5. Qualidade do produto

A produção de sementes de qualidade é muito importante dentro do processo de produção agrícola, pois se bem executada permite obter estande uniforme e boa distribuição de plantas na lavoura.

Sementes e grãos expostos no campo absorvem ou perdem água, até entrar em equilíbrio com o ambiente. Este equilíbrio depende da temperatura e da umidade relativa do ar, assim como da natureza do produto. Grãos e sementes ricos em óleos possuem menor teor de água de equilíbrio em relação aos amiláceos, nas mesmas condições de temperatura e de umidade relativa do ar. O produto pode ser seco no campo, mas esta técnica apresenta inconvenientes com relação à qualidade do produto. Um tempo maior de exposição do produto no campo pode gerar perdas elevadas (FERREIRA, 2005).

A permanência do produto com elevado teor de água, durante o período compreendido entre a colheita e a secagem artificial, contribui para o processo de deterioração devido à elevada atividade metabólica que, além de consumir as substâncias de reserva, libera energia e água favorecendo o desenvolvimento de microorganismos e insetos (PESKE e VILLELA, 2003).

A utilização de temperaturas elevadas permite uma secagem mais rápida; porém, poderá provocar uma diferença de umidade muito grande entre a periferia e o centro da semente, gerando um gradiente de pressão que causa o trincamento, principalmente em sementes de milho e arroz (PESKE e VILLELA, 2003).

Devido à perda de umidade, as células superficiais do endosperma contraem-se mais que as do seu interior durante o processo de secagem. Tensões geradas nesta superfície induzem o efeito compressivo no interior do grão. Quando esta tensão, induzida pelo estresse provocado pelo gradiente de umidade, for superior ao esforço suportado pelo grão, ocorrem trincas (SARKER et al., 1996).

Secando sementes de arroz com temperatura do ar de 70 °C, Luz (1986) verificou que a velocidade de secagem das sementes de 21 a 12% é praticamente constante, retirando ao redor de 1,8% de umidade por hora de secagem e não afetando a qualidade fisiológica das sementes.

Segundo Brooker et al. (1992), a viabilidade das sementes é definida como a capacidade que elas têm de desenvolver uma nova planta, em condições favoráveis e sem os efeitos de dormência. A secagem excessiva, em alta temperatura, reduz a viabilidade devido à degradação das enzimas, das proteínas do embrião e hidrólise do amido embrionário. Afirmaram que, durante

o processo de secagem, a temperatura das sementes é, freqüentemente, considerada menor que a do ar. Particularmente, isto é evidente nos secadores de fluxos concorrentes. Neste tipo de secador, as sementes com alto teor de água mantêm a viabilidade em relação àquelas com baixo teor, em virtude da alta taxa de evaporação da água das sementes baixar a temperatura que o material atingiria.

Sementes de milho fissuradas possuem menor potencial de armazenamento e danos mecânicos mesmo muito pequenos são capazes de reduzir a germinação em cerca de um a dois pontos percentuais (CARVALHO, 2001).

Borém (1992) informou que Gunasekaram e Paulsen, avaliaram os efeitos da remoção de água sobre a resistência à quebra, em dois genótipos de milho, por meio de testes de susceptibilidade à quebra e testes de compressão quase estática. Utilizando temperaturas, no ar de secagem, de 20; 35; 50 e 60°C e fluxo de ar de 2 m³.min.t, em camadas de milho com espessura de 0,15m, concluíram que a porcentagem de grãos trincados e a susceptibilidade à quebra aumentaram com a elevação da temperatura e com o aumento da taxa de secagem, sendo significativa a diferença de susceptibilidade à quebra entre os dois genótipos.

Fortes e Okos (1980) estudando os efeitos da temperatura, na faixa entre 32 e 150°C, sobre o volume, a densidade e a tendência à quebra de grãos de milho, mostraram que a intensidade de quebra é reduzida a partir de teores de água inferiores a 17,5%, para todas as condições de secagem. Observaram ainda, que o fenômeno ocorre porque os grãos tornam-se mais frágeis quando o teor de água é maior que o indicado, independentemente das condições de secagem.

O armazenamento de sementes com alto grau de umidade sempre resulta na redução da porcentagem de germinação, sendo que o grau de umidade ideal é variável entre as espécies. Assim, se para sementes de soja 13% é marginal, para o armazenamento de sementes de milho é o grau de umidade recomendado (BAUDET, 2003).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho, foram analisados secadores contínuos de cinco fabricantes, operando em sistema intermitente, secando milho em diferentes locais e em diferentes empresas. Portanto, os resultados encontrados podem ser diferentes daqueles informados pelos fabricantes, em função de temperaturas e umidades relativas do ar nos locais onde foram realizados os testes, bem como a qualidade e características do produto utilizado, dentre elas a umidade inicial e a natureza do produto.

Para avaliação foram realizados três testes de secagem para cada secador, os resultados experimentais de cada teste foram analisados independentemente, uma vez que cada um não caracteriza uma repetição. Dessa forma, os seguintes parâmetros e especificações foram considerados na avaliação do desempenho dos secadores:

- a) na entrada do secador: teor de água, temperatura do produto, razão de umidade e temperatura do ar e produto quebrado;
- b) na saída do secador: teor de água (máximo, mínimo e médio) e temperatura média do produto e produto quebrado;
- c) no secador: fluxo de produto, vazão de ar, temperatura e razão de umidade do ar e pressão estática; e
- d) energia necessária para aquecer o ar e para proporcionar a movimentação do ar e do produto

3.1. Sistemas de secagem

Embora todos os secadores testados tivessem características de operação de fluxo contínuo, o produto estava sendo seco em um sistema intermitente, circulando entre secador-elevador.

Para fins de cálculo da capacidade estática de cada secador, considerou-se o produto com massa específica granular de 700 kg.m^{-3} .

3.1.1. Secador A

Descrição do sistema de secagem: secador contínuo com capacidade de secagem declarada pelo fabricante de 100 ton.h^{-1} , sem sistema de captação de pó, instalado na Cooperativa Agrícola Consolata (Copacol), no município de Jotaesse – PR.

Sistema de movimentação do ar: três ventiladores axiais, com diâmetro do rotor de 1100mm e 12 pás, posicionados na parte frontal superior do secador, acionados por acoplamento direto ao eixo do motor de indução, com potência de 25 cv e 1760rpm.

Sistema de descarga: realizada por 26 eclusas rotativas, acionadas por motor de indução, com potência 2 cv, com velocidade controlada por variador de frequência e acoplado a um redutor de velocidade.

Sistema de aquecimento do ar: fornalha de fogo direto utilizando lenha como combustível, construída em alvenaria, isolamento por tijolos refratários, com área total de grelha para queima do combustível de 14 m^2 e sem ciclones.

Volume e Capacidade:

Volume total: $292,13 \text{ m}^3$

Volume de grãos total: $237,6 \text{ m}^3$

Capacidade estática total: 166,32 toneladas.

3.1.2. Secador B

Descrição do sistema de secagem: secador contínuo com capacidade de secagem declarada pelo fabricante de 60 ton.h^{-1} , com sistema de captação de pó, instalado na Cooperativa Agrícola Consolata (Copacol), no município de Nova Aurora – PR.

Sistema de movimentação do ar: dois ventiladores axiais, com diâmetro do rotor de 1100mm e 12 pás, posicionados na parte frontal superior do secador, acionados por acoplamento direto ao eixo do motor de indução, com potência de 25 cv e 1760rpm.

Sistema de descarga: realizada por 22 eclusas rotativas, acionadas por motor de indução, com potência 2 cv, com velocidade controlada por variador de frequência e acoplado a um redutor de velocidade.

Sistema de aquecimento do ar: fornalha de fogo direto utilizando lenha como combustível, construída em alvenaria, isolamento por tijolos refratários, com área total de grelha para queima do combustível de $10,5 \text{ m}^2$ e sem ciclones.

Volume e Capacidade:

Volume total: $190,36 \text{ m}^3$

Volume de grãos total: $156,12 \text{ m}^3$

Capacidade estática total: 109,28 toneladas.

3.1.3. Secador C

Descrição do sistema de secagem: secador contínuo com capacidade de secagem declarada pelo fabricante de 120 ton.h^{-1} , com sistema de captação de pó, instalado na Cooperativa Agrícola Consolata (Copacol), no município de Nova Aurora – PR.

Sistema de movimentação do ar: dois ventiladores centrífugos de dupla aspiração, com diâmetro do rotor de 1120mm, posicionados na parte inferior do secador, acionados por polias e correias acoplados a motores de indução, com potência de 30 cv e 1765rpm.

Sistema de descarga: realizada por bandejas com acionamento pneumático.

Sistema de aquecimento do ar: fornalha de fogo direto utilizando lenha como combustível, construída em chapas metálicas e alvenaria, isolamento por tijolos refratários, com área total de grelha para queima do combustível de 8,2 m² e sem ciclones.

Volume e Capacidade:

Volume total: 265,79 m³

Volume de grãos total: 228,42 m³

Capacidade estática total: 159,89 toneladas.

3.1.4. Secador D

Descrição do sistema de secagem: secador contínuo com capacidade de secagem declarada pelo fabricante de 120 ton.h⁻¹, com sistema de captação de pó, instalado na Cooperativa Agrícola Mista São Cristóvão (Camisc), no município de Mariópolis – PR.

Sistema de movimentação do ar: três ventiladores axiais, com diâmetro do rotor de 1150 mm e 12 pás, posicionados na parte frontal inferior do secador, acionados por acoplamento direto ao eixo do motor de indução, com potência de 30 cv e 1760rpm.

Sistema de descarga: realizada por 13 eclusas rotativas, acionadas por motor de indução, com potência 2 cv, com velocidade controlada por polia de diâmetro variável e acoplado a um redutor de velocidade.

Sistema de aquecimento do ar: fornalha de fogo direto utilizando lenha como combustível, construída em chapas metálica, isolamento por tijolos refratários e terra, com área total de grelha para queima do combustível de 14,2 m² e com ciclones.

Volume e Capacidade:

Volume total: 295,99 m³

Volume de grãos total: 253,81 m³

Capacidade estática total: 177,68 toneladas

3.1.5. Secador E

Descrição do sistema de secagem: secador contínuo com capacidade de secagem declarada pelo fabricante de 120 ton.h^{-1} , sem sistema de captação de pó, instalado na BOCCHI Indústria, Comércio, Transportes e Beneficiamento de Cereais Ltda, no município de Muitos Capões – RS.

Sistema de movimentação do ar: três ventiladores axiais, posicionados na parte superior do secador, acionados por acoplamento direto ao eixo do motor de indução, com potência de 40 cv e 1760rpm.

Sistema de descarga: realizada por 18 eclusas rotativas, acionadas por motor de indução, com potência 2 cv, com velocidade controlada por variador de frequência e acoplado a um redutor de velocidade.

Sistema de aquecimento do ar: fornalha de fogo direto utilizando lenha como combustível, construída em alvenaria, isolamento por tijolos refratários, com área total de grelha para queima do combustível de $12,9 \text{ m}^2$ e com ciclones.

Volume e Capacidade:

Volume total: $242,02 \text{ m}^3$

Volume de grãos total: $204,25 \text{ m}^3$

Capacidade estática total: 142,97 toneladas.

