

ALISSON LUIS BACH FERREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SECADOR INTERMITENTE DE FLUXOS
CONCORRENTES-CONTRACORRENTES PARA ARROZ PARBOILIZADO**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2003

ALISSON LUIS BACH FERREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SECADOR INTERMITENTE DE FLUXOS
CONCORRENTES-CONTRACORRENTES PARA ARROZ PARBOILIZADO**

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

APROVADA: em 19 de Março de 2003.

Prof. Juarez de Sousa e Silva
(Conselheiro)

Prof. Afonso Mota Ramos
(Conselheiro)

Prof. Evandro de Castro Melo

Dr. Sérgio M. Lopes Donzeles

Prof. Adílio Flauzino de Lacerda Filho
(Orientador)

Aos meus queridos pais, Helio e Avani, pelo exemplo de vida,

DEDICO.

AGRADECIMENTO

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

Ao professor Adílio Flauzino de Lacerda Filho pela orientação, amizade, participação irrestrita na execução deste trabalho e apoio constante.

Ao professor conselheiro Juarez de Souza e Silva pela amizade, apoio, valiosos ensinamentos e conselhos.

Aos professores conselheiros Afonso Mota Ramos e Jadir Nogueira da Silva pelas críticas e sugestões.

Ao professor Evandro de Castro Melo pelas críticas e sugestões.

Ao Dr. Sergio Maurício Lopes Donzeles pela amizade, contribuições e sugestões.

Ao professor Mario José Milman pela amizade, ensinamentos e por despertar meu interesse na área de Pré-Processamento de Produtos Agrícolas.

À professora Angela Pinto Maestrini pelos conselhos, orientação no curso de graduação e pela amizade.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial a José Gallinari Sobrinho pela colaboração em diversas etapas deste trabalho.

Aos funcionários do Setor de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, José Raimundo, José Eustáquio, Geraldo, Silas, Antônio, Edson e Sebastião pela colaboração para a realização deste trabalho.

Aos funcionários do Departamento de Tecnologia de Alimentos, José Geraldo, José Raimundo e Divino pela colaboração e dedicação.

Ao amigo Juan José Fonseca Palacin, pelo apoio, conselhos e incentivo.

Aos colegas de Pós-graduação Reginaldo Santos, Adriana De Grandi, Roberto Wagner, Lauri Radünz, Fabrizio Barbosa, Ester Rodrigues, Ana Elisa Santos, Stella Vieira, Ivanildo Santos, Fabrício da Silva e Júlio Cesar de Jesus pela ajuda, pela amizade, pelas idéias e incentivo.

À minha namorada Andréia Jacobo, pelo amor, pela amizade, pelo carinho, compreensão e companheirismo.

A minha irmã Helvânia, pelo apoio e amizade.

Aos meus companheiros de república, Marcio Koetz, Luis Camboim, Salomão Medeiros, Nori Griebler, Ricardo Amorin, Paulo Marçal, Solon Dantas Neto pelo apoio, amizade e agradável convivência diária.

Aos meus familiares, amigos, professores, e a todos que de alguma forma contribuíram para a execução 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 Armazenamento de Produtos Agrícolas, submetendo-se à defesa de tese, requisito indispensável para obtenção do título de "*Magister Scientiae*", em 19 de março de 2003.

CONTEÚDO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Secagem.....	5
2.1.1. Temperização durante o processo de secagem.....	6
2.1.2. Energia no processo.....	7
2.2. Parboilização.....	9
2.3. Beneficiamento.....	12
2.4. Parboilização e qualidade do arroz.....	13
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
3.1. Planejamento experimental.....	17
3.2. Cultivar utilizada.....	18
3.3. Processo de parboilização.....	18
3.4. Sistema de secagem.....	20
3.4.1. Secador intermitente de fluxos concorrentes-contracorrentes.....	21
3.4.2. Sistema para o aquecimento do ar.....	24
3.4.3. Sistema para movimentação do produto.....	24
3.4.4. Operação e avaliação do sistema de secagem.....	26
3.5. Instrumentação do sistema de secagem.....	27
3.5.1. Temperatura.....	27

3.5.2. Pressão estática.....	29
3.6. Ângulo de repouso e massa específica.....	30
3.7. Amostras.....	31
3.8. Umidade dos grãos de arroz parboilizado.....	33
3.9. Qualidade dos grãos.....	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	36
4.1. Características do ar observadas durante os procedimentos experimentais.....	37
4.2. Variação da umidade do produto em função do tempo.....	40
4.3. Câmara de secagem, resfriamento e repouso.....	45
4.4. Temperatura na massa de grãos.....	52
4.5. Massa específica.....	53
4.6. Ângulo de repouso.....	54
4.7. Energia.....	56
4.7.1. Energia elétrica.....	57
4.7.2. Entalpia específica.....	58
4.8. Qualidade do produto.....	59
4.9. Resultados observados experimentalmente.....	60
5. CONCLUSÕES.....	62
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
APÊNDICES.....	69
Apêndice A.....	70
Apêndice B.....	72

RESUMO

FERREIRA, Alisson Luís Bach, M.S., Universidade Federal de Viçosa, Março de 2003. **Desenvolvimento de um secador intermitente de fluxos concorrentes-contracorrentes para arroz parboilizado.** Orientador: Adílio Flauzino de Lacerda Filho. Conselheiros: Juarez de Sousa e Silva, Afonso Mota Ramos e Jadir Nogueira da Silva.

Com o objetivo desenvolver um sistema de secagem para arroz parboilizado, em função da importância social e econômica e da necessidade de mais informações técnicas e científicas sobre o processamento deste produto, foi projetado, construído e avaliado um sistema de secagem em lotes, intermitente, de fluxos concorrentes, com resfriamento em fluxos contracorrentes. Para realizar os testes utilizou-se arroz da cultivar Jequitibá. Para realização da parboilização do produto, o arroz seco em casca foi colocado em tanques com água à temperatura de 65°C, durante 210 minutos para realizar o processo de encharcamento dos grãos. Após foi autoclavado à temperatura de 110 °C e pressão de 0,6 kgf/cm², durante 10 minutos. Foram conduzidos três tratamentos de secagem, com três testes cada. Os testes foram realizados com temperaturas de secagem de 80, 100 e 120 °C. A umidade inicial do produto foi diferente para cada teste realizado. Para avaliação da qualidade do produto foi extraída uma quantidade de arroz parboilizado, de cada teste, para realizar secagem em terreiro, cujo objetivo foi obter a testemunha, visando comparar com o produto secado no sistema desenvolvido. Para avaliação da eficiência energética do sistema, mediu-se o

consumo de combustível e o consumo de energia elétrica. Com base nos resultados foi possível observar que a utilização de 120 °C no ar de secagem mostrou-se eficiente energeticamente e não danificou o produto; o teste de secagem realizado a 100 °C necessitou 58,3 e 22,2 % menos combustível que os conduzidos a 80 e 120 °C, respectivamente; e que a qualidade final do produto foi semelhante para todos os tratamentos.

ABSTRACT

FERREIRA, Alisson Luís Bach, M.S., Universidade Federal de Viçosa, March 2003. **Developing an intermittent dryer provided with countercurrent-concurrent flows for the parboiled rice.** Adviser: Adílio Flauzino de Lacerda Filho. Committee members: Juarez de Sousa e Silva, Afonso Mota Ramos and Jadir Nogueira da Silva.

The objective of this study was to develop a drying system for the parboiled rice as a function of the social and economical importance and the need for more technical and scientific information about processing this product. So, an intermittent batch-drying system provided with either concurrent flows and countercurrent cooling flows was projected, built and evaluated. The “Jequitibá” cv. was used to accomplishing the tests. To parboilize the product, the husk-dried rice were placed into tanks containing water at a temperature of 65°C, and was left there for 210 minutes to perform the grain soaking process. Then, the product was autoclaved at temperature of 110 °C and pressure of 0.6 kgf/cm² for 10 minutes. Three drying treatments were carried out with three tests each one. The tests were performed, by using three drying temperatures: 80, 100 and 120 °C. The initial moisture of the product was different for each test. To evaluate the quality of the product, an amount of the parboiled rice was taken from each test to be dried on the yard, aiming to obtain the control in order to compare the product dried in the developed system. To evaluate the system energy efficiency, the consumption of both fuel and electric power were measured. According to the results, the drying air temperature of 120° C

showed to be energetically efficient, besides not injuring the product; the drying tests accomplished at 100° C required 58.3 and 22.2% less fuel than those carried out at 80 and 120° C, respectively; the quality of the product was similar for all treatments.

1. INTRODUÇÃO

Várias são as técnicas utilizadas no preparo dos grãos para a sua conservação. A operação de secagem é a mais utilizada por apresentar maior viabilidade econômica.

O arroz é um produto de grande importância social e econômica por ser um dos principais cereais empregados na alimentação humana em todos os continentes. O seu uso na alimentação varia segundo os hábitos dos diferentes povos. Esta característica exige, na fase pós-colheita, o emprego de técnicas distintas para o seu preparo.

A umidade adequada para a colheita não é a mesma indicada para o armazenamento e beneficiamento dos grãos, por isso é indispensável o uso de secagem. Quando realizada de forma adequada, a secagem proporciona aos grãos a manutenção de suas qualidades nutritivas e organolépticas desde o armazenamento, beneficiamento e comercialização, até o consumo (BARBOSA, 2002)

Por ser o arroz um produto sazonal e de consumo constante ao longo do ano, o domínio das técnicas de secagem e armazenagem são fundamentais para a sua adequada utilização.

Os problemas encontrados na secagem de arroz com casca são similares aos de outros cereais, porém o arroz exige operação mais controlada em razão da suscetibilidade a quebras durante e após esta operação. Durante a secagem do arroz podem haver consideráveis perdas, sejam pela sua característica de sensibilidade, pelo método de secagem utilizado, pelo controle

térmico do ar de secagem ou pelas operações do equipamento (MILMAN, 2001).

O arroz é um dos constituintes básicos da alimentação da população brasileira e uma das principais fontes de vitaminas, sendo que o parboilizado apresenta teores mais elevados de vitaminas em relação ao natural. Dessa forma, o processo de parboilização do arroz apresenta-se como eficiente técnica para a elevação da qualidade alimentar, proporcionando melhoria da saúde de nossa população.

Por efeito da parboilização, os sais minerais e as vitaminas hidrossolúveis dissolvem-se juntamente com o amido. Devido ao cozimento parcial e à secagem rápida, esses nutrientes ficam retidos na cariopse, resultando em um produto rico em vitaminas que, após o beneficiamento, apresenta coloração amarelada e uniforme em decorrência do processo hidrotérmico.

Uma das principais vantagens do processo de parboilização está relacionada à significativa redução do percentual de grãos quebrados que apresenta o arroz beneficiado por este processo, se comparado ao rendimento apresentado pelo processo de beneficiamento do arroz natural.

O rendimento de grãos inteiros é o principal parâmetro a ser considerado na avaliação comercial do arroz para a avaliação da qualidade e do valor do produto final.

A operação de secagem do arroz parboilizado difere da realizada com o arroz natural em função da alta umidade e da temperatura com que o parboilizado sai do processo de parboilização. Por isso a etapa de secagem deste produto apresenta técnicas distintas.

Em função da importância social e econômica do produto e da necessidade de mais informações técnicas e científicas sobre o processamento de arroz parboilizado, o presente trabalho teve como objetivos: a) desenvolver e avaliar um sistema de secagem em lotes, intermitente, de fluxos concorrentes, com resfriamento em fluxos contracorrentes, para secar arroz parboilizado; e b) avaliar o consumo específico de energia do processo em função da variação da temperatura de secagem e a qualidade dos grãos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dentre as técnicas utilizadas para a conservação de grãos em ambiente natural, a secagem é a mais empregada por apresentar maior viabilidade econômica. Entretanto, as propriedades químicas, físicas e biológicas do produto, bem como sua finalidade, exigem o emprego de metodologia específica para a aplicação desta técnica.

O arroz, dentre os cereais cultivados no mundo, é o que mais se destaca por ser um dos principais alimentos empregados na dieta humana. O seu uso na alimentação varia segundo os hábitos dos diferentes povos. Esta característica exige, na fase pós-colheita, o emprego de técnicas distintas para o seu preparo.

O arroz é originário do sudeste asiático, havendo relatos de semeadura há cerca de 5000 anos, na China, de onde expandiu para outras partes do mundo, através da Índia. No século XVI, foi introduzido no Brasil por portugueses (GALLI, 1978). Hoje o arroz é uma das mais importantes culturas e um dos principais produtos que compõem a cesta básica, sendo a principal fonte energética dentre os grãos, constituindo a base da alimentação para mais de 50 % da população mundial (PEDROSO, 1982).

Esse cereal contribui com cerca de um quarto das calorias ingeridas pelos brasileiros, representa em torno de 15 % do gasto total com alimentos e possui consumo anual, per capita, de 45 a 55 kg, tomando-se por base o arroz beneficiado (JARDIM, 2000).

A Ásia é responsável por 90 % da produção mundial. Na América Latina, o Brasil se destaca como o maior produtor, com uma produção anual na ordem de 10,6 milhões de toneladas, quarto lugar em área plantada, com 3,23 milhões de hectares. O Rio Grande do Sul é o Estado com maior produção, com cerca de 45 % da produção brasileira (CONAB, 2002).

O arroz descascado ou esbramado é formado por pericarpo, tegumento e camadas de aleurona, gérmen e endosperma, sendo este último o maior constituinte do grão (HOSENEY, 1991).

O amido, principal carboidrato do arroz, constitui cerca de 90 % do produto branco polido. A amilopectina representa entre 63 e 92 % do amido e a amilose, entre 8 e 37 %. Grãos de arroz com alto teor de amilose têm maior tendência a retrogradação do amido. O rendimento de grãos inteiros aumenta com o aumento da relação amilopectina/amilose. A hemicelulose representa entre 1,42 e 2,08 %, em massa, no arroz descascado, e 0,61 a 1,09 % no brunido. Na casca e no pericarpo do grão encontram-se 43 % da hemicelulose, 8 % no embrião, 42 % no arroz polido e 7 % nas porções de endosperma presente no farelo obtido pelo polimento. A celulose tem distribuição desuniforme nas diversas partes do grão, estando 62 % do total, em massa, localizada no farelo, 4 % no embrião, e 34 % no arroz brunido. Dentre os carboidratos de estrutura mais simples destacam-se a sacarose, a rafinose, a glicose e a frutose, cujo conteúdo total no arroz descascado está compreendido entre 0,83 e 1,36 % (HOUSTON, 1972).

Na maioria dos países, inclusive no Brasil, o arroz é consumido na forma de grãos inteiros. Um dos critérios para estabelecimento do seu valor comercial é a relação entre grãos inteiros e quebrados. O Ministério da Agricultura e Abastecimento classifica o arroz em dois grupos: arroz em casca e arroz beneficiado. O grupo beneficiado apresenta os seguintes subgrupos: polido (arroz branco comum), integral (macrobiótico ou esbramado), parboilizado integral e parboilizado.

2.1. Secagem

O domínio das técnicas de secagem do arroz parboilizado, após o encharcamento e cozimento parcial sob pressão, é essencial para se obter um produto de qualidade após o armazenamento e beneficiamento.

Segundo MILMAN (2002), 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 na forma de vapor. A energia despendida pela evaporação da água é acompanhada pelo resfriamento do ar.

LACERDA FILHO et al. (1981) afirmaram que a operação de secagem de arroz é uma das mais difíceis de serem executadas, devido à alta susceptibilidade do produto a trincas e quebras posteriores. Desta forma, em trabalhos de avaliação de secadores para arroz, além da capacidade e eficiência energética, faz-se necessário analisar as qualidades do produto final.

GARIBOLDI (1972) afirmou que a secagem do arroz parboilizado em alta temperatura torna-o susceptível a trincas quando seu teor de água está entre 16 e 18 % bu. Recomendou que a secagem fosse feita empregando-se elevado volume de ar, sem intermitência, até o teor de água igual a 18 % bu. A partir deste valor a secagem deverá ser lenta, com intermitência, até que o produto atinja umidade igual ou próxima de 12 % bu.

Segundo BROOKER et al. (1992), a formação de trincas no grão é devido ao gradiente de umidade que se forma no seu interior, do centro para a periferia, pois este, tornando-se muito elevado, induz ao aparecimento de tensões.

SARKER et al. (1996) afirmaram que devido à perda de umidade, as células superficiais do endosperma contraem-se mais que as do seu interior, durante o processo de secagem. Tensões generalizadas nesta superfície induzem ao 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 as trincas.

Segundo Bhattacharya, citado por ELBERT et al. (2001), para a secagem de arroz parboilizado são utilizados vários métodos tais como: terreiros (sol ou sombra), secadores mecânicos utilizando alta temperatura, secador à vácuo e secador rotativo.

FONTANA (1986b), investigando sistemas de secagem em indústrias de parboilização, concluiu que: a) um secador de fluxos concorrentes, de estágios múltiplos, pode substituir vários secadores rotativos ou de coluna; e b) a instalação de um secador de fluxos concorrentes resultará em uma significativa redução de mão-de-obra e espaço, com melhor qualidade do produto.

2.1.1. Temperização durante o processo de secagem

A temperização, durante a operação de secagem de grãos, consiste em estabelecer um intervalo de tempo em que, no decorrer do processo, o produto não recebe ar aquecido. Várias pesquisas têm mostrado que este procedimento proporciona melhor qualidade ao produto, além de racionalizar o uso de energia.

Ali e Stipe et al., citados por VELLUPILLAI e VERMA (1986), afirmaram que, para o arroz parboilizado obter bom rendimento, a secagem deve ser interrompida temporariamente quando a umidade atingir valor próximo de 16 % bu, considerando que neste ponto a distribuição de umidade é mais uniforme. Afirmaram ainda, que tratamentos com secagem e temperização apropriadas podem ser a chave para se obter bom rendimento de grãos inteiros no processo de arroz parboilizado.

STEFFE e SINGH (1980) desenvolveram um modelo teórico para simular a secagem e a temperização do arroz em casca. O modelo se baseou na teoria de difusão líquida e assumiu que o grão de arroz era uma esfera com centro na parte do endosperma amiláceo e envolta por duas cascas concêntricas: uma representada pela parte constituinte do farelo e a outra, a casca propriamente dita, correspondente à parte externa. Verificaram o efeito da secagem sobre a temperização e concluíram que: a) a teoria de difusão líquida pode ser utilizada para simular a secagem e a temperização, quando considera-se o produto como uma esfera envolta por duas cascas concêntricas; b) durante a temperização pode-se utilizar os valores observados na umidade relativa intergranular para prever as variações na concentração de líquido na superfície do grão de arroz; c) a temperatura e o tempo de secagem ou a taxa de remoção de umidade durante a secagem têm efeito

sobre o tempo de temperização, sendo que a umidade inicial dos grãos e a umidade relativa de secagem apresentaram efeito mínimo sobre as variáveis mencionadas; d) o menor consumo específico de energia, durante a secagem em multipasses, foi obtido quando o tempo de temperização foi completo; e e) é importante o uso do tempo correto de temperização em secadores comerciais.

Thompson et al., citados por STEFFE et al. (1979), consideraram a necessidade de 12 horas para a temperização do arroz de grãos curtos para obter a completa redução no gradiente de umidade, quando secado de 23,6 para 11,6 % bu, com temperatura do ar igual a 54,5 °C e de temperização igual a 32,2 °C. Consideraram que este é o tempo necessário para que a pressão de vapor no interior do grão mantenha-se estabilizada.

Walker e Bakker-Arkema, citados por CAMPOS (1990), concluíram que, com o aumento do tempo de repouso, a distribuição de umidade no grão torna-se uniforme e que o tempo necessário para isso depende da temperatura do grão e da sua umidade.

STEFFE et al. (1979) estudaram o tempo mínimo requerido para a temperização do arroz em casca, em processo de secagem com elevada umidade inicial, utilizando a técnica de multipasses. Estudaram, também, o efeito do resfriamento, realizado imediatamente após a secagem, sobre a qualidade final do produto. Concluíram que: a) a temperização feita durante os intervalos de multipasses, na secagem de arroz com elevada umidade inicial, auxiliou na remoção de umidade e manteve o rendimento de produção, sem afetar o rendimento total; b) o resfriamento feito imediatamente após a secagem em multipasses pode reduzir o rendimento total e o de produção de grãos; e c) a redução de água, quando a umidade for elevada (31,1 % bu), pode ser entre 3 e 4,5 % bu por passe, quando a temperatura do ar for igual 38 °C e o tempo de temperização entre 20 e 35 minutos.

2.1.2. Energia no processo

WALKER e BAKKER-ARKEMA (1978) estudaram um secador de fluxos concorrentes para a secagem de arroz. Avaliaram os efeitos da temperatura do

ar de secagem, do fluxo de ar e de grãos, do tempo de temperização, do número de estádios de secagem sobre a qualidade do produto e o consumo específico de energia. Concluíram que:

a) em condições uniformes, a temperatura do ar de secagem proporcionou incremento na remoção de umidade e aumentou a temperatura dos grãos; b) o consumo específico de energia aumentou com o incremento da temperatura do ar de secagem; entretanto, a elevação na temperatura do ar de secagem, combinada com o elevado fluxo de grãos ou baixo fluxo de ar, resultou em menor consumo específico de energia; c) o arroz pode ser secado em secador de fluxos concorrentes, com fluxo de ar igual a $0,0378 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, à temperatura de $121 \text{ }^\circ\text{C}$ e fluxo de grãos igual a $0,17 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$, sendo possível secá-lo com ar à temperatura de $150 \text{ }^\circ\text{C}$ se o fluxo de grãos for alto e o de ar for baixo; d) a temperização não melhorou significativamente a razão de secagem pelo fato do secador em fluxos concorrentes permitir que o produto tenha umidade final mais uniforme; e e) é importante um estudo que defina qual o número adequado de estádios de secagem que o secador deverá possuir para a secagem de arroz.

Anderson, citado por MÜHLBAUER et al. (1978), projetou e avaliou um sistema de secagem em fluxos concorrentes, de estádio único, e de resfriamento em fluxos contracorrentes. Em comparação aos de fluxos cruzados, o sistema apresentou menor consumo específico de energia, reduziu a poluição do ar e os danos causados ao produto durante o processo.

Thompson, citado por BROOKER et al. (1974), trabalhou com secagem de milho, cuja umidade inicial era igual a 25 % bu, em secador de fluxos concorrentes de um estádio, com temperatura do ar de secagem igual a $148 \text{ }^\circ\text{C}$ e de resfriamento igual a $82 \text{ }^\circ\text{C}$, e obteve consumo específico de energia entre 4.185 e 5.120 kJ kg^{-1} de água evaporada. O autor acima citado afirmou que nos secadores de fluxos cruzados este consumo específico médio seria igual a 7.500 kJ kg^{-1} de água evaporada.

Para o aquecimento do ar durante o processo de secagem, pode ser utilizada qualquer fonte de calor, embora predomine o uso de combustíveis sólidos. A praticidade, o potencial energético, a disponibilidade e o custo são os parâmetros 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).

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.

2.2. Parboilização

A palavra “parboilizado” deriva da expressão em inglês “parboiled”, que é uma aglutinação de “partial” mais “boiled”, dando uma idéia de cozimento parcial (AMATO e SILVEIRA FILHO, 1988).

Segundo a legislação nacional vigente, representada pelas portarias de números 269, de 17/11/88, e 1, de 09/01/89, da Secretaria Nacional de Abastecimento do Ministério da Agricultura e Abastecimento, parboilização é definida como o “processo hidrotérmico no qual o arroz em casca é imerso em água potável, em temperatura acima de 58 °C, seguido de gelatinização parcial ou total do amido e posterior secagem”. O produto parboilizado é definido como “aquele que, ao ser beneficiado, apresenta uma coloração amarela e uniforme em decorrência do processo de parboilização utilizado para elevar o teor vitamínico e de sais minerais”.

Segundo FONTANA (1986b), a parboilização é um processo hidrotérmico no qual o amido do arroz é mudado de uma forma cristalina para uma forma amorfa. A água e o calor são os dois elementos principais no

processo. Portanto, a qualidade, quantidade, temperatura da água e intensidade de calor são parâmetros essenciais para a obtenção de um produto de alta qualidade.

O processo de parboilização é antigo e aplicado ao arroz em casca, antes do seu beneficiamento. Originário da Índia e de alguns países da África Equatorial, espalhou-se, mais recentemente, para outros continentes. Inicialmente foi utilizado com o objetivo de facilitar o descascamento. O encharcamento para maceração era feito em água à temperatura ambiente, seguido de tratamento com vapor e a posterior secagem em terreiro. As diferentes alterações químicas, físicas, físico-químicas, bioquímicas, estruturais e sensoriais, provocadas no produto, eram consideradas acidentais (GARIBOLDI, 1972). No Brasil, o processo de parboilização teve início no começo da década de 50, com a instalação de uma planta do processo “Malek” no Rio Grande do Sul e de outras de “Macerado a Frio” em Santa Catarina (AMATO e SILVEIRA FILHO, 1991).

GARIBOLDI (1974) afirmou que o objetivo principal do processo de parboilização é produzir modificações físicas, químicas e sensoriais nos grãos, com vantagens econômicas nutritivas e práticas. O processo de parboilização reduz a quebra de grãos durante o beneficiamento e aumenta o conteúdo de vitaminas e sais minerais, possibilitando a utilização do arroz danificado pelas condições ambientais antes da colheita ou durante a secagem.

No processo de parboilização, as operações correspondentes às do beneficiamento convencional são precedidas pelo tratamento hidrotérmico, que em geral consta de três etapas: lavagem e hidratação, gelatinização e secagem. A hidratação tem por finalidade promover a entrada de água no interior do grão, aproveitando a propriedade que tem o amido de absorver cerca de 30 % de sua massa em água, tomando o espaço ocupado pelo ar dentro do grão. A temperatura utilizada é inferior à de gelatinização e esse valor é específico para cada cultivar. Após a hidratação, o arroz é submetido à autoclavagem, cujo objetivo é promover a gelatinização do amido (ELIAS et al., 1996).