3.2. Avaliação energética dos sistemas de secagem

Para a avaliação energética do sistema de secagem foram consideradas as energias necessárias para a movimentação e aquecimento do ar.

A avaliação do sistema foi feita conforme a metodologia proposta por Bakker-Arkema et al. (1978), analisando as seguintes variáveis: a) dos grãos - tipo de grãos, teores de água inicial e final (% bu), índice de impureza (%), temperatura inicial ($^{\circ}\text{C}$), massas específicas aparentes, inicial e final (kg m^{-3}), massa de produto úmido (kg) e índices de qualidade; b) do ar: temperaturas do ambiente e de secagem ($^{\circ}\text{C}$), umidade relativa do ambiente e de secagem; c) do secador: fluxo de ar ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-3}$), volume total (m^3) ou fluxo de grãos ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), tempo de secagem (h) ou comprimento da câmara de secagem (m), área da

câmara de secagem (m^2), pressão estática (mmca), tempo de carga e descarga (h); d) de energia: ventilador e transportadores (kWh lote^{-1} ou kWh h^{-1}) e tipo e quantidade de combustível (kJ lote^{-1} ou kJ h^{-1}); e) do desempenho: duração do teste ou volume de produto úmido (h ou m^3), umidade removida do produto (% bu), capacidade de secagem de produto úmido ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), consumo específico de energia para a secagem, com e sem energia elétrica (kJ kg^{-1}) de água evaporada.

3.2.1. Energia requerida pela movimentação do ar de secagem

A avaliação da energia requerida pela movimentação do ar de secagem foi realizada empregando a potência instalada em motores elétricos de indução, para acionamento dos ventiladores do sistema de secagem.

3.2.2. Energia requerida pelo sistema de aquecimento do ar

Para a determinação do consumo de combustível em cada teste de secagem, utilizou-se a seguinte metodologia (Figura 1):

- Antes do início de cada teste, o combustível a ser utilizado, no caso lenha, foi empilhado;
- após, esta pilha foi medida em suas três dimensões (altura x largura x comprimento), resultando em um determinado volume (m^3) de lenha;
- durante a secagem, apenas a lenha quantificada, foi utilizada na alimentação da fornalha;
- após a finalização de cada teste de secagem, novamente se quantificava o que havia restado de combustível;
- através da diferença de volume de combustível, ou seja, o volume inicial subtraído do final, estipulou-se o combustível utilizado em cada teste de secagem.

Para a transformação do volume de lenha de eucalipto (m^3) resultante do consumo de combustível para massa (kg), utilizou-se a massa específica de 440 kg.m^{-3} conforme Gatto et al. (2003). Para o cálculo da energia consumida no aquecimento do ar, utilizou-se o valor de $3000 \text{ kcal.kg}^{-1}$, conforme sugerido por Weber (1995).

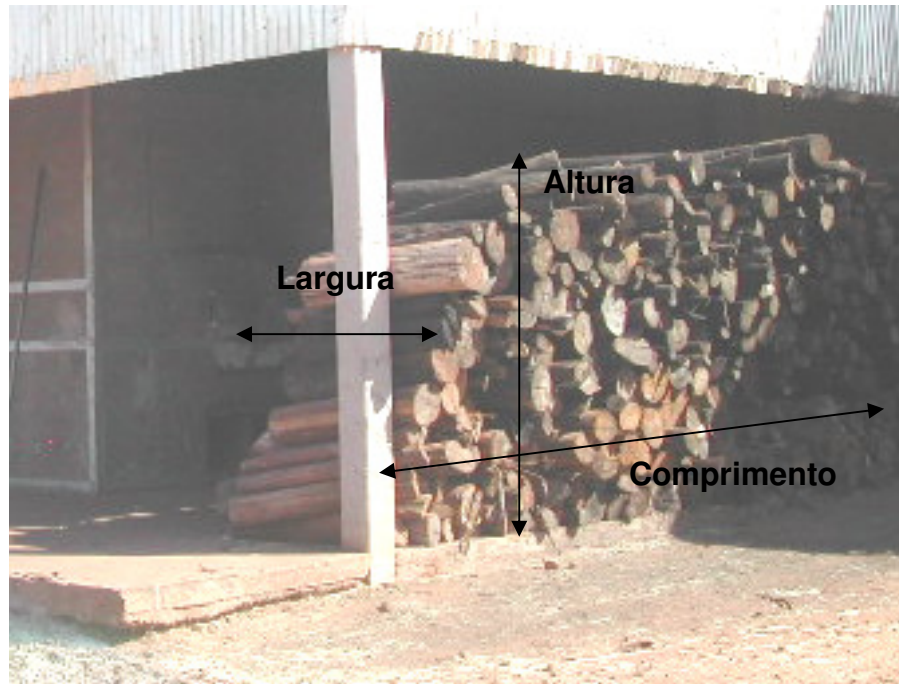


Figura 1 – Determinação das dimensões da pilha para avaliação do consumo de combustível (altura x largura x comprimento).

3.3. Instrumentação

3.3.1. Temperatura

Durante a secagem foram monitoradas as temperaturas do ambiente, do ar de secagem e de exaustão e da massa de grãos. Estas temperaturas foram monitoradas durante a realização dos testes em intervalos de tempo regulares de 30 minutos.

Para o monitoramento da temperatura do ambiente, foi montado um abrigo meteorológico, conforme as normas estabelecidas pelo serviço de meteorologia do Ministério da Agricultura e Abastecimento. Neste abrigo foi

instalado um psicrômetro de ventilação forçada, no qual eram monitoras as temperaturas de bulbo seco e úmido (Figura 2). Os valores de temperatura de bulbo seco e úmido foram utilizados no software GRAPSI 4.0 (Figura 3), para a determinação das propriedades psicrométricas do ar ambiente.



Figura 2 – Psicrômetro de ventilação forçada.

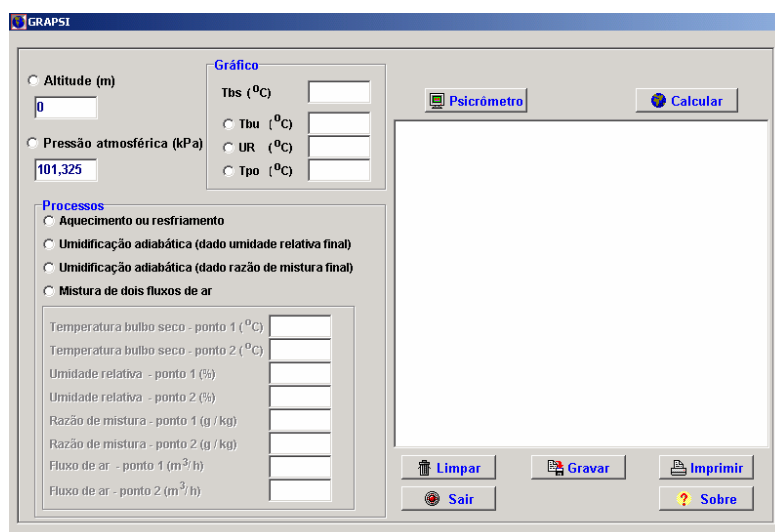


Figura 3 – Software GRAPSI versão 4.0.

As temperaturas do ar de secagem e de exaustão foram medidas por meio dos sensores de monitoramento de temperatura instalados pelo fabricante do secador. Estes sensores foram previamente avaliados para a realização dos

testes. Quando não foi possível a utilização dos sensores instalados nos secadores em função de algum defeito, então foram utilizados termômetros bimetalícos.

Para o monitoramento da temperatura da massa das sementes, estas foram coletadas no local de amostragem, e imediatamente acondicionadas em recipientes semi-adiabáticos (caixas de isopor), sendo a temperatura determinada através de termômetro digital, inserido na massa de sementes por aproximadamente dois minutos.

3.3.2. Vazão de ar

Em razão da impossibilidade de remover os ventiladores dos secadores testados, e utilizar o teste padrão sugerido pela Air Moving and Condition Association (AMCA), a vazão de ar dos secadores foi calculada indiretamente, através da medição da velocidade, pela seguinte equação:

$$Q = V \times A$$

Onde:

Q = vazão de ar ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)

V = velocidade ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

A = área (m^2)

Para a medição de velocidade foi utilizado um anemômetro de fio quente digital, com a capacidade de registrar dados para um determinado intervalo de tempo, apresentando valores de velocidade média e instantânea. Essas medições foram realizadas no bocal de exaustão dos ventiladores, durante um intervalo de tempo de 20 segundos (uma leitura por segundo) e em cinco pontos, sendo um no centro e um em cada quadrante, conforme Figuras 4, sendo utilizado o valor médio encontrado neste intervalo de tempo.

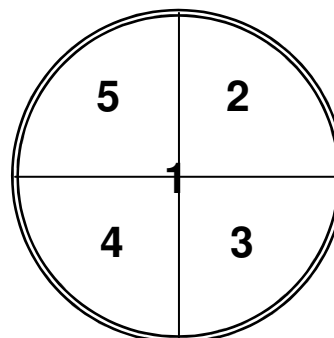
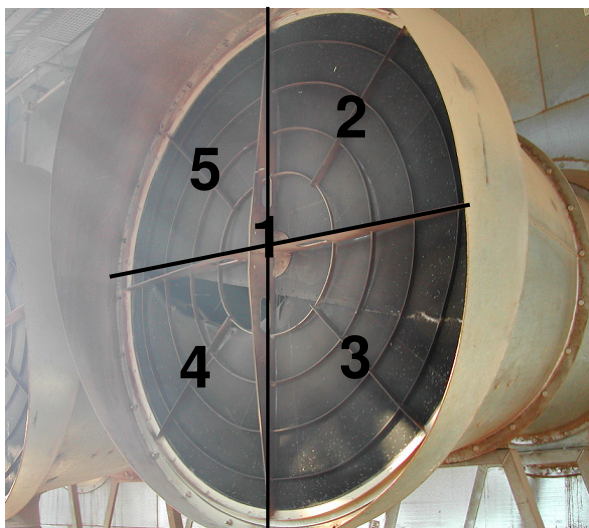


Figura 4 - Pontos de medição de velocidade do ar na saída de ventiladores.

3.4. Amostragens

Durante a carga do secador foram retiradas amostras para medições das condições iniciais do produto.

As retiradas de amostras do produto durante o período de operação de secagem, foram realizadas em intervalos regulares de 30 minutos, em recipientes semi-adiabáticos para imediata realização do monitoramento da temperatura da massa do produto.

As amostras foram coletadas após o sistema de descarga conforme Figura 5 (a e b) - sistema de eclusas rotativas ou bandejas de acionamento pneumático - ou em local próprio para retirada de amostras no transportador helicoidal inferior (Figura 6).



(a)



(b)

Figura 5 – a) Janela de inspeção; b) sistema de eclusas rotativas.



Figura 6 – Amostragem no transportador helicoidal inferior.

3.5. Umidade do produto

Foram utilizados dois procedimentos para monitorar a umidade do produto durante os testes, o método direto e o indireto.