De forma geral, a parboilização no Brasil, sob a ótica de gelatinização, ocorre de duas maneiras: a utilização do processo “Malek” como base, denominado processo por autoclave; e a evolução do processo de maceração

a frio, chamado de processo estufa. A diferença principal entre elas está na forma como se fornece energia ao amido, uma vez que no primeiro se dá em autoclave e no segundo, em estufa cilíndrica rotativa (CARVALHO, 1998).

Segundo FONSECA et al. (s.d.), foram introduzidos melhoramentos no processo de parboilização com vistas a soluções, principalmente, de problemas higiênicos. Dentre eles foram relacionados: a) utilização de água quente durante a fase de maceração, para evitar a formação de substâncias pútridas e de fermentação, podendo a água ser reutilizada após reciclagem e filtragem; b) o emprego de autoclaves para assegurar boa distribuição de vapor e o alcance de temperaturas superiores a 100 °C; e c) emprego da secagem artificial, em secadores mecânicos, utilizando ar quente. Procurou-se, com os novos procedimentos, promover uma rápida e uniforme absorção de água e, ao mesmo tempo, evitar, ao máximo, a abertura de casca e a dissolução de certas substâncias, além de não permitir o início da germinação. É importante observar que a temperatura da água e o tempo de maceração têm influência sobre a solubilidade de substâncias, cor, aroma e sabor do produto final.

Dismopoulos e Müller, citados por FONTANA (1986b) estudaram o efeito da parboilização em três variedades de arroz. A parboilização causou aumento no teor de proteína do arroz beneficiado, aumentou o comprimento dos grãos e a qualidade do amido solúvel. O processo intensificou a coloração escura dos grãos beneficiados e diminuiu a absorção de água do arroz cozido.

O beneficiamento do arroz por parboilização permite atenuar danos causados aos grãos durante a secagem, como o trincamento e a desestruturação do amido, diminuindo o percentual de grãos quebrados, além de reduzir perdas de valor nutritivo e aumentar a digestibilidade. (AMATO e SILVEIRA FILHO, 1991; ROMBALDI et al., 1998; SILVEIRA, 2000; BARBOSA, 2002).

O arroz armazena sua energia no grão, predominantemente nas moléculas de amido que se formam nos amiloplastos e que são constituídas, basicamente, por polímeros de α -D-glicose: amilose e amilopectina. A relação amilose/amilopectina é fator preponderante na diferenciação do comportamento das cultivares de arroz, no encharcamento. Enquanto as cultivares, com teor de amilose abaixo de 30 %, têm maior facilidade de hidratação, aqueles com teores acima têm mais dificuldade de absorver água,

além de, proporcionalmente, reterem menor quantidade de água no seu interior (TAVARES et al.,1998; MÜLLER, 1999).

Com a evolução do processamento industrial, pelo desenvolvimento de novas técnicas, melhores equipamentos e maior conhecimento dos fatores atuantes no processo, a aceitação do arroz parboilizado tem tido melhoria significativa e contínua, a ponto de sua produção, em menos de duas décadas, passar de 5 para 20 % do total de arroz industrializado no país. Por outro lado, esses dados mostram que existe grande espaço no mercado (ELIAS, 1998).

2.3. Beneficiamento

Segundo a legislação brasileira, arroz beneficiado é o produto maduro que, depois de submetido a processo de beneficiamento, fica desprovido de sua casca (BRASIL, 1988).

Segundo ELIAS (1998), o beneficiamento do arroz pode ser feito pelos seguintes processos: parboilização, maceração ou convencional. O beneficiamento convencional é o mais aplicado no Brasil, sendo cerca de 80% do arroz consumido branco polido. Entretanto, este percentual tende a diminuir, pois o consumo de arroz parboilizado vem aumentando gradativamente.

A diferença operacional entre os processos de produções de arroz branco polido, parboilizado e integral está na operação de brunimento, realizada nos grãos brancos e parboilizados, após o descascamento, e não realizada no integral ou esbramado, que resulta diretamente da operação de descascamento (BRASIL, 1988).

A operação de descascamento é realizada após a limpeza dos grãos, sendo caracterizada pela remoção das glumelas dos mesmos. As máquinas que realizam esta operação são compostas por rolos que giram em sentido contrário, com velocidades diferentes, proporcionando, quando da passagem dos grãos por entre eles, tensões que resultam no seu descascamento. Os grãos descascados podem ser comercializados sob a forma de arroz integral ou serem brunidos (ELIAS et al.,1996).

O brunimento industrial clássico é realizado por equipamentos constituídos de duas partes principais: uma capa externa, constituída por uma chapa metálica perfurada com colunas de borracha dispostas verticalmente, espaçadas entre si, formando uma camisa sobre a parte interna e um cone de pedra giratório (MILMAN, 2001). A passagem do grão esbramado pelo interior do brunidor promove abrasão em sua superfície, removendo as camadas periféricas da cariopse (pericarpo, película do grão, nucela, aleurona, parte do endosperma amiláceo e gérmen), as quais originam o farelo. Na indústria, o polimento, dependendo do "lay-out" industrial, se realiza pela passagem sucessiva dos grãos de arroz por uma série de polidores até ser atingido o grau de polimento desejado, melhorando a aparência dos grãos. Alguns equipamentos utilizam microaspersão de água nessa operação (ELIAS, 1998).

A operação de brunimento retira os constituintes menores do grão, permanecendo quase só o endosperma, parte mais utilizada na alimentação humana, em cuja constituição predominam grânulos de amido poligonais, com tamanho entre 2 e 4 μm (BECHTELL & POMERANZ, 1980), juntamente com proteínas, gorduras, compostos minerais e outros.

A etapa final é a classificação, que é executada por vários equipamentos como: peneiras e cilindros alveolados ou "trieurs", que fazem a separação dos grãos por tamanho (comprimento), e máquinas dotadas de células fotoelétricas que fazem a separação por diferenças de cor e detectam a passagem de grãos de coloração fora do padrão estipulado, sendo os mesmos separados dos demais por jatos de ar (ELIAS, 1998).

O rendimento do grão é definido como sendo a relação entre os percentuais, em massa, entre os grãos inteiros e quebrados, resultantes do benefício do arroz em casca, enquanto a renda do benefício é o percentual de arroz beneficiado ou beneficiado e polido, resultante do benefício do arroz em casca (BRASIL, 1988).

2.4. Parboilização e a qualidade do arroz

Segundo Kunze e Choudury, citados por SHARMA e KUNZE (1982), o gradiente de umidade criado após a secagem tem potencial para proporcionar

danos aos grãos de arroz. Quando o gradiente de umidade acontece após a secagem, a umidade da porção central difunde-se para a porção superficial do grão, causando contração na superfície e expansão no centro devido à perda de água. Quando as forças de compressão sobre a superfície do grão excederem à tensão em seu interior, o grão poderá partir-se ou fissurar-se.

CHATTOPADHYAY e KUNZE (1986) estudaram as características de fissuras do arroz parboilizado e do arroz beneficiado natural utilizando duas variedades. No trabalho, desenvolveram procedimentos específicos para a operação de maceração e gelatinização. A secagem do produto parboilizado foi feita em ambiente à temperatura de 25 °C e umidade relativa de 48 %, durante sete dias. Após a secagem, amostras de arroz parboilizado e natural foram colocadas em câmaras que permitiam o incremento de umidade relativa. Concluíram que o tratamento hidrotérmico mínimo permitiu a restauração de todas as fissuras, eliminou os pontos denominados de "barriga branca" e proporcionou o mínimo de variação na coloração, considerando algumas combinações entre o tempo e a temperatura de encharcamento e de vaporização. Observaram que o arroz parboilizado, embalado e exposto em ambiente com elevada umidade relativa, sofreu menos fissuras que o arroz natural exposto às mesmas condições. Verificaram, ainda, que o arroz parboilizado e empacotado, em equilíbrio com umidade relativa igual a 44 %, necessitou de um incremento de 31 pontos percentuais na umidade do ambiente, para produzir fissuras. A percentagem de grãos fissurados, devido ao incremento na umidade relativa do ambiente, foi influenciada pela variedade, tanto para o arroz parboilizado quanto para o natural.

Dismopoulos e Müller, citados por FONTANA (1986b) , afirmaram que o grau de parboilização pode ser objetivamente avaliado pelos seguintes parâmetros: a) nível de amido solúvel; b) expansão dos grãos; c) reflectância na luz; d) absorção de água; e) taxa de hidrólise de lipídios; f) deterioração do farelo do arroz; e g) resistência à oxidação dos ácidos graxos.

CARVALHO (1998) avaliou a situação do setor parboilizador no Brasil, no que concerne à qualidade do processo, e para o desenvolvimento do trabalho coletou, amostras de 19 empresas parboilizadoras, das quais sete utilizavam o processo de parboilização em autoclaves, dez em estufas e duas em processo misto. Observou que as amostras de arroz, coletadas nas

indústrias que utilizavam o processo de autoclave, resultaram em um produto homogêneo quanto à gelatinização de grãos, enquanto através do processo estufa foram obtidos grãos excessivamente gelatinizados ao lado de grãos não gelatinizados. Para AMATO e SILVEIRA FILHO (1991) isto ocorre principalmente porque a transferência de calor no interior da autoclave, por vapor úmido, é mais eficiente que a condução efetuada pela chama direta sobre os cilindros rotativos no processo estufa. Este fato gera energia por calor seco e por contato de superfície, causando assim, desuniformidade na gelatinização dos grãos.

Segundo SILVA et al. (2000), a coloração final do produto está associada à variedade e à relação entre tempo e temperatura, durante a fase de encharcamento do arroz em casca. A rapidez com que a umidade é removida é de fundamental importância para a manutenção da qualidade do arroz parboilizado. Baixa velocidade de secagem poderá permitir o desenvolvimento de microrganismos. Por outro lado, a secagem rápida proporcionará maiores gradientes de temperatura e umidade entre o interior e a superfície dos grãos caso não haja um período de repouso.

Segundo BHATTACHARYA (1996), pressão, temperatura e tempo de gelatinização do arroz no processo de parboilização foram aspectos significativos nos parâmetros de escurecimento do grão. O escurecimento dos grãos de arroz foi observado quando as amostras foram parboilizadas por um tempo mais longo. Portanto, o autor sugere o uso de pressões relativamente baixas no processo de gelatinização, resultando em um produto de cor clara. Porém podem ser empregadas pressões mais altas (acima de 304 kPa de pressão absoluta), mas o tempo de gelatinização deve ser restringido a alguns minutos.

Sob o ponto de vista nutricional, o arroz parboilizado apresenta vantagens em relação ao arroz branco, principalmente no que se refere às vitaminas do complexo B, pois o aporte destas vitaminas é maior no parboilizado (GARIBOLDI, 1974).

CARVALHO et al. (1992) afirmaram que houve aumento no teor de vitaminas B1 e B2, quando o arroz foi parboilizado em ambos os processos de produção, autoclave e estufa. Observaram que os valores percentuais de vitaminas retidos durante a parboilização foram semelhantes para vitamina B1

nos dois processos utilizados no Brasil. Quanto à vitamina B2, tais teores foram ligeiramente superiores quando se utilizou gelatinização do grão por autoclave.

Informações obtidas em SINDARROZ (2002) e FRANCO (1995) revelam que o arroz parboilizado apresenta qualidades nutricionais superiores a do arroz branco polido, conforme os valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores nutricionais comparativos entre o arroz parboilizado e branco polido

Nutrientes	Branco natural (mg.100g ⁻¹)	Parboilizado (mg.100g ⁻¹)	Incremento (%)
Tiamina (vitamina B1)	0,07	0,44	84,09
Riboflavina (vitamina B2)	0,03	0,045	33,33
Niacina (vitamina PP)	1,6	3,5	54,28
Cálcio	24,0	60,0	60,00
Fósforo	94,0	200,0	53,00
Ferro	0,8	2,9	72,41
Sódio	5,0	9,0	44,44
Potássio	92,0	150,0	38,67

3. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido na Área de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Vegetais do Departamento de Engenharia Agrícola e no Departamento de Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal de Viçosa.

Para o desenvolvimento do experimento foram utilizados aproximadamente 2400 kg de arroz da cultivar Jequitibá, safra 2001/02, procedente da CEDAF/UFV - Central de Ensino e Desenvolvimento Agrário de Florestal - localizado em Florestal, Minas Gerais.

O produto foi colhido com umidade entre 22 e 25 % bu, secado e acondicionado em sacaria, sendo então transportado para o Setor de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Vegetais do Departamento de Engenharia Agrícola, onde foi armazenado em pilhas durante o período de maio/02 a janeiro/03.

3.1. Planejamento experimental

O experimento foi delineado para a execução em três tratamentos e três testes por tratamento, conforme se segue:

Tratamento 1 - Secagem com ar à temperatura de 80 °C;

Tratamento 2 - Secagem com ar à temperatura de 100 °C; e

Tratamento 3 - Secagem com ar à temperatura de 120 °C.

Deve-se mencionar que, para cada um dos testes de todos os tratamentos, foi extraída uma quantidade de arroz parboilizado para realizar secagem em terreiro pavimentado, com cimento, cujo objetivo foi obter a testemunha.

3.2. Cultivar utilizada

A cultivar Jequitibá é oriunda do cruzamento simples, envolvendo as cultivares Cica 9 e BR-IRGA 409, realizado pelo Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), sendo desenvolvida para o cultivo irrigado. A linhagem é precoce, com ciclo de maturação de 130-135 dias, apresentando ótima capacidade de perfilhamento e porte médio – 92 cm, adequado para lavouras irrigadas colhidas manualmente ou por meio de colheitadeiras.

Os grãos desta cultivar são classificados como longo-fino (tipo agulhinha) e possuem endosperma translúcido, atendendo as exigências dos consumidores brasileiros.

3.3. Processo de parboilização

O processo de parboilização do arroz foi feito em autoclaves, localizadas na Indústria de Conservas do Departamento de Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal de Viçosa.

Para realizar o encharcamento do produto, o arroz seco, em casca, foi acondicionado em sacos de juta e depois colocado nas autoclaves com água aquecida, cobrindo-se todo o produto (Figura 1 (a) e (b)). O encharcamento foi feito durante três horas, com água aquecida a 65 °C e à pressão atmosférica. A temperatura de encharcamento foi monitorada em intervalos regulares de 15 minutos, utilizando-se um termômetro ordinário de mercúrio, produzido em vidro. Para manter a água aquecida na temperatura desejada, regulava-se a entrada de vapor nas autoclaves, por meio de registros manuais. Para a determinação de tempo e temperatura de encharcamento foram realizados testes preliminares.



(a)



(b)

Figura 1 – Processo de encharcamento do arroz.

Imediatamente após o processo de encharcamento, drenou-se a água das autoclaves, para realização do processo de autoclavagem (Figura 2). Neste processo, o produto foi submetido à temperatura de $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ e pressão manométrica de $0,6\text{ kg}\cdot\text{cm}^{-2}$, durante 10 minutos. As leituras de pressão foram realizadas em um manômetro instalado na autoclave.



Figura 2 – Processo de autoclavagem do arroz.

Após o processo de parboilização, o produto foi transportado para a Área de Pré-Processamento e Armazenamento de Produtos Vegetais do Departamento de Engenharia Agrícola, para realização da secagem.

3.4. Sistema de secagem

O sistema de secagem (Figura 3) utilizado para o desenvolvimento do presente trabalho foi composto por um elevador de caçambas, para a movimentação do produto, um sistema para o aquecimento do ar de secagem e o secador intermitente de fluxos concorrentes-contracorrentes.

O elevador de caçambas e o secador intermitente de fluxos concorrentes-contracorrentes utilizados no experimento, foram projetados no Departamento de Engenharia Agrícola – UFV, e construídos pela metalúrgica Laert Benatti Ind. e Com. Ltda localizada no município de Visconde do Rio Branco, Minas Gerais.



Figura 3 – Vista parcial do sistema de secagem.

3.4.1. Secador intermitente de fluxos concorrentes-contracorrentes

Para realização dos testes de secagem, foi desenvolvido um secador experimental de seção circular, com diâmetro de 600 mm e altura total de 4000 mm. O equipamento foi dividido em três câmaras, sendo uma câmara de repouso superior, uma câmara de secagem central e uma câmara de resfriamento inferior. Entre cada uma das câmaras encontra-se um plenum, sendo o superior utilizado para admissão do ar quente, o central para exaustão e o inferior para admissão de ar à temperatura ambiente para proporcionar o resfriamento do produto em fluxos concorrentes (Figuras 4 e 5).

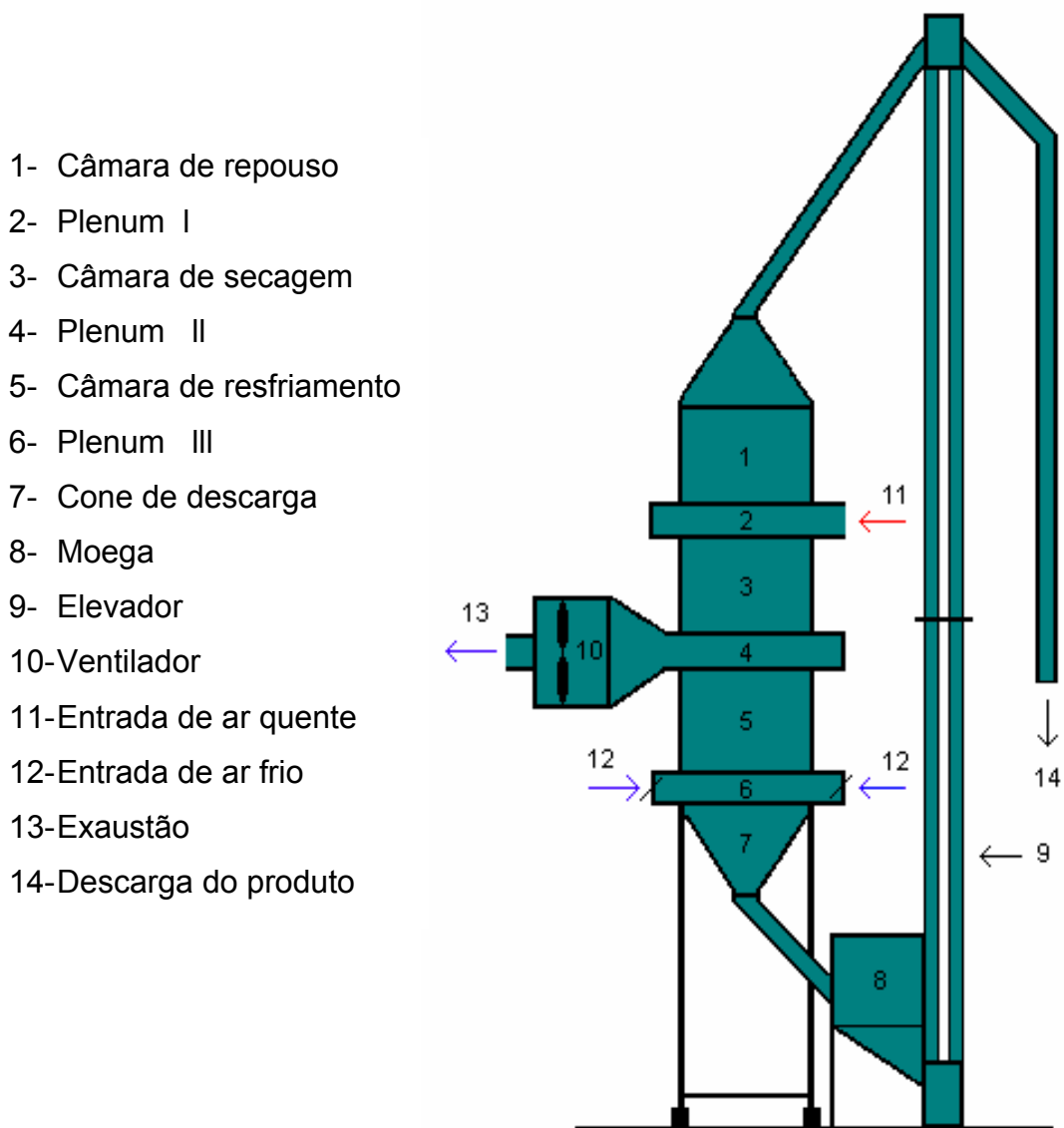


Figura 4 – Croqui: secador de fluxos concorrentes-contracorrentes.

As respectivas câmaras do secador desenvolvido e utilizado no experimento possuem os seguintes volumes e dimensões:

a) câmara de repouso - volume de $0,28 \text{ m}^3$, possui seção circular, com 600 mm de diâmetro e 1000 mm de altura;

b) câmara de secagem - volume de $0,11 \text{ m}^3$, possui seção circular, com 600 mm de diâmetro e 500 mm de altura;

c) câmara de resfriamento - volume de $0,11 \text{ m}^3$, possui seção circular, com 600 mm de diâmetro e 500 mm de altura;

d) espessura da camada de grãos na câmara de secagem de 400 mm; e

e) espessura da camada de grãos na câmara de resfriamento de 400 mm.

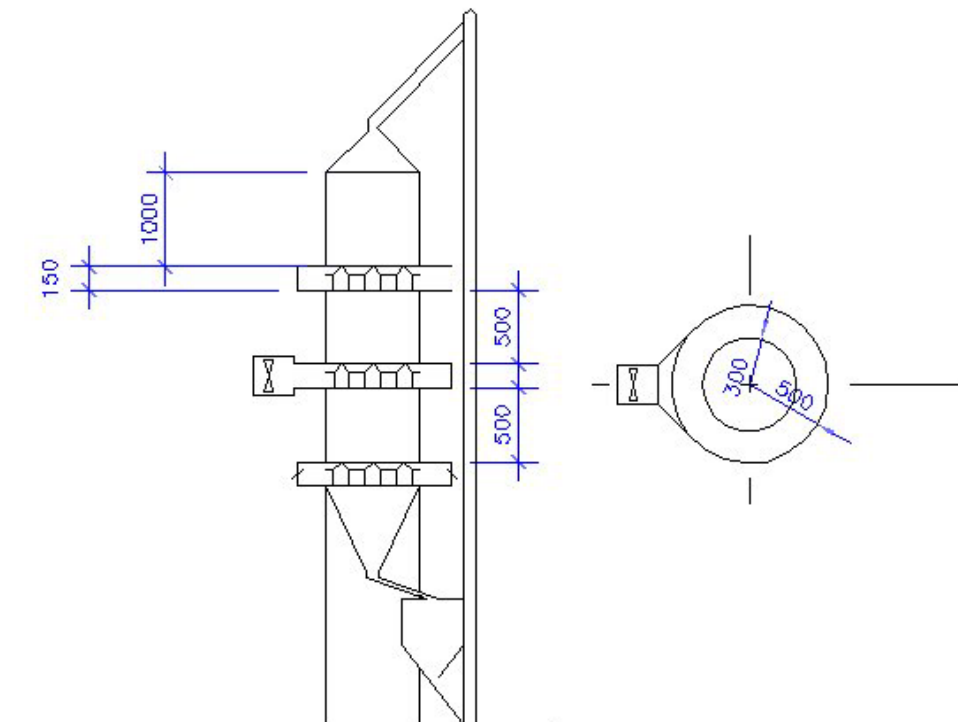


Figura 5 – Desenho do secador de fluxos concorrentes-contracorrentes (vista lateral e superior).

No interior de cada um dos plenums, encontra-se uma calha para entrada de ar no secador e passagem do produto. A calha localizada no plenum superior (Figura 6) foi confeccionada em chapa lisa, visto que o produto na câmara de repouso não é submetido à passagem de ar. As demais calhas,

localizadas nos plenums central e inferior, foram construídas em chapa perfurada (Figura 7 (a) e (b)), para facilitar e uniformizar a passagem de ar na massa de grãos, nas câmaras de secagem e de resfriamento.

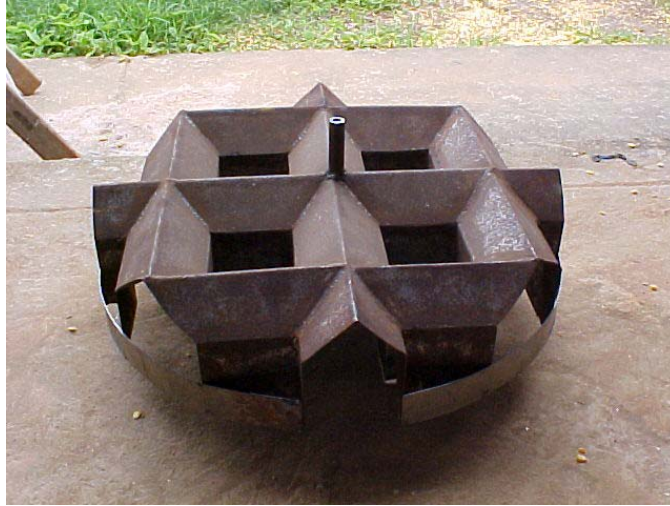


Figura 6 – Calha do plenum superior.



(a)



(b)

Figura 7 – a) Calha em chapa perfurada; b) calhas central e inferior.

O sistema de ventilação foi composto de um ventilador centrífugo, que operou em sucção, com potência elétrica igual a 735,5 W e uma vazão de ar de $7,2 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$. A curva de serviço do ventilador centrífugo utilizado no secador encontra-se no apêndice A.

3.4.2. Sistema para o aquecimento do ar

Durante o experimento foi utilizado o gás liquefeito de petróleo – GLP, como combustível para o aquecimento do ar utilizado para secagem do produto.

Foi construída uma câmara de alvenaria com duas aberturas, sendo a maior uma abertura para regular a entrada de ar ambiente, e a outra onde foi introduzido o queimador de GLP (Figura 8). Na parte superior desta câmara encontra-se o duto que conduz o ar aquecido para o secador.