O método direto utilizado foi realizado em estufa elétrica de desidratação, sem ventilação forçada, com temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas, conforme as Regras para Análise de Sementes – RAS (BRASIL, 1992). Decorrido este tempo, o produto foi esfriado em dessecador por um período de 30 minutos e, novamente, pesado. A razão estabelecida pela diferença entre os pesos inicial e final e o peso inicial forneceu o valor da umidade, em base úmida.

Devido o tempo necessário para obtenção destes resultados, também foi utilizado um método indireto, onde uma parte de cada amostra analisada em estufa foi analisada em um determinador de umidade capacitivo Burrows (Figura 7) com o objetivo de se obter leituras imediatas e, com isto, atender às necessidades da operação de secagem.

O resultado final de cada medição foi aquele obtido da média entre três repetições por amostra, tanto para o método direto quanto para o indireto.



Figura 7 – Determinador de umidade capacitivo Burrows.

3.6. Qualidade do produto

O teste de coloração com tintura de iodo (Figura 8) executado com duas repetições com 50 sementes por amostra, colocadas em copos plásticos e a seguir, cobertas com solução de tintura de iodo a 4% por um período de cinco minutos. Em seguida, eliminado o excesso da solução, as sementes foram lavadas em água corrente e distribuídas sobre folhas de papel toalha para a contagem do número de sementes danificadas. Realizou-se a contagem considerando dano severo (trincas profundas independentemente da região de ocorrência ou trincas leves na região próxima e/ou no embrião da semente) e dano leve (no pericarpo, na região superior da semente, oposto à localização do embrião). As sementes danificadas (Figura 9), mesmo que apresentassem várias trincas, foram contadas uma só vez, considerando o dano mais grave. Os resultados foram expressos em porcentagem de sementes danificadas por amostra.



Figura 8 - Teste de coloração com tintura de iodo.

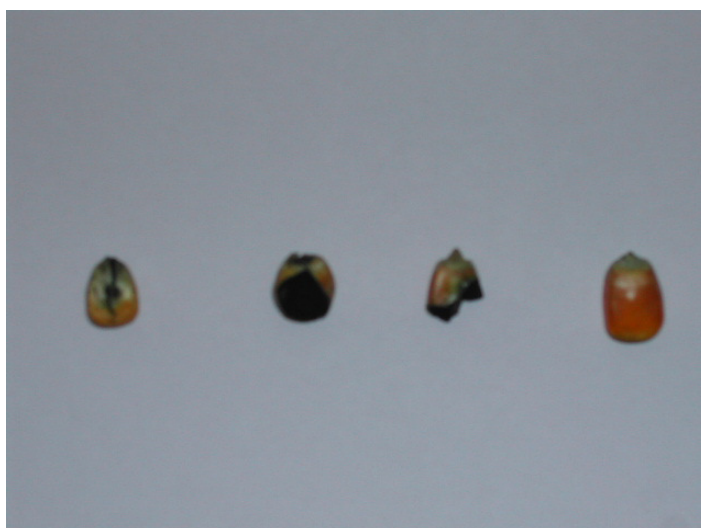


Figura 9 - Exemplos de danos mecânicos encontrados no produto.

3.7. Procedimento experimental

Foram realizadas três secagens em cada secador e os resultados experimentais de cada teste foram analisados independentemente e comparados como um experimento, sem testes de média, uma vez que cada teste de secagem não caracteriza uma repetição, conforme a metodologia proposta por Bakker-Arkema et al. (1978).

Os dados de teor de água do produto durante a secagem, foram submetidos à análise de regressão polinomial.

Os dados de temperatura do ar ambiente, do ar de secagem e entalpia específica, foram apresentados graficamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Desempenho dos secadores

Na Tabela 1 estão apresentados os valores dos resultados obtidos na avaliação de desempenho dos secadores A, B, C, D e E.

Na avaliação de tempo de secagem não foi computado o tempo de carga e descarga do produto porque o objetivo deste trabalho foi avaliar apenas o comportamento dos secadores, e não da unidade de secagem completa.

Observa-se na Tabela 1, que o secador A apresentou a mais elevada velocidade de secagem, com um valor médio de 2,76 pontos percentuais de umidade do produto por hora. O secador C, apresentou o menor tempo de secagem do produto, com uma média de 3,5 horas por experimento. Também se observa que, embora a umidade inicial média dos três experimentos do secador E apresentassem os menores valores, este equipamento teve o maior tempo médio de secagem e a menor velocidade de secagem dos cinco secadores comparados.

Tabela 1 - Desempenho dos secadores A, B, C, D e E

Secador / Experimento	Umidade inicial (%)	Umidade final (%)	Redução de umidade (%)	Tempo de secagem (h)	Velocidade média de secagem (%.h ⁻¹)
A / 1	27,0	13,6	13,4	4,5	2,97
A / 2	24,3	14,2	10,1	3,5	2,88
A / 3	23,2	13,5	9,7	4,0	2,42
B / 1	26,3	15,1	11,2	5,0	2,24
B / 2	24,6	15,0	9,6	4,5	2,13
B / 3	24,5	14,7	9,8	5,5	1,78
C / 1	21,4	14,9	6,5	3,5	1,85
C / 2	24,4	15,0	9,4	3,5	2,68
C / 3	25,1	14,4	10,7	3,5	3,05
D / 1	20,9	13,3	7,6	3,5	2,17
D / 2	25,0	14,5	10,5	5,0	2,10
D / 3	23,8	15,0	8,8	5,0	1,76
E / 1	22,6	14,4	8,2	5,0	1,64
E / 2	23,4	13,1	10,3	7,0	1,47
E / 3	21,3	14,8	6,5	4,5	1,44

Ainda analisando a Tabela 1, se observa que a umidade inicial do produto variou bastante em todos os experimentos, devido à diferença de umidade do produto no campo e desuniformidade de umidade da carga inicial. A umidade final apresentou menor variação em todos os experimentos, embora os valores finais sejam elevados para uma armazenagem segura. Após a secagem o produto de todos os experimentos foi armazenado em silos com

sistema de aeração para finalizar a secagem, e atingir a umidade de 13% indicada para armazenamento.

Na Tabela 2 estão apresentadas às capacidades de secagem de milho, em toneladas por hora e a redução de umidade em pontos percentuais por hora para os secadores A, B, C, D e E.

Tabela 2 - Capacidade operacional de secagem, capacidade de secagem declarada e capacidade estática para os secadores A, B, C, D e E

Secador / Experimento	Capacidade operacional de secagem (t.h ⁻¹)	Capacidade de secagem declarada (t.h ⁻¹)	Capacidade estática (t)
A / 1	37,00	100	166,32
A / 2	47,50	100	166,32
A / 3	41,60	100	166,32
B / 1	21,90	60	109,28
B / 2	24,30	60	109,28
B / 3	19,80	60	109,28
C / 1	45,70	120	159,89
C / 2	45,70	120	159,89
C / 3	45,70	120	159,89
D / 1	50,77	120	177,68
D / 2	35,54	120	177,68
D / 3	35,54	120	177,68
E / 1	28,59	120	142,97
E / 2	20,42	120	142,97
E / 3	31,77	120	142,97

Observa-se na Tabela 2, que o secador C apresentou maior capacidade operacional de secagem do produto em toneladas por hora, embora possua a terceira maior capacidade estática. O secador A obteve a segunda maior capacidade operacional de secagem em toneladas por hora e igualmente ocorreu com sua capacidade estática. Embora o secador D apresente a maior capacidade estática, sua capacidade operacional de secagem em toneladas por hora apresentou apenas o terceiro maior valor. O secador B como possui a menor capacidade estática de todos os secadores testados, igualmente ocorreu com sua capacidade operacional de secagem em toneladas por hora. Embora o secador E possua capacidade estática mais elevada que o B, o mesmo não ocorreu com sua capacidade operacional de secagem em toneladas por hora, pois os dois secadores apresentaram valores médios similares.

Ainda na Tabela 2, pode-se observar os valores de capacidade de secagem declarada pelo fabricante, que é determinado para o equipamento secando soja, com umidade de 18 para 13% base úmida e operando de forma contínua. Em função disto, os resultados obtidos em capacidade operacional de secagem para todos os secadores testados apresentaram valores mais baixos, visto que o produto secado foi milho, com umidade inicial acima dos 18% em todos os experimentos e o secador não foi operado de forma contínua, e sim, em sistema intermitente, que consiste na circulação do produto pelo sistema secador-elevador, fazendo com que o produto passe mais de uma vez pela torre de secagem até atingir a umidade final desejada.

4.2. Características do ar observadas durante o procedimento dos testes.

Na Tabela 3 estão apresentados os valores das temperaturas médias do ar de secagem e ambiente, umidades relativas médias do ar de secagem e ambiente para os experimentos realizados com os secadores A, B, C, D e E.

Tabela 3 - Temperaturas médias do ar de secagem e ambiente, umidades relativas médias do ar de secagem e ambiente para os experimentos realizados com os secadores A, B, C, D e E

Secador / Experimento	Temperaturas médias do ar (°C)		Umidades relativas médias do ar (%)	
	Ambiente	Secagem	Ambiente	Secagem
A / 1	27,6	86,5	61,1	3,7
A / 2	26,4	91,7	67,1	3,1
A / 3	25,3	83,4	69,8	4,1
B / 1	16,6	111,6	83,8	1,0
B / 2	14,6	117,6	87,8	0,8
B / 3	20,5	120,3	65,4	0,8
C / 1	24,3	117,2	63,6	1,1
C / 2	24,7	115,0	63,9	1,2
C / 3	20,1	116,7	73,7	1,0
D / 1	28,9	95,5	53,9	2,5
D / 2	24,6	92,2	73,4	3,0
D / 3	22,5	90,5	73,0	2,8
E / 1	20,2	93,2	74,6	2,2
E / 2	16,2	97,6	81,5	1,6
E / 3	21,2	97,1	80,5	2,2

As temperaturas médias do ar de secagem mais baixas foram empregadas no secador A e as mais altas nos secadores B e C (Tabela 3). Vale lembrar que o secador A apresentou maior velocidade média de secagem

(2,76 %.h⁻¹) e o secador C, o menor tempo de secagem (3,5 h), conforme Tabela 1.

As umidades relativas do ar de secagem foram inferiores a 5%, determinadas pelo elevado aquecimento do ar de secagem, o que confere alta capacidade de remoção de água, conforme afirmaram Villela e Peske (1996).

4.3. Variação da umidade do produto em função do tempo

Nas Figuras 10, 11, 12, 13 e 14 são apresentadas as curvas de secagem de milho para os secadores A, B, C, D e E, respectivamente.