Figura 8 – Câmara para queima do GLP.

Para o cálculo de GLP utilizado para o aquecimento do ar, pesou-se o recipiente que continha o gás no início e no final de cada teste. Pela diferença de peso calculou-se a quantidade de GLP consumida.

3.4.3. Sistema para movimentação do produto

Para a movimentação do produto, foi projetado um elevador de caçambas (Figura 9) com altura total de 5100 mm, capacidade para transportar 500kg de arroz por hora, com descarga centrífuga e com as seguintes características:

número de caçambas = 90;

rotações = 65 rpm;
diâmetro da polia inferior = 180 mm; e
diâmetro da polia superior = 180 mm.

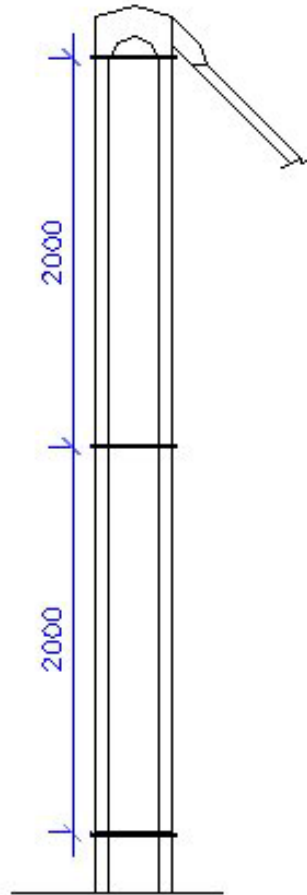


Figura 9 – Elevador de caçambas.

O acionamento do elevador foi feito por um motor de 735,5 W e 3600 rpm acoplado ao um redutor, dispensando, assim, o freio de retrocesso.

Para medir a velocidade ideal da polia de acionamento do elevador e minimizar o retorno de grãos no "pé do elevador", foi utilizado um variador de frequência acoplado ao motor de acionamento. Desta forma, variou-se a velocidade do motor, obtendo-se a velocidade ideal de serviço, de 65rpm.

3.4.4. Operação e avaliação do sistema de secagem

O sistema de secagem operou com lotes. A secagem do produto foi realizada em fluxos concorrentes e durante esta operação a câmara de resfriamento funcionou também como câmara de repouso.

Terminado o processo de secagem do produto, imediatamente iniciou-se o processo de resfriamento em fluxos contracorrentes; para isso interrompeu-se o fornecimento de calor no plenum de admissão de ar quente e regularam-se as aberturas do plenum de admissão de ar à temperatura ambiente. Durante o processo de resfriamento a câmara de secagem funcionou como repouso.

Para a avaliação energética do sistema de secagem, foi considerada a energia necessária para a movimentação e aquecimento do ar e para a movimentação dos grãos. Para a medição do consumo de eletricidade, utilizou-se um multímetro tipo alicate, no qual foram feitas leituras de tensão e corrente dos motores elétricos de acionamento do ventilador e do transportador em intervalos regulares de uma hora.

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, umidade inicial e final (% bu), índice de impureza (%), temperatura inicial (°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 (°C), umidade relativa do ambiente e de secagem; c) do secador: fluxo de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^2$), 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), tempos 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 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).

3.5. Instrumentação do sistema de secagem

3.5.1. Temperatura

Durante a secagem foram monitoradas as temperaturas do ar ambiente, do ar de secagem, de exaustão e da massa de grãos.

A temperatura do ar ambiente foi medida, durante a realização do experimento, em intervalos de tempo regulares de uma hora. Foi montado um abrigo meteorológico, conforme as normas estabelecidas pelo serviço de meteorologia do Ministério da Agricultura e Abastecimento. Neste abrigo foram instalados um psicrômetro e um termohigrógrafo. A temperatura do ar ambiente também foi monitorada por meio de termopares.

A temperatura do ar de secagem foi medida por meio de termopar, cujo sensor foi instalado na câmara plenum de entrada de ar aquecido. Para medição da temperatura da mistura entre a massa de grãos e o ar, instalou-se na câmara de secagem quatro termopares eqüidistantes de 100 mm, no centro e no sentido vertical da respectiva câmara.

A temperatura da mistura ar e grãos na câmara de repouso foi medida por meio de três sensores termoelétricos instalados, eqüidistantes 300 mm entre si, posicionados no centro e no sentido vertical da câmara. Na câmara de resfriamento, para o monitoramento da temperatura da mistura ar e grãos, foram instalados três sensores termoelétricos eqüidistantes 150 mm entre si, no centro e no sentido vertical da câmara (Figuras 10 e 11).

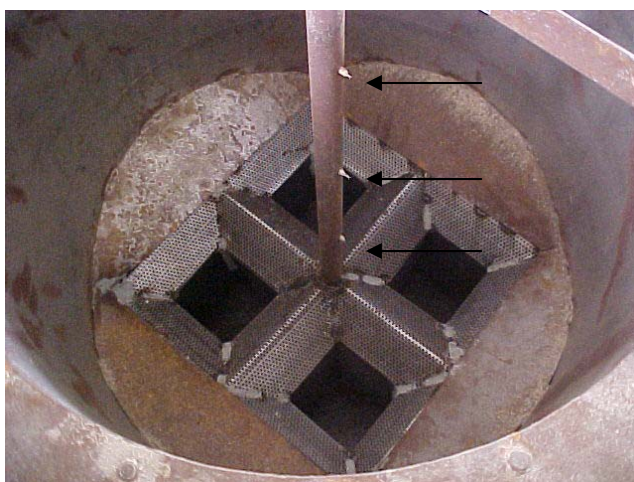


Figura 10 – Termopares instalados na câmara de resfriamento.

Para medir a temperatura de exaustão, instalou-se um sensor termoeletrico na tubulação de saída do ar. Todos os termopares utilizados para monitoramento da temperatura eram do tipo T, previamente calibrados.

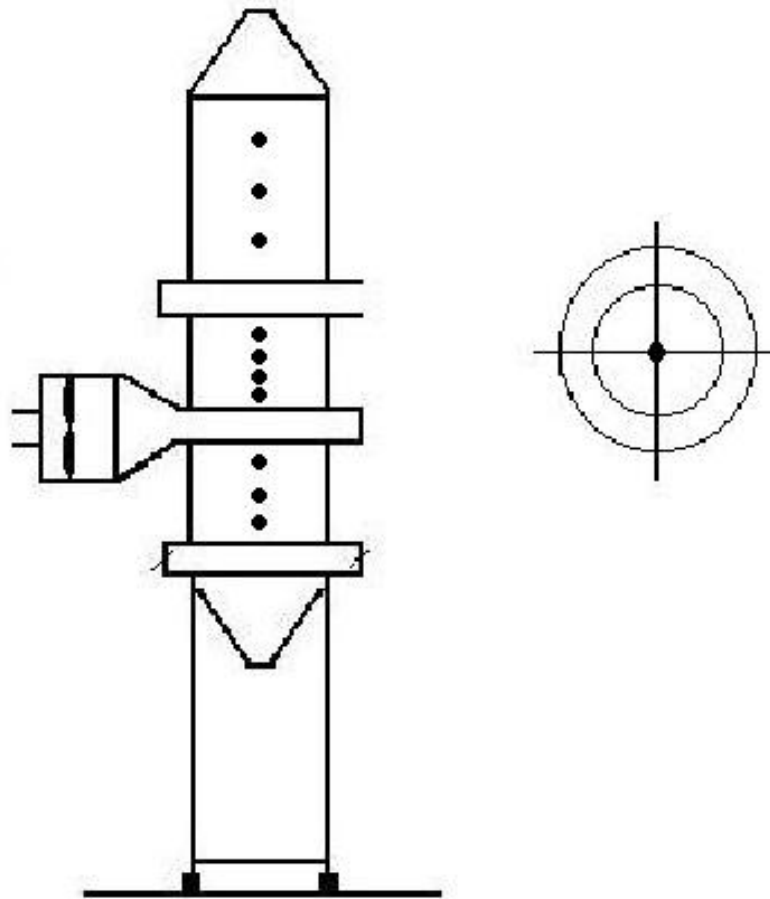


Figura 11 – Croqui: posição dos termopares no interior do secador.

Para o monitoramento da temperatura dos termopares, utilizou-se um sistema automático de aquisição de dados (Figura 12) marca LR.com, com capacidade para 16 leituras simultâneas por segundo, acoplado a um microcomputador, onde os dados de temperatura eram visualizados instantaneamente e armazenados em intervalos regulares de um minuto.

O programa utilizado para o armazenamento de dados no microcomputador foi desenvolvido em linguagem Turbo C++.

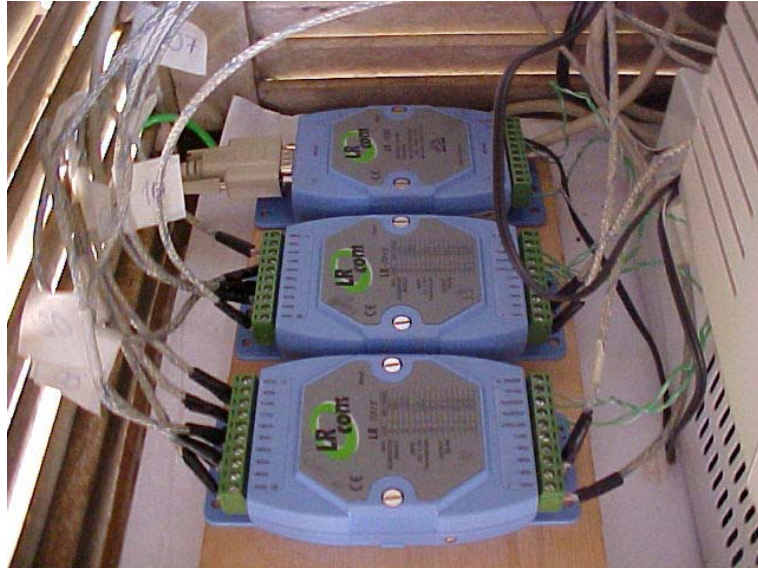


Figura 12 – Sistema automático de aquisição de dados.

3.5.2. Pressão estática

A pressão estática foi medida em três pontos da câmara plenum superior e central e em dois pontos da câmara plenum inferior, definidos pela interseção de diagonais imaginárias junto à parede do plenum, traçadas em um plano horizontal situado 75 mm abaixo do fechamento superior de cada plenum (Figura 13).

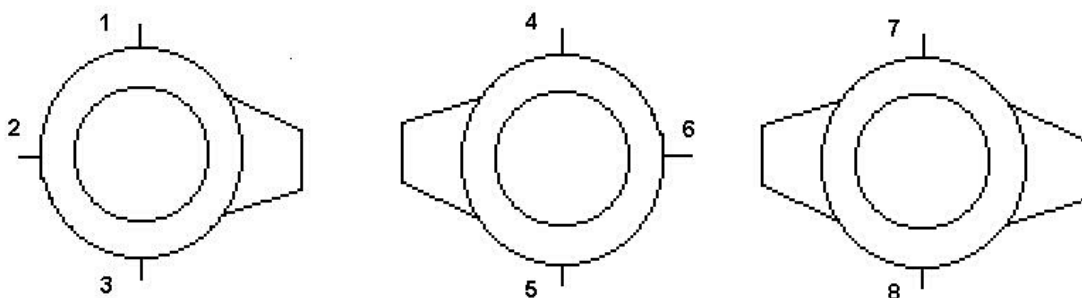


Figura 13 – Croqui: pontos de leitura de pressão estática, no plenum superior, central e inferior, respectivamente.

Para medição da pressão estática, foram fixados tubos de cobre com 6,4 mm de diâmetro e 50 mm de comprimento na parede das três câmaras plenum (Figura 14 (a) e (b)), que foram conectados a um manômetro diferencial inclinado, por meio de mangueiras, possibilitando a seqüência de uma leitura por ponto. As leituras de pressão estática foram feitas em intervalos regulares de uma hora.



(a) - interno

(b) - externo

Figura 14 – Tubos de cobre instalados nas câmaras plenum.

3.6. Ângulo de repouso e massa específica

Durante os testes de secagem, foram retiradas amostras do produto para medição de ângulo de repouso e peso hectolítrico em intervalos regulares de uma hora.

Para medição do ângulo de repouso do produto, utilizou-se um protótipo de um equipamento que mede este ângulo sem efeito de parede (Figura 15).

A massa específica das amostras foi medida em uma balança Dallemolle com capacidade de 250 cm³.



Figura 15 – Equipamento utilizado para medição do ângulo de repouso.

3.7. Amostras

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

Para retirada de amostras do produto durante o período de operação de secagem, foram feitas duas aberturas nas câmaras de repouso, duas na câmara de secagem e duas na câmara de resfriamento, totalizando seis pontos de coleta de amostras no secador (Figura 17). Nessas aberturas, foram fixados tubos de 40 mm de diâmetro para introdução de um calador (Figura 16). O calador utilizado possui quatro aberturas, 640 mm de comprimento e 22 mm de diâmetro.

Durante a secagem, amostras do produto foram retiradas das câmaras de repouso, secagem e resfriamento, em intervalos regulares de uma hora. As amostras foram acondicionadas em invólucros impermeáveis e levadas imediatamente ao laboratório para as análises de temperatura e umidade.



Figura 16 - Calador para retirada de amostras do produto.

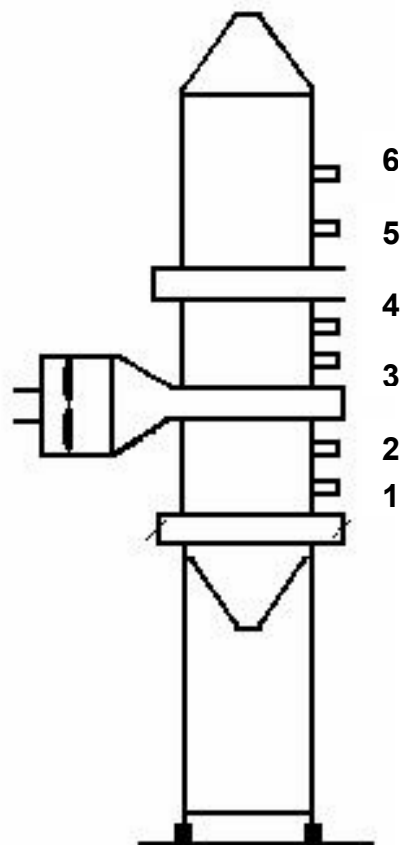


Figura 17 – Croqui: aberturas para retirada de amostras do secador.

3.8. Umidade dos grãos de arroz parboilizado

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

O método direto utilizado foi o definido pela "American Association of Cereal Chemists" em que é utilizada uma estufa com circulação forçada de ar. As amostras, com massa mínima de 50g, foram colocadas na estufa à temperatura de 105 ± 1 °C, durante 72 horas. Decorrido este tempo, o produto foi esfriado em dessecador durante 30 minutos e novamente medida sua massa. A razão estabelecida pela diferença entre as massas inicial e final e a massa inicial, forneceu o valor da umidade, em base úmida.

Com o objetivo de avaliar o método, subamostras obtidas da mesma amostra de trabalho permaneceram na estufa até que atingissem massa constante. A adoção deste procedimento se deve ao fato de que o arroz parboilizado é reumidificado, alterando as características físicas do produto e podendo interferir no resultado final da avaliação de umidade.

Devido ao tempo necessário para obtenção destes resultados, também foi utilizado um método indireto, em que uma parte de cada amostra analisada em estufa, também foi analisada em um medidor de umidade MOTOMCO, modelo 919, com o objetivo de obter leituras imediatas e, com isto, atender às necessidades da operação de secagem.

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

3.9. Qualidade dos grãos

A qualidade dos grãos foi avaliada considerando-se as variáveis relativas à classificação comercial do produto, atendendo ao artigo 1º da lei 9.972, de 25 de maio de 2000.

Foram beneficiadas três amostras de cada teste de secagem e comparadas com as amostras secadas no terreiro.

Foram realizadas as operações de descascamento, polimento e separação de quebrados conforme as Normas de Identidade, Qualidade, Embalagem e Apresentação do Arroz (BRASIL, 1988).

As amostras foram beneficiadas em engenho de provas Suzuki (Figura 18), previamente regulado para o cultivar e operado de acordo com as recomendações prescritas no manual de operação fornecido pelo fabricante.

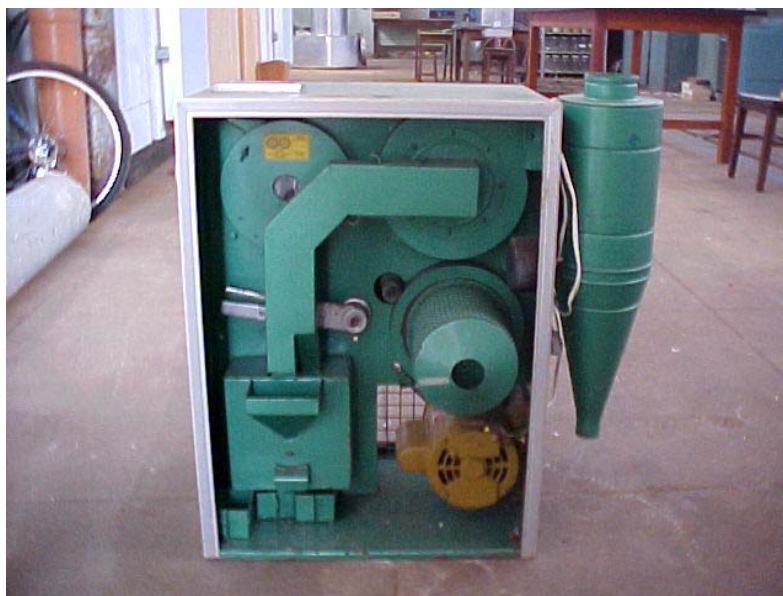


Figura 18 – Engenho de provas Suzuki.

As amostras foram submetidas ao descascamento no engenho de provas, de forma que aproximadamente 95 % dos grãos descascassem na primeira passagem. Os grãos que não tivessem sua casca removida na primeira passagem, denominados marinheiros, eram separados e levados novamente ao descascador.

O brunimento foi realizado no engenho de provas, onde as amostras descascadas permaneceram durante dois a três minutos no brunidor.

Na separação dos quebrados, foram utilizados os procedimentos oficiais estabelecidos pela "Norma de Identidade, Qualidade, Embalagem e Apresentação do Arroz", do Ministério da Agricultura e Abastecimento, em "Roteiro e Critérios Para a Classificação do Arroz" (Portaria nº 269 de 17 de novembro de 1988 do Ministério da Agricultura e Abastecimento).

A separação dos grãos quebrados, da quirera e dos inteiros, realizada no "trieur" (cilindro alveolado) do engenho de provas, foi completada

manualmente, sempre que necessário, com o auxílio de paquímetro, pinça e lupa.

Após o beneficiamento, calculou-se o rendimento de engenho, inteiros e quebrados para cada uma das amostras.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados experimentais de cada teste foram analisados independentemente e comparados sem testes de média, uma vez que cada teste de secagem não corresponde a uma repetição.

Para discussão dos resultados, foi escolhido aleatoriamente um teste de secagem de cada tratamento, conforme a metodologia proposta por BAKKER-ARKEMA et al. (1978). Os resultados dos demais testes de secagem estão apresentados no apêndice B.

Na Tabela 2 estão apresentados os valores dos resultados obtidos na avaliação de desempenho do secador.

Tabela 2 - Massa inicial e final, massa específica, umidade média dos grãos e tempo de secagem

Tratamento	Massa do lote (kg)		Massa específica (kg.m ⁻³)		Umidade média dos grãos (% bu)		Tempo de secagem (h)
	inicial	final	inicial	final	inicial	final	
T1 – t1	245	199,2	581,7	545,8	31,5	12,8	10
T2 – t1	245	208,7	590,2	548,0	29,2	14,3	6
T3 – t1	249	205,9	592,2	544,4	30,9	13,6	5

Observa-se na Tabela 2 que a massa inicial e final de produto foi semelhante, para todos os testes de secagem. Os resultados contidos nesta

tabela serão discutidos com mais propriedade nos itens 4.2 e 4.5, referentes à umidade e massa específica do produto.

4.1. Características do ar observadas durante os procedimentos experimentais.

Na Tabela 3 estão apresentados os valores das temperaturas médias do ar de secagem, exaustão e ambiente, umidades relativas médias do ar de secagem, exaustão e ambiente, para o primeiro teste de dos tratamentos 1, 2 e 3.

Tabela 3 - Temperaturas do ar de secagem, temperaturas médias do ar de secagem, exaustão e ambiente, umidades relativas médias do ar de secagem, exaustão e ambiente

Teste	Temperaturas médias do ar (°C)			Umidades relativas médias do ar (%)		
	Ambiente	Secagem	Exaustão	Ambiente	Secagem	Exaustão
T1 – t1	24,4	86,0	36,5	86,5	4,4	44,3
T2 – t1	30,4	95,7	42,6	54,8	2,7	27,7
T3 – t1	28,8	116,0	44,5	37,5	0,9	16,8

Observa-se, na Tabela 3, que durante os testes não foi possível fixar as temperaturas do ar de secagem em 80, 100 e 120 °C para os tratamentos 1, 2 e 3 respectivamente, sendo obtidos valores médios de $86,0 \pm 2,6$; $95,7 \pm 8,3$ e $116,0 \pm 5,5$ °C, respectivamente, para cada um dos testes, em consequência do sistema de regulação de aquecimento não apresentar um ajuste fino.

Verificou-se uma diferença substancial da umidade relativa média do ar ambiente no teste do tratamento 1 com relação aos demais, isso ocorreu em função deste teste ter ocorrido à noite, período em que a umidade relativa do ar ambiente é mais elevada. Este valor mais elevado de umidade relativa do ambiente no teste do tratamento 1 resultou em uma umidade relativa média do ar de secagem também mais elevada.

Nas Figuras 19, 20 e 21, observa-se a variação das temperaturas de secagem, exaustão e ambiente, para os testes correspondentes aos tratamentos 1, 2 e 3.

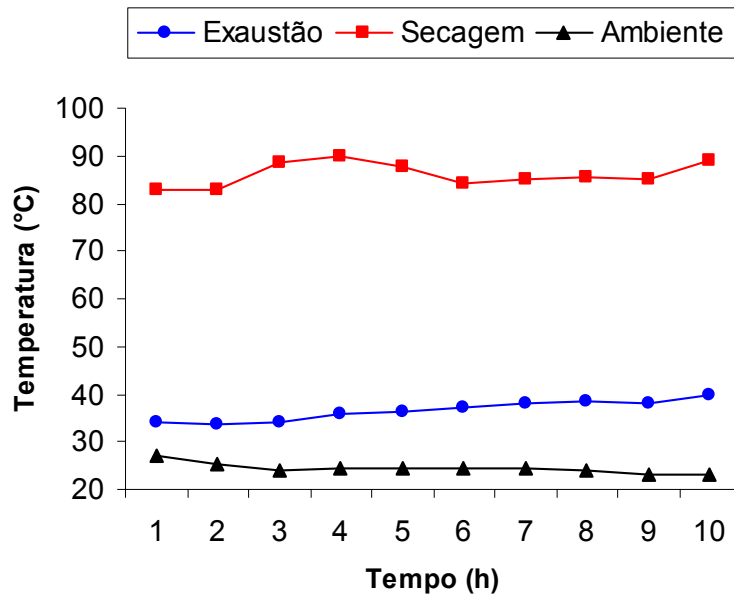


Figura 19 – Variação das temperaturas do ar de secagem, exaustão e ambiente, para o primeiro teste do tratamento 1.

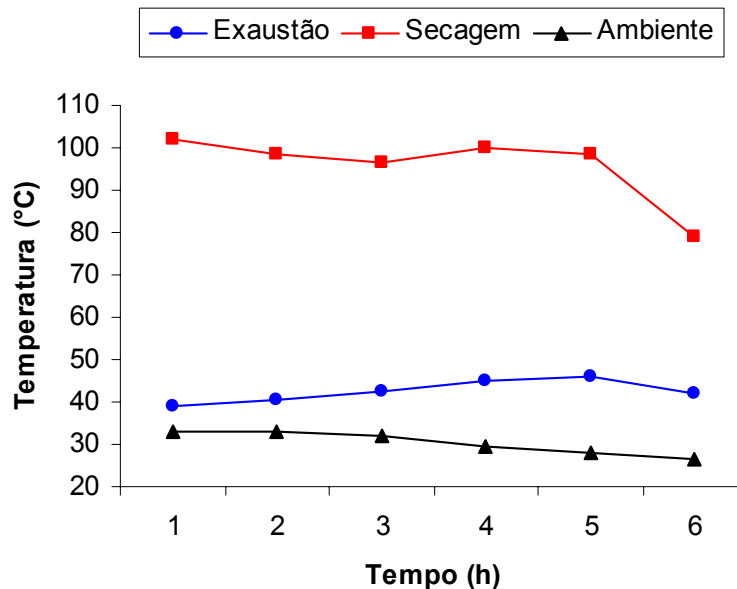


Figura 20 – Variação das temperaturas do ar de secagem, exaustão e ambiente, para o primeiro teste do tratamento 2.