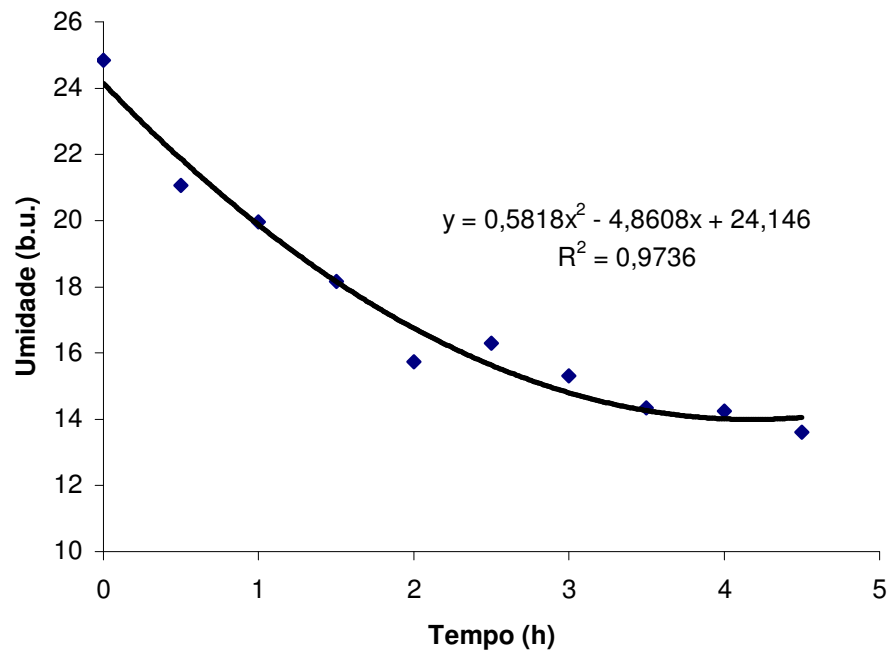


Figura 10 - Variação da umidade do produto em função do tempo para o secador A.

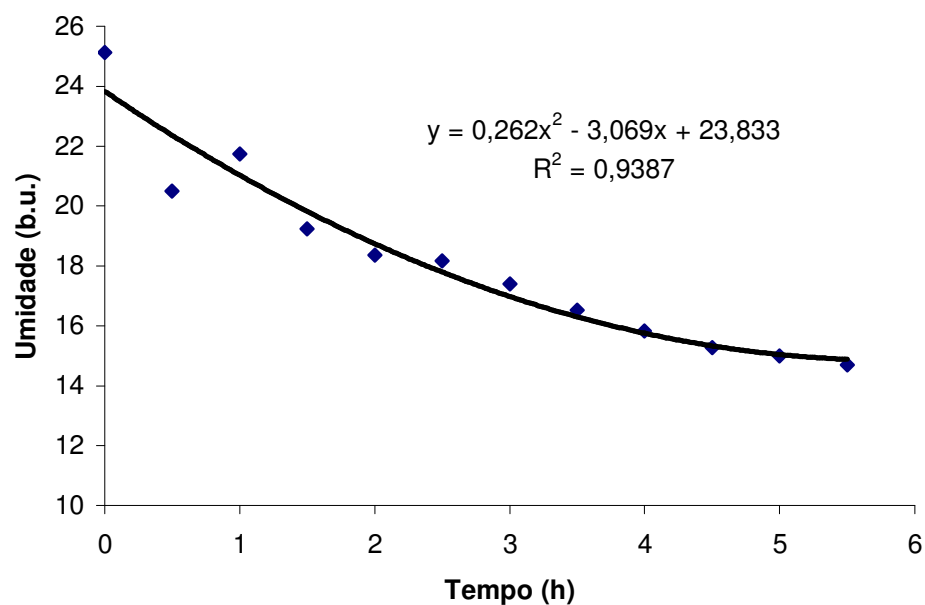


Figura 11 - Variação da umidade do produto em função do tempo para o secador B.

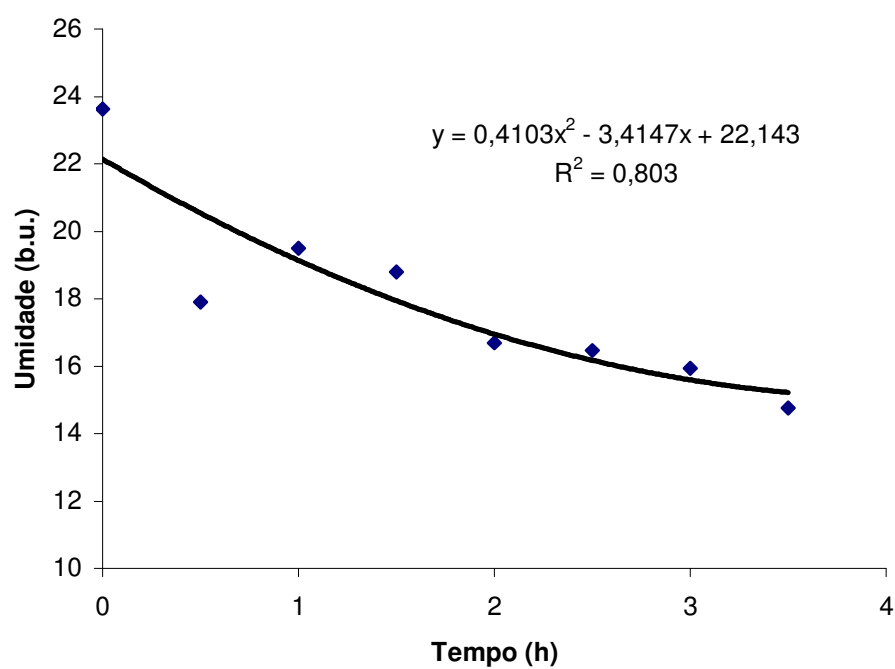


Figura 12 - Variação da umidade do produto em função do tempo para o secador C.

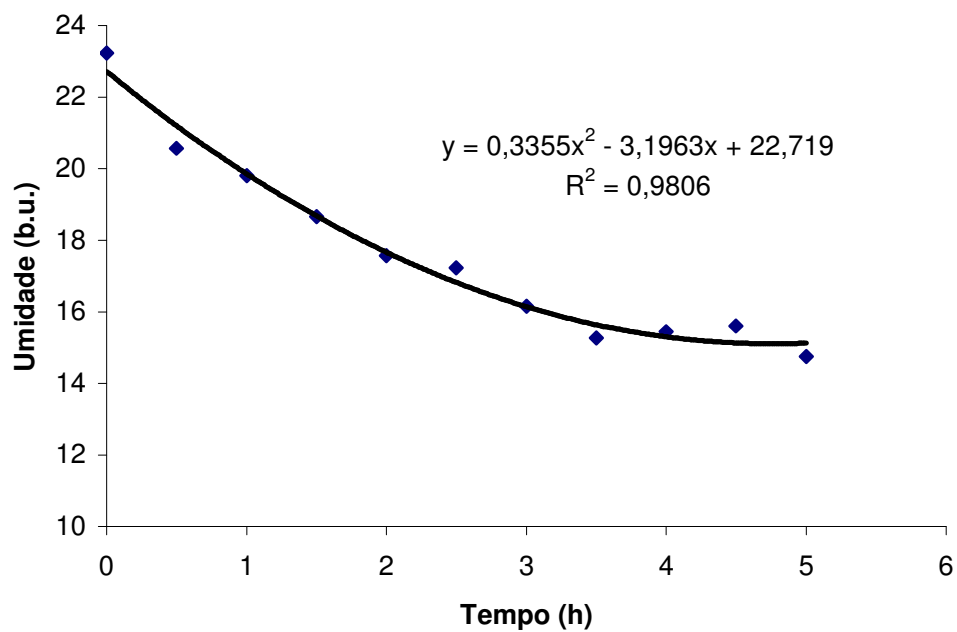


Figura 13 - Variação da umidade do produto em função do tempo para o secador D.

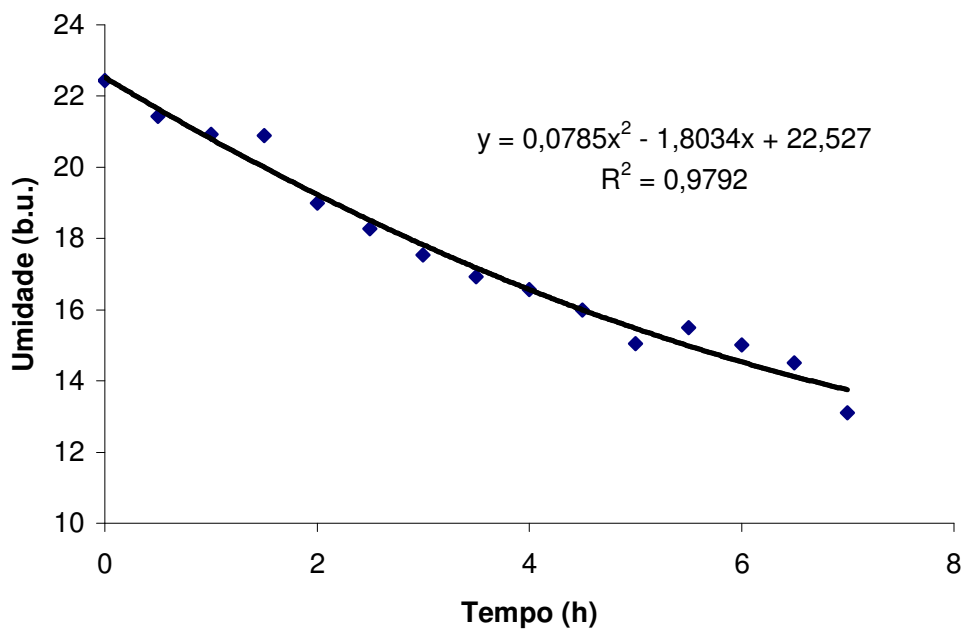


Figura 14 - Variação da umidade do produto em função do tempo para o secador E.

Examinando o comportamento exibido pelas curvas de secagem nas Figuras 10, 11, 12, 13 e 14, é possível observar que a variação da umidade dos grãos tem comportamento semelhante para todos secadores testados, diminuindo rapidamente nas primeiras horas de secagem e atenuando a redução da umidade na fase final. Este comportamento é observado frequentemente em produto que apresenta elevado teor de água no início da secagem, conforme descrito por Brooker et al. (1992).

4.4. Variação da temperatura do ar de secagem

Nas figuras 15, 16, 17, 18 e 19 observa-se a variação da temperatura do ar de secagem em função do tempo para os experimentos 1, 2 e 3, dos secadores A, B, C, D e E respectivamente.

Durante os procedimentos experimentais, a temperatura ambiente se manteve em $22,5^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Pode-se afirmar que para todos os experimentos, de todos os secadores avaliados, a variação da temperatura ambiente pode ser considerada reduzida, em relação à variação da temperatura do ar de secagem.

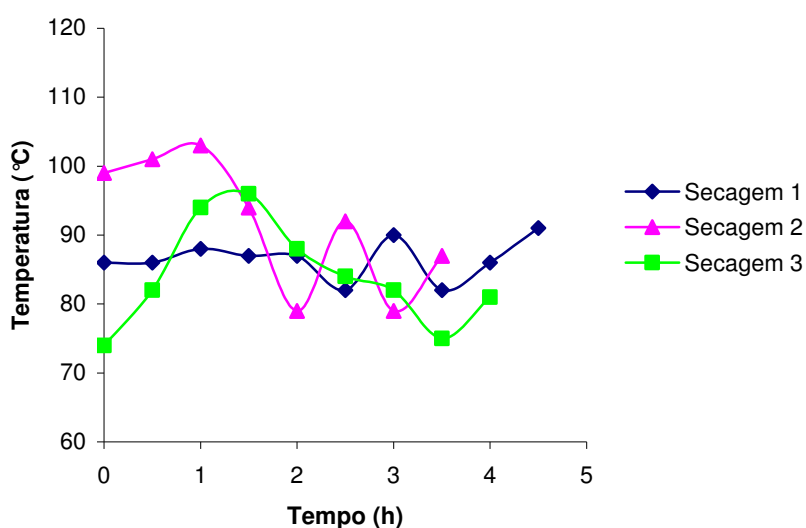


Figura 15 - Variação da temperatura do ar de secagem em função do tempo, para os três experimentos, secador A.