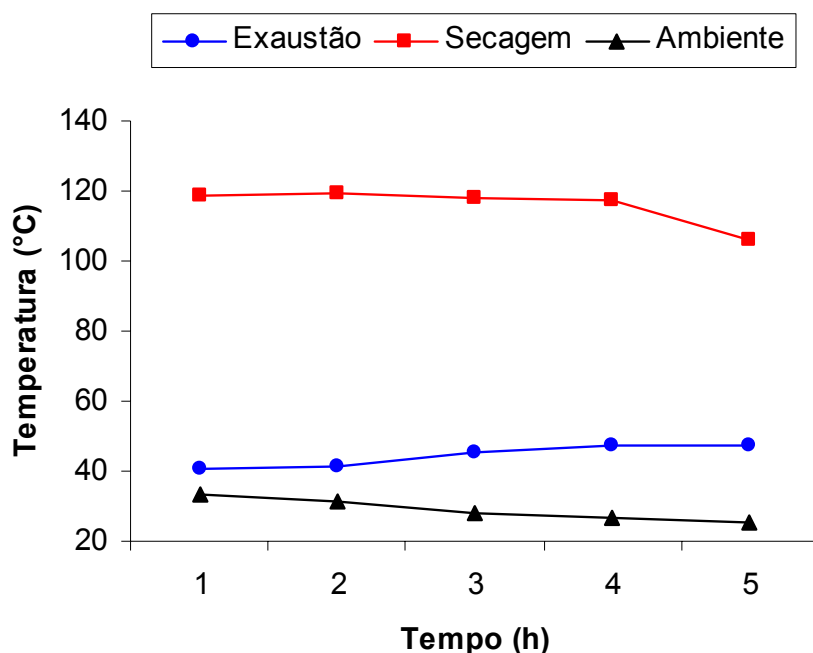


Figura 21 – Variação das temperaturas do ar de secagem, exaustão e ambiente, para o primeiro teste do tratamento 3.

A temperatura de exaustão apresentou valores médios de $36,5 \pm 2,1$; $42,6 \pm 2,7$ e $44,5 \pm 3,1$ °C, respectivamente, para cada um dos testes dos tratamentos 1, 2 e 3. Observa-se que no teste do tratamento 3 a temperatura de exaustão foi mais elevada que nos outros devido à temperatura de secagem ser mais alta (120 °C). É importante ressaltar que quanto menor os valores médios da temperatura de exaustão, maior é a umidade relativa de exaustão e consequentemente maior capacidade de absorção de água evaporada dos grãos, resultando em maior eficiência no processo. Observa-se pelas médias e pelos desvios em torno das médias da temperatura do ar de exaustão que a variação máxima observada ocorreu entre os testes dos tratamentos 1 e 3, para uma variação de aproximadamente 40 °C na temperatura do ar de secagem. Este resultado associado à qualidade final dos grãos evidencia a importância da intermitência e do sistema de fluxos concorrentes no processo de secagem de arroz, com vistas à maximização da qualidade final do produto e da eficiência energética.

No primeiro teste do tratamento 2 (Figura 20), verifica-se queda na temperatura do ar de secagem na última hora; isso ocorreu porque nos últimos 30 minutos deste teste resfriou-se o produto.

Na Figura 21, primeiro teste do tratamento 3, observa-se uma queda na temperatura de secagem, a partir da última hora de operação em função da diminuição da pressão do combustível, tornando impossível atingir a temperatura de secagem pré-fixada.

4.2. Variação da umidade do produto em função do tempo

Na Figura 22 são apresentadas as curvas de secagem de arroz parboilizado para o primeiro teste dos tratamentos 1, 2 e 3.

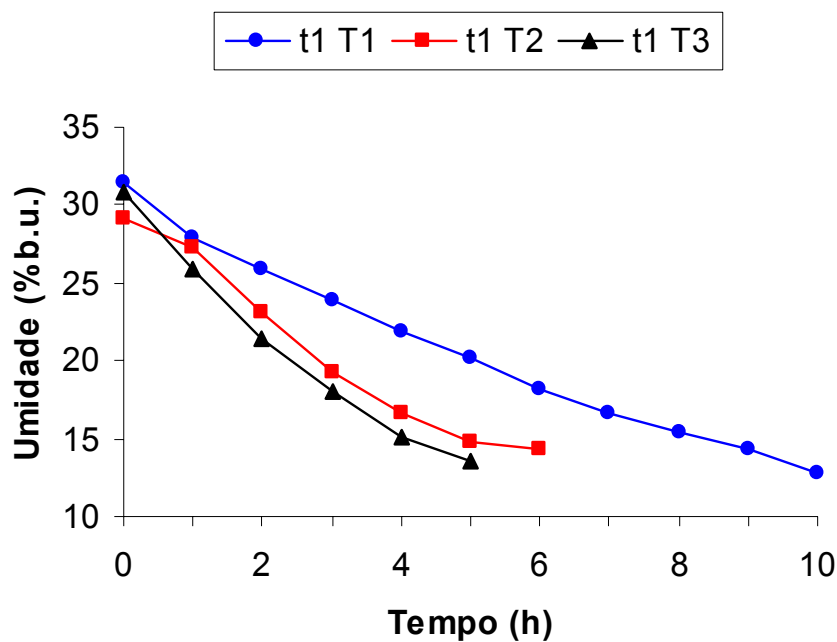


Figura 22 – Variação da umidade do arroz parboilizado em função do tempo, para o primeiro teste dos tratamentos 1, 2 e 3.

A umidade inicial do arroz parboilizado variou em cada teste de secagem, apresentando valores médios de $31,5 \pm 0,5$; $29,2 \pm 0,1$ e $30,9 \pm 0,3$ % b.u., para os testes relativos aos tratamentos 1, 2 e 3, respectivamente. Após o

processo de parboilização, observa-se pelas médias e pelos desvios em torno das médias da umidade inicial do produto, que este valor foi semelhante nos três testes de secagem realizados.

Examinando o comportamento exibido pelas curvas de secagem de arroz parboilizado, é possível observar que a variação da umidade dos grãos tem comportamento semelhante para os três tratamentos, diminuindo rapidamente nas primeiras horas de secagem e atenuando a redução da umidade a partir de então. Este comportamento é observado quando o produto apresenta elevado teor de água no início da secagem.

A umidade final do produto variou para cada teste, apresentando valores médios de $12,8 \pm 0,3$; $14,3 \pm 0,2$ e $13,6 \pm 0,5$ % b.u. para os testes relativos aos tratamentos 1, 2 e 3, respectivamente.

Observa-se nas curvas da Figura 22 que o tempo de secagem foi reduzido conforme o aumento na temperatura do ar, o que é um comportamento esperado. Também se observa que a curva de secagem, relativa ao tratamento 3 apresentou, durante o processo, valores de umidade inferiores aos dos tratamentos 1 e 2, indicando a condição de maior produtividade do sistema. Entretanto, observa-se que a umidade final dos grãos no tratamento 2 foi superior à dos demais.

A umidade final média do produto para o primeiro teste do tratamento 2, foi superior aos 13 % b.u. recomendado para armazenar o produto. Isto pode ter ocorrido devido ao resfriamento do produto feito nos últimos 30 minutos desta operação de secagem, caracterizando interrupção no processo.

O tempo de secagem variou para cada um dos testes, tendo duração de 10 horas para o primeiro teste do tratamento 1, 6 horas para o primeiro teste do tratamento 2 e 5 horas para o primeiro teste do tratamento 3. O tratamento 1 teve maior tempo de duração em função de ter sido executado com a temperatura mais baixa em relação aos demais. Além disso, foi conduzido à noite, quando o potencial do ar de secagem é inferior ao do dia, período em que demanda mais energia.

Nas tabelas 4, 6 e 8 estão apresentados os valores de umidade dos grãos, medidos pelo método indireto para o primeiro teste dos tratamentos 1, 2 e 3, respectivamente.

Nas tabelas 5, 7 e 9 estão apresentados valores de umidade dos grãos, determinados pelo método direto para o primeiro teste dos tratamentos 1, 2 e 3, respectivamente.

As amostras para determinação de umidade do produto durante o processo de secagem, foram retiradas em seis pontos do secador conforme a Figura 17.

Tabela 4 – Umidade dos grãos (% b.u.) do primeiro teste do tratamento 1, método indireto

Umidade dos grãos (% b.u.) – Método indireto - Capacitância											
Tempo (h)											
Posição	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	25,5	23,5	22,0	21,0	19,1	18,8	17,3	16,5	15,1	14,7	13,8
2	25,5	23,7	22,1	20,7	19,9	18,3	17,6	16,2	15,1	14,8	13,4
3	25,5	22,7	21,2	20,1	19,1	18,0	16,6	15,7	14,9	14,0	13,4
4	25,5	23,1	22,4	21,5	19,4	18,3	17,2	16,3	15,3	14,5	13,6
5	25,5	24,9	23,7	22,0	20,6	18,6	17,5	16,6	15,5	14,6	14,1
6	25,5	23,4	21,9	20,3	19,5	18,0	-	-	-	-	-

Tabela 5 – Umidade dos grãos (% b.u.) do primeiro teste do tratamento 1, método direto

Umidade dos grãos (% b.u.) – Método direto - Estufa											
Tempo (h)											
Posição	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	31,5	27,8	26,0	23,9	22,0	20,1	18,3	16,8	15,9	14,6	13,1
2	31,5	27,6	26,0	24,1	22,1	20,3	18,2	16,7	15,4	14,4	12,9
3	31,5	27,5	25,1	22,9	21,3	19,8	17,4	16,0	14,9	13,8	12,4
4	31,5	27,9	26,1	24,1	22,0	20,4	18,2	16,5	15,3	14,3	12,7
5	31,5	29,1	26,6	24,7	22,7	20,6	18,4	16,8	15,3	14,3	12,8
6	31,5	27,4	25,7	23,7	21,5	19,9	-	-	-	-	-

Os resultados contidos nas Tabelas 4 e 5 permitem avaliar o comportamento do medidor indireto de umidade dos grãos, em relação aos resultados observados pela determinação direta em estufa. Observa-se que os resultados do medidor indireto foram sub estimados em 23,5 %, em relação aos da estufa, considerando os teores iniciais de água. Para os teores finais de água o medidor super estimou estes valores em 6,4 %, aproximadamente.

Resultados desta natureza podem onerar o processo de secagem uma vez que conduzirá à maior redução no teor final de água, proporcionando redução excessiva de peso, maior tempo de operação, maior demanda de energia e de mão-de-obra, além de reduzir a qualidade do produto durante as operações de beneficiamento

É importante ressaltar que as medidas de umidade pelo processo indireto foram realizadas após a calibração da escala de temperatura do equipamento, conforme as instruções contidas no manual do usuário.

Tabela 6 – Umidade dos grãos (% b.u.), do primeiro teste do tratamento 2, método indireto

Umidade dos grãos (% b.u.) – Método indireto – Capacitância							
Tempo (h)							
Posição	0	1	2	3	4	5	6
1	25,7	22,1	19,6	16,8	15,8	14,2	14,1
2	25,7	23,0	20,6	18,0	16,5	14,3	14,2
3	25,7	22,3	19,3	15,8	14,4	13,3	14,2
4	25,7	23,3	20,3	17,8	16,0	14,5	14,1
5	25,7	24,2	21,6	18,8	15,8	14,8	14,6
6	25,7	23,5	19,4	18,5	-	-	-

Tabela 7 – Umidade dos grãos (% b.u.) do primeiro teste do tratamento 2, método direto

Umidade dos grãos (% b.u.) – Método direto – Estufa							
Tempo (h)							
Posição	0	1	2	3	4	5	6
1	29,2	26,8	23,0	19,4	16,8	15,0	14,6
2	29,2	27,4	23,1	20,0	17,1	15,0	14,4
3	29,2	25,8	22,0	17,1	15,4	13,7	14,1
4	29,2	27,6	23,2	19,6	16,8	14,8	14,3
5	29,2	28,9	24,7	20,5	17,2	15,0	14,2
6	29,2	26,9	22,3	19,2	-	-	-

Pelos resultados observados nas Tabelas 6 e 7, relativos ao primeiro teste do tratamento 2, verifica-se uma diferença de 11,9 % a menos nos resultados do teor inicial de água dos grãos medidos pelo processo indireto, em relação à estufa. Os resultados dos teores finais de água, medidos

indiretamente, foram sub estimados em 0,55 % em relação à estufa, o que é considerado aceitável para as condições de uso destes equipamentos.

Tabela 8 – Umidade dos grãos (% b.u.) do primeiro teste do tratamento 3, método indireto

Umidade dos grãos (% b.u.) – Método indireto – Capacitância						
Tempo (h)						
Posição	0	1	2	3	4	5
1	24,7	21,1	18,3	16,4	14,2	13,4
2	24,7	21,5	18,8	16,9	16,1	13,6
3	24,7	19,9	17,4	15,5	13,9	12,7
4	24,7	22,4	20,0	16,7	14,6	13,1
5	24,7	22,9	18,8	17,3	14,8	14,0
6	24,7	20,4	18,6	-	-	-

Tabela 9 – Umidade dos grãos (% b.u.) do primeiro teste do tratamento 3, método direto

Umidade dos grãos (% b.u.) – Método direto - Estufa						
Tempo (h)						
Posição	0	1	2	3	4	5
1	30,8	25,9	21,5	18,0	15,4	13,9
2	30,8	26,2	22,2	18,2	15,4	13,7
3	30,8	23,6	19,8	16,7	14,2	12,8
4	30,8	26,4	21,2	18,1	15,0	13,8
5	30,8	27,8	21,8	19,0	15,3	13,6
6	30,8	25,6	21,6	-	-	-

Tabelas 8 e 9, contêm os valores de umidade relativos ao primeiro teste do tratamento 3. Observa-se que, os resultados da medição indireta foram inferiores em 19,8 %, para os teores iniciais de água, em comparação às determinações da estufa. Para os teores finais de água esta diferença foi de 1,5 % o que pode ser aceitável para as condições de uso.