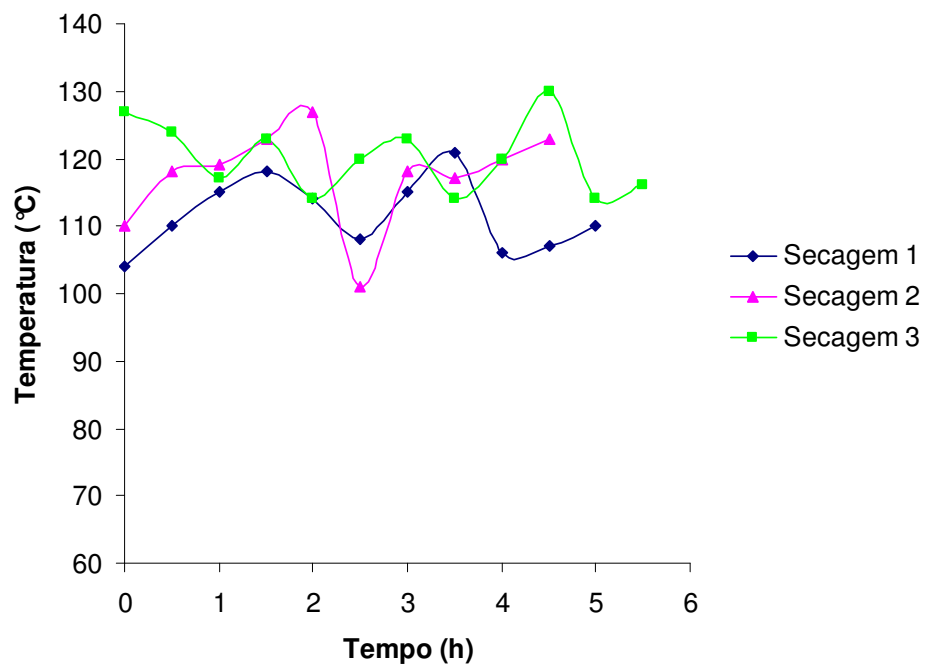


Figura 16 - Variação da temperatura do ar de secagem em função do tempo, para os três experimentos, secador B.

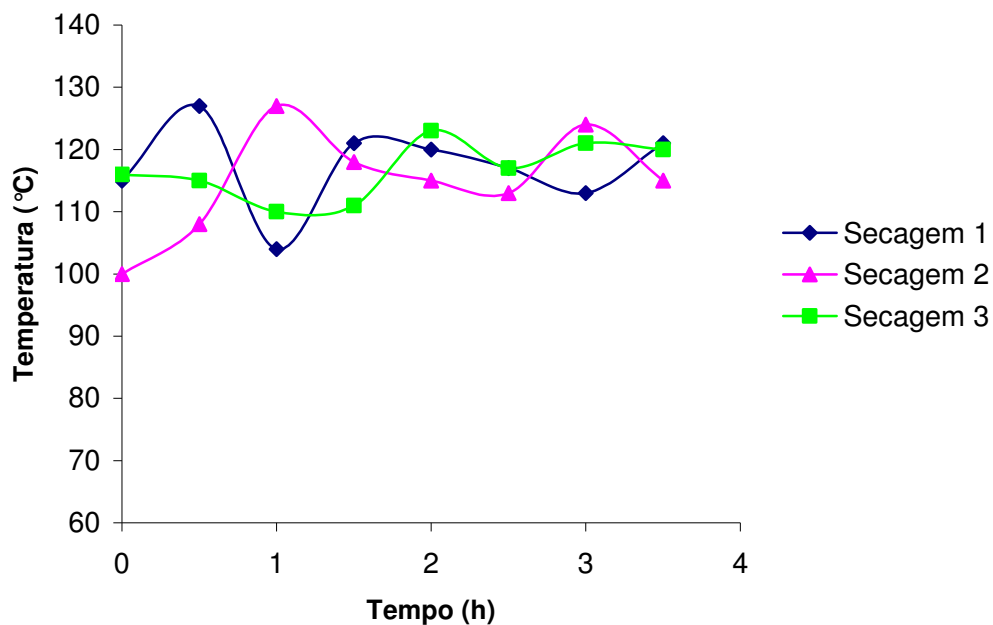


Figura 17 - Variação da temperatura do ar de secagem em função do tempo, para os três experimentos, secador C.

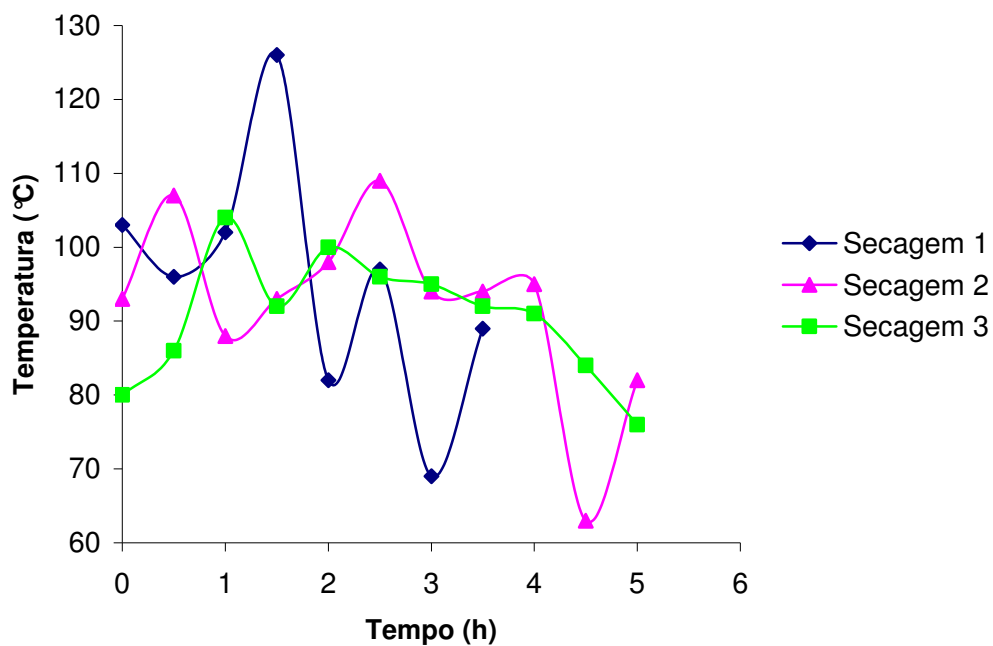


Figura 18 - Variação da temperatura do ar de secagem em função do tempo, para os três experimentos, secador D.

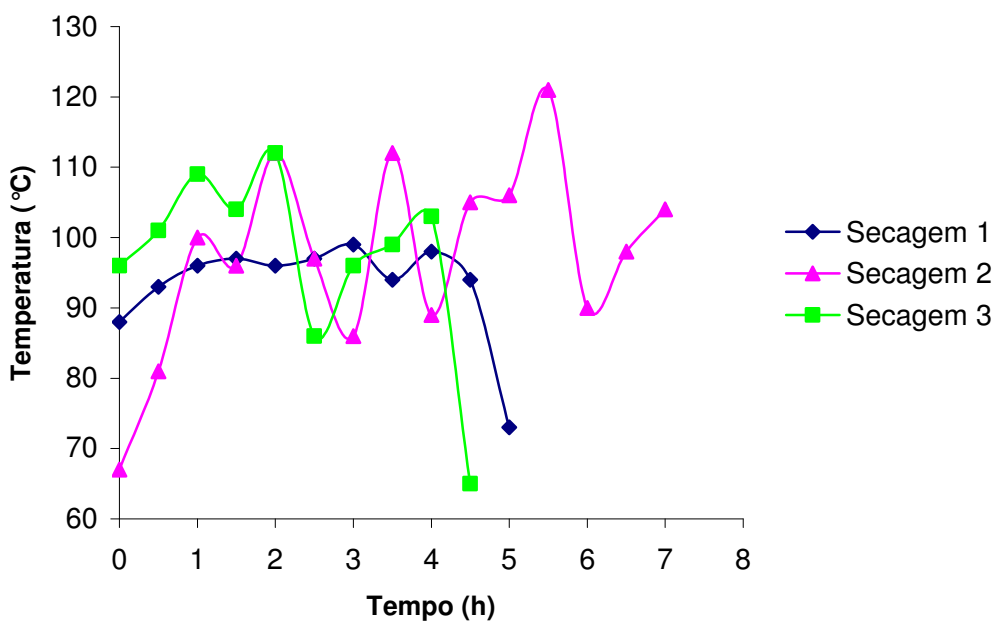


Figura 19 - Variação da temperatura do ar de secagem em função do tempo, para os três experimentos, secador E.

Observando-se as Figuras 15, 16 e 17, pode-se afirmar que a variação da temperatura do ar de secagem, para os três experimentos de secagem dos

secadores A, B e C, foi menor que nos demais secadores testados. Portanto, pode-se inferir que a operação de sistemas de secagem exige do operador treinamento e nível de conhecimento das características do equipamento e do produto a ser seco, porque é este que controla a quantidade de combustível e, conseqüentemente, a temperatura do ar de secagem, fator que pode ser decisivo na eficiência do sistema.

4.5. Consumo de combustível

Na Tabela 4 estão apresentados o consumo horário, consumo total de combustível e a energia total consumida por experimento, para os secadores A, B, C, D e E.

Tabela 4 – Consumo horário, consumo total de combustível e a energia total consumida por experimento, para os secadores A, B, C, D e E

Secador / Experimento	Consumo horário de combustível (m ³ .h ⁻¹)	Consumo total de combustível (m ³)	Energia total consumida (kJ)
A / 1	2,44	11,00	60.693.600
A / 2	3,54	12,40	68.418.240
A / 3	2,70	10,80	59.590.080
B / 1	1,55	7,76	42.816.576
B / 2	1,53	6,90	38.071.440
B / 3	1,29	7,10	39.174.960
C / 1	3,00	10,50	57.934.800
C / 2	3,14	11,00	60.693.600
C / 3	3,51	12,30	67.866.480
D / 1	4,10	14,50	80.005.200
D / 2	3,90	19,50	107.593.200
D / 3	3,50	17,50	96.558.000
E / 1	2,90	14,70	81.108.720
E / 2	3,10	21,20	116.973.120
E / 3	3,30	14,90	82.212.240

O secador B utilizou para secar as três cargas de milho a média de $1,46 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$, apresentando menor valor de consumo horário de lenha e consumo total de combustível para realização da operação. Este comportamento já era esperado, visto que este era o secador de menor capacidade estática e secagem (60 t.h^{-1}). O secador A utilizou um valor médio de $2,89 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ de lenha e o consumo total de combustível semelhante ao do secador C, que consumiu $3,21 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ de média. Esta diferença na média horária ocorreu em função do secador C realizar a operação de secagem em menor tempo do que o A.

Nos secadores D e E, o consumo total de combustível apresentou valores semelhantes, sendo mais elevado que os demais testados. Embora tivessem consumo total semelhantes, o consumo horário dos secadores D e E foi de $3,72$ e $3,10 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ respectivamente. Esta diferença pode ser atribuída ao fato do secador D realizar as operações de secagem em tempos menores.

4.6. Potência instalada e energia elétrica consumida

Na Tabela 5 estão apresentados os valores de potência instalada em motores elétricos de indução, demanda de energia elétrica horária e total e energia total consumida para os secadores A, B, C, D e E. Para o cálculo da demanda de energia elétrica horária foi utilizado 90% de rendimento nos motores elétricos de indução.

Observa-se na Tabela 5, que o secador B apresentou a menor potência instalada em motores elétricos de indução e, portanto, menor demanda de energia elétrica horária. Este resultado já era esperado, pois este secador entre todos testados, era o de menor capacidade estática e de secagem. O secador C, embora possua maior capacidade de secagem declarada pelo fabricante do que o secador A, apresentou potência instalada em motores elétricos de indução 28% menor do que A, e conseqüentemente, menor demanda de energia elétrica horária.

Tabela 5 – Potência instalada em motores elétricos de indução, demanda de energia elétrica horária e total e energia total consumida para os secadores A, B, C, D e E.

Secador / Experimento	Potência Instalada (cv)	Demanda de		Energia total consumida (kJ)
		energia elétrica horária (kWh)	energia elétrica total (kWh)	
A / 1	77	62,93	283,18	1.019.448
A / 2			220,25	792.900
A / 3			251,72	906.192
B / 1	52	42,50	212,50	765.000
B / 2			191,25	688.500
B / 3			233,75	841.500
C / 1	60	49,04	171,64	617.904
C / 2			171,64	617.904
C / 3			171,64	617.904
D / 1	104,25	85,20	298,20	1.073.520
D / 2			426,00	1.533.600
D / 3			426,00	1.533.600
E / 1	122	99,7	498,50	1.794.600
E / 2			697,90	2.512.440
E / 3			448,65	1.615.140

O secador E apresentou potência instalada de 58, 103 e 17% maior do que os secadores A, C e D, respectivamente, comparação esta feita, em função de estes secadores apresentarem valores semelhantes de capacidade estática e de secagem. O mesmo comportamento ocorreu para a demanda de energia elétrica horária.

Com relação à demanda de energia elétrica total e a energia total consumida, observou-se que para cada secador este valor foi proporcional ao tempo de duração de cada operação de secagem.

4.7. Entalpia específica

Entende-se por entalpia específica a quantidade de energia necessária para evaporar uma unidade de massa de água do produto.

Nas Figuras 20, 21, 22, 23 e 24 observa-se a entalpia específica, considerando o combustível e a soma de combustível e energia elétrica, para os três experimentos dos secadores A, B, C, D e E, respectivamente.

Verificou-se que a entalpia específica considerando o combustível e a soma de combustível e energia elétrica, para os três experimentos de secagem dos secadores A, B e C, apresentaram valores similares.

Observa-se que a energia elétrica, nos resultados de entalpia específica, para os três experimentos de todos os secadores, representa menos de 1% do combustível consumido.

O secador E apresentou os valores mais elevados de entalpia específica, entre todos os secadores testados.

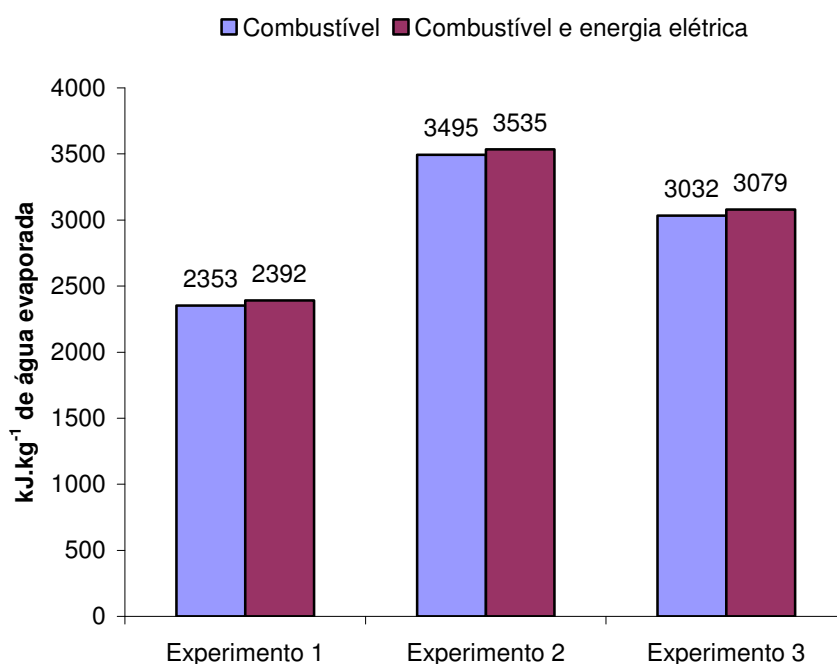


Figura 20 - Entalpia específica para os três experimentos do secador A.

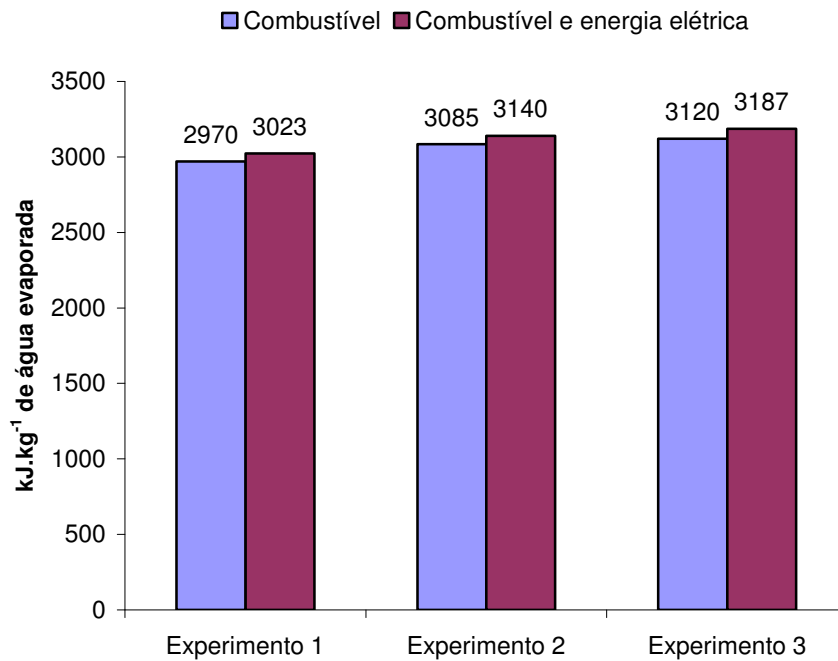


Figura 21 - Entalpia específica para os três experimentos do secador B.

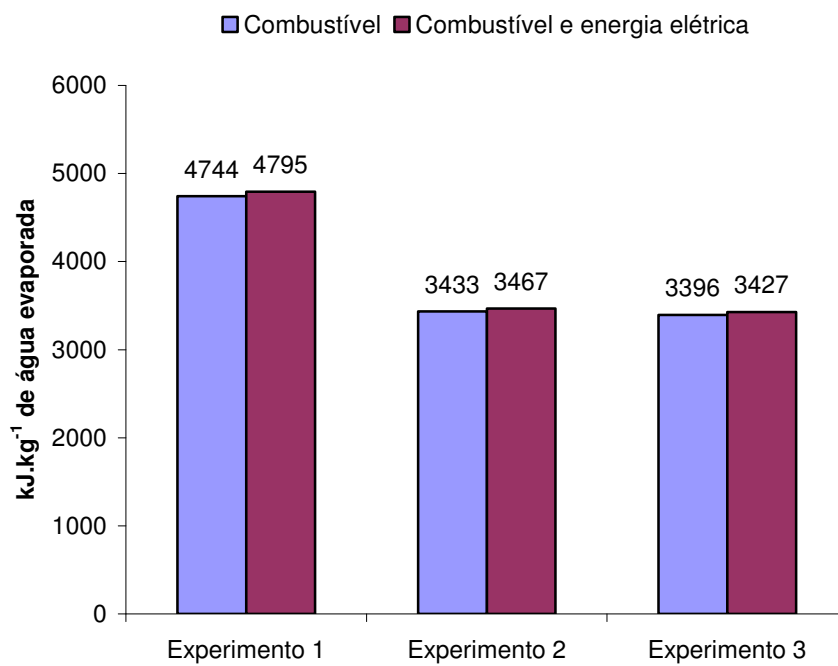


Figura 22 - Entalpia específica para os três experimentos do secador C.

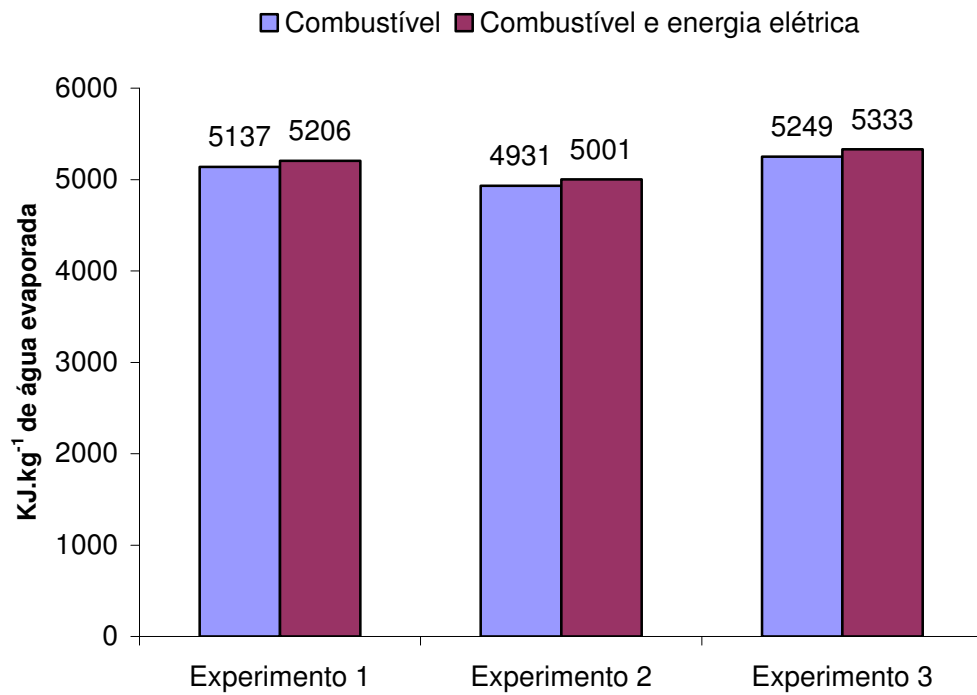


Figura 23 - Entalpia específica para os três experimentos do secador D.

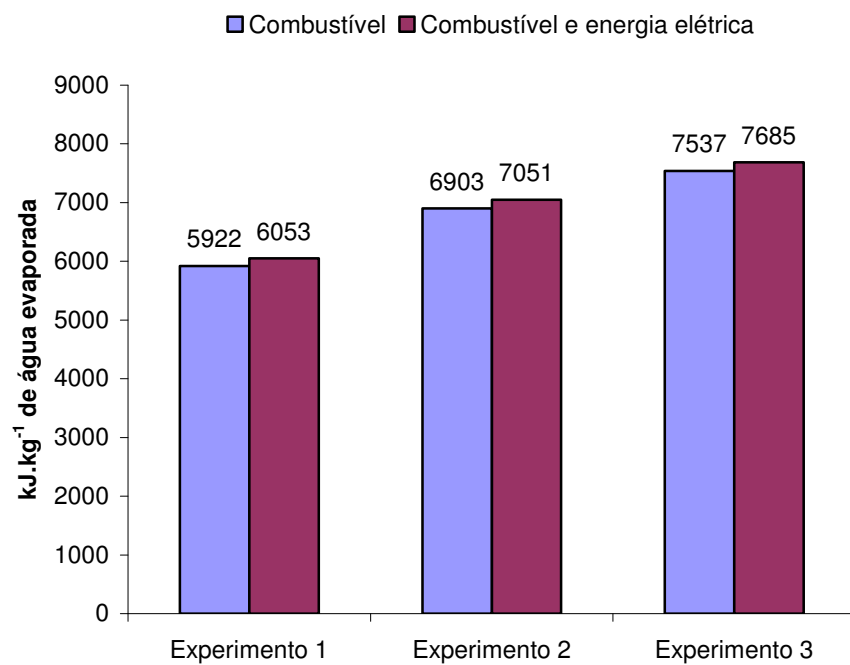


Figura 24 - Entalpia específica para os três experimentos do secador E.

4.8. Vazão de ar

Na Tabela 6 estão apresentados os valores de vazão total e vazão específica de ar para os secadores A, B, C, D e E.

Tabela 6 - Vazão total e vazão específica de ar para os secadores A, B, C, D e E

Secador	Vazão total de ar (m ³ .h ⁻¹)	Vazão específica (m ³ .min ⁻¹ . t ⁻¹ produto)
A	199.890,5	20,02
B	121.927,7	18,59
C	168.220,0	17,54
D	217.266,0	20,39
E	239.500,8	27,91

Observando a Tabela 6, verifica-se que o secador B apresentou o menor valor de vazão de ar, em função de sua menor capacidade. Embora o secador E possua as maiores vazão total e específica do que os outros testados, este apresentou o menor desempenho de secagem, como se pode observar na Tabela 1. O secador C, embora possua maior capacidade de secagem declarada pelo fabricante do que o secador A, apresentou vazão total e específica menor do que A. Este comportamento não refletiu diferença de desempenho entre os secadores, como pode ser observado na Tabela 1.

Os resultados de vazão específica de ar apresentados por todos os secadores testados, estão de acordo com o indicado por Silva et al. (2000), ao afirmarem que para métodos de secagem artificial com altas temperaturas, dependendo do tipo de secador, a vazão específica é geralmente maior que 10m³ min⁻¹ t⁻¹.

4.9. Qualidade física do produto

Na Tabela 7 estão apresentadas as porcentagens de grãos trincados e quebrados, antes e após o processo de secagem.

Observando-se na Tabela 7 os valores de grãos trincados e quebrados antes e depois da operação de secagem, pode-se afirmar que a qualidade inicial e final do produto variou bastante entre experimentos do mesmo secador e entre secadores. Os secadores A, B e C apresentaram-se semelhantes com relação à qualidade do produto final. Diferenças podem ser percebidas não em função da secagem, mas em relação à qualidade do produto proveniente do campo.

Tabela 7 – Porcentagem de grãos trincados e quebrados, antes e após o processo de secagem

Secador / Experimento	Trincados		Quebrados	
	Inicial (%)	Final (%)	Inicial (%)	Final (%)
A / 1	7	18	3	7
A / 2	10	18	4	9
A / 3	11	20	6	13
B / 1	10	11	14	16
B / 2	9	15	20	26
B / 3	12	14	9	11
C / 1	17	30	6	11
C / 2	16	19	18	20
C / 3	15	23	14	19
D / 1	12	67	5	11
D / 2	13	60	6	19
D / 3	14	55	5	21
E / 1	16	73	7	16
E / 2	15	69	8	23
E / 3	13	70	6	13

Os secadores D e E apresentaram elevada porcentagem de grãos trincados após a secagem. Pelas Figuras 18 e 19 pode-se observar que as temperaturas do ar de secagem apresentaram maiores variações nos secadores D e E, o que pode ter ocasionado gradientes mais elevados de umidade entre o interior e a periferia do produto, gerando variações de pressão que podem causar trincas, conforme relatado por Peske e Villela (2003). Além disso, segundo Sarker et al. (1996), a secagem rápida pode gerar tensões generalizadas na superfície e compressão no interior do grão, causando trincamentos. Por outro lado, Borém (1992) destaca que a porcentagem de grãos trincados e a suscetibilidade à quebra aumentam com a elevação da temperatura de secagem.

4.10. Temperatura da massa do produto

Na Tabela 8 estão apresentadas as temperaturas médias e máximas alcançadas pela massa do produto durante o processo de secagem.

Como se pode observar na Tabela 8, as temperaturas máximas da massa do produto foram atingidas nos secadores D e E. Nos experimentos do secador D, a temperatura máxima da massa do produto, atingiu valores próximos ao máximo recomendado por Peske e Villela (2003). Também analisando a Tabela 7, observa-se que os secadores D e E foram os que apresentaram maior porcentagem de grãos trincados, o que pode ter sido ocasionado, pelas elevadas temperaturas que a massa do produto atingiu durante o processo de secagem, este comportamento já havia sido descrito por Peske e Villela (2003) principalmente para sementes de milho e arroz.

Tabela 8 - Temperaturas médias e máximas alcançadas pela massa do produto durante o processo de secagem

Secador / Experimento	Temperatura da massa do produto (°C)	
	Média	Máxima
A / 1	33,7	40,8
A / 2	33,3	35,4
A / 3	36,4	37,4
B / 1	33,0	34,9
B / 2	32,3	36,0
B / 3	33,9	39,8
C / 1	31,2	34,9
C / 2	31,7	37,1
C / 3	35,8	39,8
D / 1	37,0	43,0
D / 2	37,6	41,0
D / 3	37,2	40,2
E / 1	31,9	38,0
E / 2	33,1	39,3
E / 3	34,6	38,3

4.11. Considerações gerais

Constatou-se acentuada variação no rendimento de secagem entre os secadores contínuos, operando em sistema intermitente. Houve variações entre temperaturas de secagem do ar empregadas, velocidade de secagem,

consumo de combustível e qualidade do produto nos diferentes secadores testados.

Durante o período dos testes, alguns aspectos foram avaliados subjetivamente através de observações e informações repassadas por funcionários de cada uma das unidades onde estavam instalados os secadores, tais como: manutenção do sistema de secagem, limpeza do equipamento e sua unidade, nível de treinamento dos operadores, existência de manual do equipamento, qualidade da assistência técnica.

Praticamente em todas as unidades onde se encontravam os secadores testados, a manutenção era de forma corretiva durante a safra e preventiva no período entre safras. O secador E, durante o período de realização dos experimentos, apresentava alguns sensores de temperatura defeituosos.

Em geral, a limpeza dos secadores mostrou-se deficiente. Os secadores A e B apresentavam grande quantidade de poeira e grãos acumulados em seu interior.

Embora os operadores de secagem, na maioria dos casos treinados por pessoal técnico da empresa fabricante, geralmente apresentavam desconhecimento de aspectos técnicos de operação do sistema.

Os secadores A e B apresentavam pré-regulagens dos registros de ar para cada produto. Apenas os secadores D e E, apresentavam manual das características técnicas e de operação do equipamento. Nos secadores A, B, C e D os registros de ar na fornalha eram utilizados no controle da temperatura de secagem, enquanto que no secador E, estes operavam sempre fechados, para conseguir elevar a temperatura até os patamares desejados.

No geral, a assistência técnica oferecida pelo fabricante na pós-venda mostrou-se eficiente e foi considerada pelos clientes como um dos fatores mais importantes na aquisição de novos equipamentos.

Embora o elevado nível de automação do secador E, seus componentes apresentavam problemas, sendo operado de forma manual.

5. CONCLUSÕES

Levando-se em consideração as condições em que foram realizados os testes experimentais, pode-se concluir:

A velocidade de secagem de milho em secadores contínuos operando, de forma intermitente, pode atingir dois a três pontos percentuais por hora, com o emprego de temperaturas do ar de secagem de 80 a 120 °C.

Em todos os secadores testados, a energia elétrica utilizada na movimentação do ar de secagem representa no máximo 2,3 % em relação à energia utilizada para o aquecimento do ar de secagem.

A qualidade física do produto secado em secadores cujas temperaturas de secagem sofreram maiores variações, é inferior relativamente a do produto submetido à secagem com menores variações de temperatura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, R.; PESKE, S.T. **Manual para el beneficio de semillas**. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1992. 247p.

BAKKER-ARKEMA, F.W.; BROOK, R.C.; BROOKER, D.B. **Energy and capacity performance evaluation of grain dryers**. ASAE. St Joseph: ASAE, 1978, 14p.

BARBOSA, F.F. **Secagens estacionária e intermitente com uso de glp para condicionamento do ar e seus efeitos na qualidade de grãos de arroz**. 2002. 93p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2002.

BAUDET, L.M.; VILLELA, F.; CAVARIANI, C. Princípios de secagem. **SEED NEWS**. Pelotas, ano III, n.º 10, p. 20 - 22, 1999.

BAUDET, L.M. Armazenamento de sementes. In: PESKE, S. T.; ROSENTHAL, M.; ROTA, G.R.M. **Sementes: Fundamentos Científicos e Tecnológicos**. Pelotas, Editora e Gráfica Universitária (UFPel), 2003, p. 369-416.

BORÉM, F.M. **Efeito da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem sobre a qualidade da semente de milho (*Zea mays*, L.) híbrido AG 303**. 1992. 50p. Dissertação (Mestrado em pré-processamento e armazenamento de produtos vegetais) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1992.

BRASIL, Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária. **Regras para Análise de Sementes**. SNDA/DNDV/CLAV, 1992, 365p.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: An Avi Book, 1992, 450p.

CARVALHO, M.N. Injúria mecânica em sementes: um problema cada vez mais moderno, **SEED NEWS**. Pelotas, ano V, n.º 4, p. 34, jul/ago, 2001.

ELIAS, M.C. **Tecnologia em secagem e armazenamento de grãos: sistemas, processos e métodos**. Pelotas: UFPEL/COREDE, 2000. 84p.

ELIAS, M.C. **Aquecimento do ar na secagem de grãos**. Pelotas: Pólo de Modernização Tecnológica em Alimentos da Região Sul. UFPEL-FAEM-DCTA, 1999. 5p.

FERREIRA, A.L.B. **Desenvolvimento de um secador intermitente de fluxos concorrentes-contracorrentes para arroz parboilizado**. 2003. 81p. Dissertação (Mestrado em pré-processamento e armazenamento de produtos vegetais) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

FERREIRA, A.L.B. Fatores importantes na aquisição de um sistema de secagem. **Seed News**. Pelotas, p. 10 - 13, 01 mar/abr, 2005.

FERREIRA, M.C.; FERNANDES, P.S.; SARAIVA FILHO, J.C. **Variação na umidade da madeira de eucalipto, estocada em pátio industriais**. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 4., 1982, Belo Horizonte. Belo Horizonte: SBS/IBDF/CNPq/FINEP, 1983. p 779-781.

FORTES, M., OKOS, M.R. **Changes in physical properties of corn during drying**. *Transactions of the ASAE*. V. 23, n. 4, p.1004-08, 1980.

GATTO, D.A., SANTINI E.J., HASELEIN, C.R., DURLO, M.A. **Características da lenha produzida na região da quarta colônia de imigração italiana do Rio Grande do Sul**. In. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v.13, n.2, p. 7-16

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

LASSERAN, J.C. **Aeração de grãos**. Viçosa: CENTREINAR, 1981.132p.

LOPES, R.P., AFONSO, A.D.L., SILVA, J.S. **Energia no pré-processamento de produtos agrícolas** In: SILVA, J.S. *Secagem e armazenagem de produtos agrícolas*. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 2000. 191-221p.

LUZ, C.A.S. **Secagem de sementes de arroz em secador intermitente lento**. 1986. 103p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 1986.

MILMAN, M.J. **Equipamentos para pré-processamento de grãos**. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária - UFPel, 2002. 206p.

MOTTA, W.A., VILLELA, F.A., ZIMMER, G.J. **Adaptação do método contínuo de secagem para sementes de arroz**. *Scientia Agricola*, v.56, n.4, p.1019-1025, out./dez. 1999.

PERES, W.B. **Manutenção da qualidade de grãos e sementes**. Pelotas, Editora e Gráfica Universitária (UFPel), 2001, 78p.

PESKE, S.T.; VILLELA, F. Secagem de sementes. In: PESKE, S. T.; ROSENTHAL, M.; ROTA, G.R.M. **Sementes: Fundamentos Científicos e Tecnológicos**. Pelotas, Editora e Gráfica Universitária (UFPel), 2003, p. 283-322.

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

SABIONE, P.M. **Projeto e avaliação de um secador de fluxos cruzados, intermitente e com reversão do fluxo de ar, na secagem de milho**. 1986. 101p. Dissertação (Mestrado em pré-processamento e armazenamento de produtos vegetais) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1986.

SARKER, N.N.; KUNZE, O.R.; STROUBOULIS, T. **Transient moisture gradients in rough rice mapped with finite element model and related to fissures alter heated air drying**. Transactions of the ASAE. St Joseph: ASAE, v.39, n. 2, 1996, p. 625-31.

SILVA, J. de S.; MELO, E.C.; PINTO, F.A.C. **Seleção e construção de ventiladores**. In: SILVA, J.S. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 2000. 241-260p.

SILVA, J. de S. **An engineering-economic comparison of five drying techniques, for shelled corn on Michigan farm**. East Lansing, 1980, 200 p. Tese (Doctor of Philosophy/Agricultural Engineering) – Department of Agricultural Engineering, Michigan State University.

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

VILLELA, F.A.; PERES, W.B. Coleta, secagem e beneficiamento de sementes. In: FERREIRA, A.G.; BORGUETTI, R. **Germinação: do básico ao aplicado**. Porto Alegre, ARTMED, 2004, 265-281.

VILLELA, F.A.; PESKE, S.T. Secagem e beneficiamento de sementes de arroz irrigado. In: PESKE, S.T.; NEDEL, J.L.; BARROS, A.C.S.A. **Produção de arroz**. Pelotas: UFPel, 1996. p.435-473.

APÊNDICES

Secador A

Tabela 9 – Resultados obtidos experimentalmente com secador A

Parâmetros	Teste		
	1	2	3
1) Do produto			
Produto		Milho	
Umidade inicial (% b.u.)	27,0	24,3	23,2
Umidade final (% b.u.)	13,6	14,2	13,5
Temp. da massa (°C)	33,7	33,3	36,4
Grãos trincados inicial (%)	7	10	11
Grãos trincados final (%)	18	18	20
Grãos quebrados inicial (%)	3	4	6
Grãos quebrados final (%)	7	9	13
2) Do ar (Temperatura)			
Ponto 1 (secagem) (°C)	86,5	91,7	83,4
Ponto 2 (secagem) (°C)	46,7	46,6	49,9
Ponto 3 (exaustão) (°C)	36,0	36,0	37,2
3) Do secador			
Vazão de ar ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)		199.890,5	
Vazão específica ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^3 \text{grão}$)		841,3	
Potência instalada (cv)		77	
4) Do combustível			
Tipo de combustível		Lenha	
Vol. de combustível hora (m^3)	2,44	3,54	2,7
Vol. de combustível (m^3)	11,00	12,4	10,8
5) Do desempenho			
Duração do teste (h)	4,5	3,5	4,0
Redução de umidade (%)	13,4	10,1	9,7
Redução umidade hora (%)	2,97	2,88	2,42
Massa de água retirada (kg)	25.795	19.578	18.651

Secador B

Tabela 10 – Resultados obtidos experimentalmente com secador B

Parâmetros	Teste		
	1	2	3
1) Do produto			
Produto		Milho	
Umidade inicial (% b.u.)	26,3	24,6	24,5
Umidade final (% b.u.)	15,1	15,0	14,7
Temp. da massa (°C)	33,0	32,3	33,9
Grãos trincados inicial (%)	10	9	12
Grãos trincados final (%)	11	15	14
Grãos quebrados inicial (%)	14	20	9
Grãos quebrados final (%)	16	26	11
2) Do ar (Temperatura)			
Ponto 1 (secagem) (°C)	111,6	117,6	120,3
Ponto 2 (secagem) (°C)	66,7	70,1	72,3
Ponto 3 (exaustão) (°C)	34,9	34,2	35,1
3) Do secador			
Vazão de ar ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)		121.927,7	
Vazão específica ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^3 \text{grão}$)		780,9	
Potência instalada (cv)		52	
4) Do combustível			
Tipo de combustível		Lenha	
Vol. de combustível hora (m^3)	1,55	1,53	1,29
Vol. de combustível (m^3)	7,76	6,90	7,10
5) Do desempenho			
Duração do teste (h)	5,0	4,5	5,5
Redução de umidade (%)	11,2	9,6	9,8
Redução umidade hora (%)	2,24	2,13	1,78
Massa de água retirada (kg)	14.417	12.342	12.555

Secador C

Tabela 11 – Resultados obtidos experimentalmente com secador C

Parâmetros	Teste		
	1	2	3
1) Do produto			
Produto		Milho	
Umidade inicial (% b.u.)	21,4	24,4	25,1
Umidade final (% b.u.)	14,9	15,0	14,4
Temp. da massa (°C)	31,2	31,7	35,8
Grãos trincados inicial (%)	17	16	15
Grãos trincados final (%)	30	19	23
Grãos quebrados inicial (%)	6	18	14
Grãos quebrados final (%)	11	20	19
2) Do ar (Temperatura)			
Ponto 1 (secagem) (°C)	117,2	115,0	116,7
Ponto 2 (secagem) (°C)	69,5	69,7	71,6
Ponto 3 (exaustão) (°C)	40,5	39,0	42,7
3) Do secador			
Vazão de ar ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)		168.220,0	
Vazão específica ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^3 \text{grão}$)		736,5	
Potência instalada (cv)		60	
4) Do combustível			
Tipo de combustível		Lenha	
Vol. de combustível hora (m^3)	3,00	3,14	3,51
Vol. de combustível (m^3)	10,5	11,00	12,30
5) Do desempenho			
Duração do teste (h)	3,5	3,5	3,5
Redução de umidade (%)	6,5	9,4	10,7
Redução umidade hora (%)	1,85	2,68	3,05
Massa de água retirada (kg)	12.212	17.682	19.986

Secador D

Tabela 12 – Resultados obtidos experimentalmente com secador D

Parâmetros	Teste		
	1	2	3
1) Do produto			
Produto		Milho	
Umidade inicial (% b.u.)	20,9	25,0	23,8
Umidade final (% b.u.)	13,3	14,5	15,0
Temp. da massa (°C)	37,0	37,6	37,2
Grãos trincados inicial (%)	12	13	14
Grãos trincados final (%)	67	60	55
Grãos quebrados inicial (%)	5	6	5
Grãos quebrados final (%)	11	19	21
2) Do ar (Temperatura)			
Ponto 1 (secagem) (°C)	95,5	92,2	90,5
Ponto 2 (secagem) (°C)	67,5	72,7	71,0
Ponto 3 (recirculação) (°C)	85,2	72,3	84,2
Ponto 4 (exaustão) (°C)	46,0	42,6	40,8
3) Do secador			
Vazão de ar (m ³ .h ⁻¹)		217.266,0	
Vazão específica (m ³ .h ⁻¹ .m ³ grão)		856,0	
Potência instalada (cv)		104,25	
4) Do combustível			
Tipo de combustível		Lenha	
Vol. de combustível hora (m ³)	4,1	3,9	3,5
Vol. de combustível (m ³)	14,5	19,5	17,5
5) Do desempenho			
Duração do teste (h)	3,5	5,0	5,0
Redução de umidade (%)	7,6	10,5	8,8
Redução umidade hora (%)	2,17	2,1	1,76
Massa de água retirada (kg)	15.575	21.820	18.395

Secador E

Tabela 13 – Resultados obtidos experimentalmente com secador E

Parâmetros	Teste		
	1	2	3
1) Do produto			
Produto		Milho	
Umidade inicial (% b.u.)	22,6	23,4	21,3
Umidade final (% b.u.)	14,4	13,1	14,8
Temp. da massa (°C)	31,9	33,1	34,6
Grãos trincados inicial (%)	16	15	13
Grãos trincados final (%)	73	69	70
Grãos quebrados inicial (%)	7	8	6
Grãos quebrados final (%)	16	23	13
2) Do ar (Temperatura)			
Ponto 1 (secagem) (°C)	63,6	84,2	63,2
Ponto 2 (recirculação) (°C)	68,6	65,4	67,2
Ponto 3 (secagem) (°C)	93,2	97,6	97,1
Ponto 4 (exaustão) (°C)	40,7	39,8	41,8
3) Do secador			
Vazão de ar (m ³ .h ⁻¹)		239.500,8	
Vazão específica (m ³ .h ⁻¹ .m ³ grão)		1172,6	
Potência instalada (cv)		122,0	
4) Do combustível			
Tipo de combustível		Lenha	
Vol. de combustível hora (m ³)	2,9	3,1	3,3
Vol. de combustível (m ³)	14,7	21,2	14,9
5) Do desempenho			
Duração do teste (h)	5	7	4,5
Redução de umidade (%)	8,2	10,3	6,5
Redução umidade hora (%)	1,64	1,47	1,44
Massa de água retirada (kg)	13696	16946	10908