É importante ressaltar que os resultados das medidas iniciais de umidade apresentaram comportamento esperado, conforme informações contidas em literaturas. Os resultados relativos às umidades finais, para o primeiro teste dos tratamentos 2 e 3 estão em conformidade com a literatura.

4.3. Câmaras de secagem, resfriamento e repouso

As Figuras 23, 26 e 29, contêm as temperaturas observadas no plenum e na câmara de secagem, e as Figuras 24, 27 e 30 as temperaturas na câmara de resfriamento, para os testes do tratamento 1, 2 e 3, respectivamente. Ressalta-se que na câmara de secagem foram instalados quatro termopares, situados a 100, 200, 300 e 400 mm abaixo do fechamento do plenum superior com a câmara de secagem. Na câmara de resfriamento foram instalados termopares, situados a 150, 300 e 450 mm abaixo do fechamento do plenum central com a câmara de resfriamento (Figura 11).

As Figuras 25, 28 e 31 apresentam a variação dos teores de água (% b.u.) no interior da câmara de repouso durante a secagem para o primeiro teste dos tratamentos 1, 2 e 3, respectivamente.

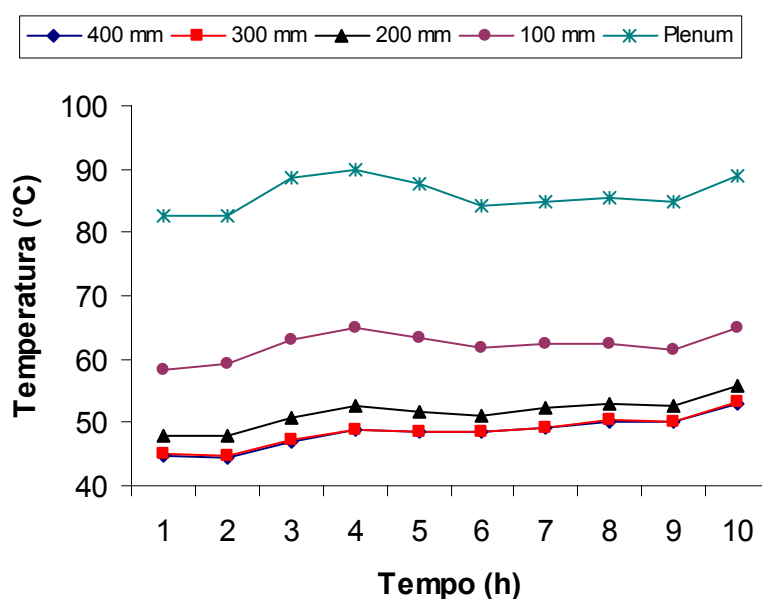


Figura 23 – Temperatura no plenum e na câmara de secagem a 100, 200, 300 e 400 mm de profundidade na massa de grãos, para o teste do tratamento 1.

A temperatura do plenum, para o primeiro teste do tratamento 1 (Figura 23), foi $86,0 \pm 2,6$ °C. Na câmara de secagem as temperaturas médias da mistura ar quente e grãos foram de $62,2 \pm 2,0$; $51,5 \pm 2,2$; $48,6 \pm 2,4$ e $48,5 \pm 2,4$ °C, respectivamente para 100, 200, 300 e 400 mm de profundidade na massa de

produto. Na Figura 24 observam-se os valores de temperatura de $29,3\pm 1,3$; $28,4\pm 1,3$ e $27,7\pm 0,7$ °C, na câmara de resfriamento, para as profundidades de 150, 300 e 450 mm, respectivamente, para o teste do tratamento 1.

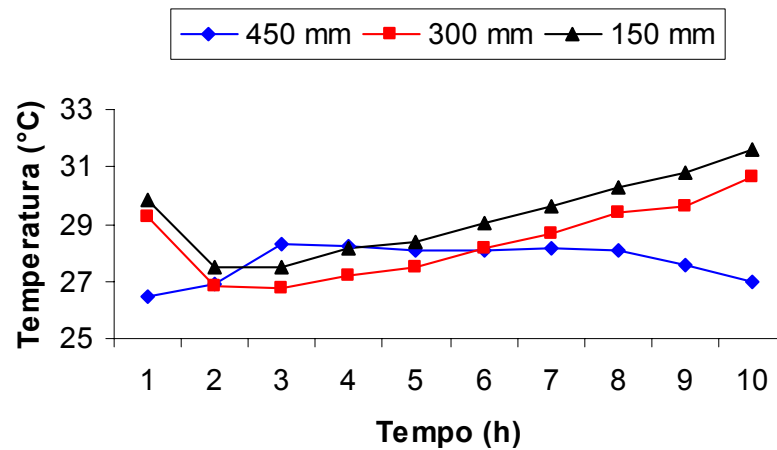


Figura 24 – Temperatura na câmara de resfriamento a 150, 300 e 450 mm de profundidade na massa de grãos, para o teste do tratamento 1.

Pela Figura 23 observa-se que o aquecimento do ar de secagem até $86,0\pm 2,6$ °C, proporcionou um aquecimento de $62,2\pm 2,0$ °C no nível superior da câmara de secagem, correspondente à distância de 100 mm do plenum superior. Na distância correspondente à 400 mm, a temperatura da mistura foi $48,5\pm 2,4$ °C. Este comportamento ocorre pelo fato de os grãos e o ar, no interior da câmara de secagem, estabeleceram uma trajetória de mesma direção e sentido.

O tempo de residência na câmara de repouso (Figura 4), permite a equabilização de água nos grãos tornando a sua superfície mais umedecida. A Figura 25 apresenta a variação de umidade do produto com o tempo, na câmara de repouso. Observa-se que a curva correspondente à espessura de 450 mm foi interrompida após 5 horas de secagem e apresentou menor teor de água em relação à curva correspondente à espessura de 150 mm. A interrupção ocorreu devido à redução do volume da massa de grãos o que corresponde a aproximadamente ao volume da água evaporada. A temperatura dos grãos nesta câmara variou entre 30 °C e 34 °C,

aproximadamente. Nestas condições o estresse térmico foi minimizado pelo fato dos grãos estarem com a superfície umedecida, ao receberem na câmara de secagem, ar com maior temperatura e menor umidade relativa.

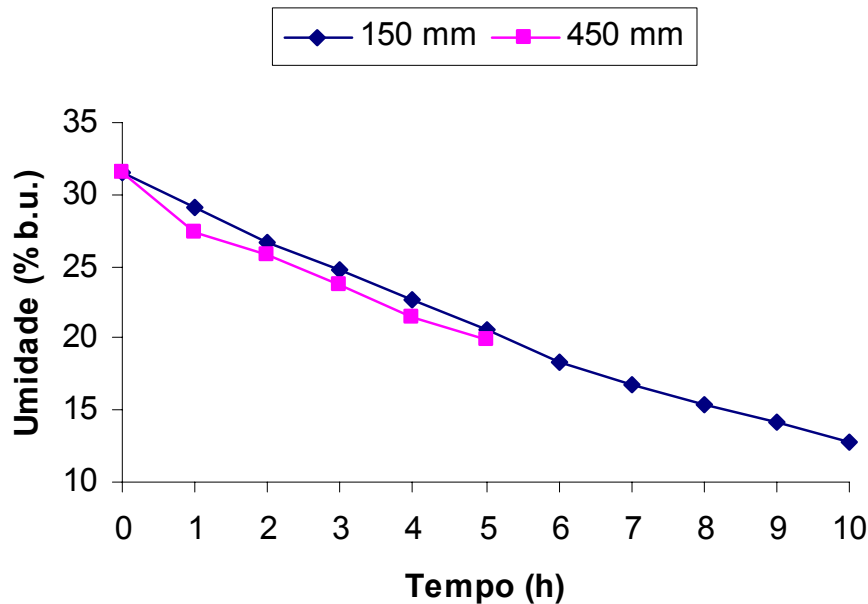


Figura 25 – Variação dos teores de água (% b.u.), no interior da câmara de repouso durante a secagem, do primeiro teste do tratamento 1.

A temperatura do plenum, para o primeiro teste do tratamento 2 (Figura 26), apresentou valor médio de $95,7 \pm 8,3$ °C. Na câmara de secagem as temperaturas médias foram de $81,2 \pm 10,4$; $64,4 \pm 6,1$; $61,1 \pm 5,0$ e $60,5 \pm 4,6$ °C, respectivamente para 100, 200, 300 e 400 mm de profundidade na massa de grãos. Observa-se que um incremento de 11,3 % na temperatura do ar de secagem, em relação ao primeiro teste do tratamento 1, proporcionou um aumento de 30,5 %, 25,0 %, 25,7 % e 24,7 % para os níveis de profundidade da camada de 100, 200, 300 e 400 mm, considerando o sentido do fluxo de grãos. Este comportamento na variação de temperatura da mistura ar e grãos, indica que houve evaporação da água dos grãos, incremento na razão de mistura do ar e manutenção da temperatura da massa produto nas camadas posteriores.

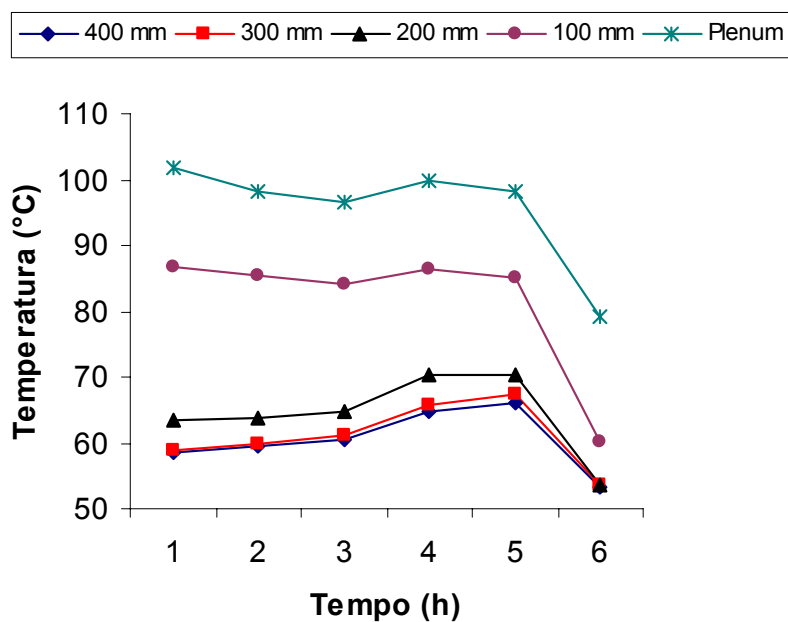


Figura 26 – Temperatura no plenum e na câmara de secagem a 100, 200, 300 e 400 mm de profundidade na massa de grãos, para o teste do tratamento 2.

Na Figura 27 teste do tratamento 2, obteve-se os valores médios de temperatura de $32,0 \pm 0,8$; $30,5 \pm 0,9$ e $26,9 \pm 1,3$ °C, na câmara de resfriamento, para as profundidades de 150, 300 e 450 mm, respectivamente.

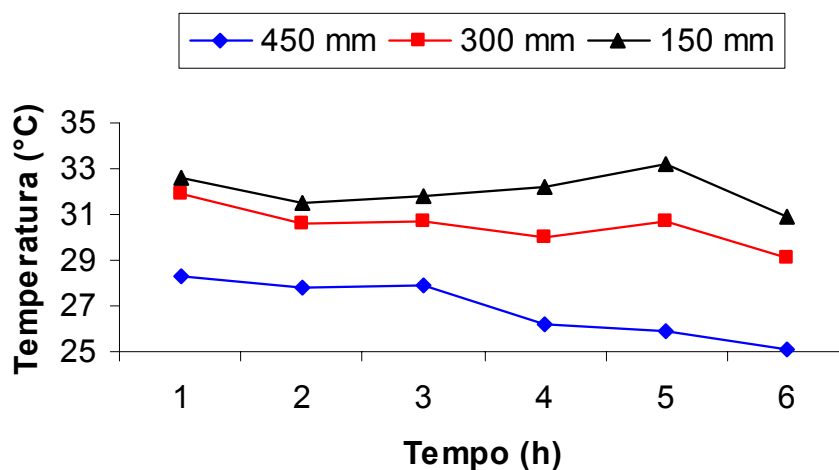


Figura 27 – Temperatura na câmara de resfriamento a 150, 300 e 450 mm de profundidade na massa de grãos, para o teste do tratamento 2.

Na Figura 27 observa-se que no primeiro teste do tratamento 2, o comportamento da temperatura na câmara de resfriamento foi diferente do

observado no tratamento 1. Isto ocorreu porque nos últimos 30 minutos do teste do tratamento 2, realizou-se o resfriamento da massa de grãos. Pode-se observar que, diferentemente do tratamento 1, a temperatura, na câmara de resfriamento, diminui na última hora do teste. Ressalta-se que o resfriamento não influenciou a qualidade final do produto.

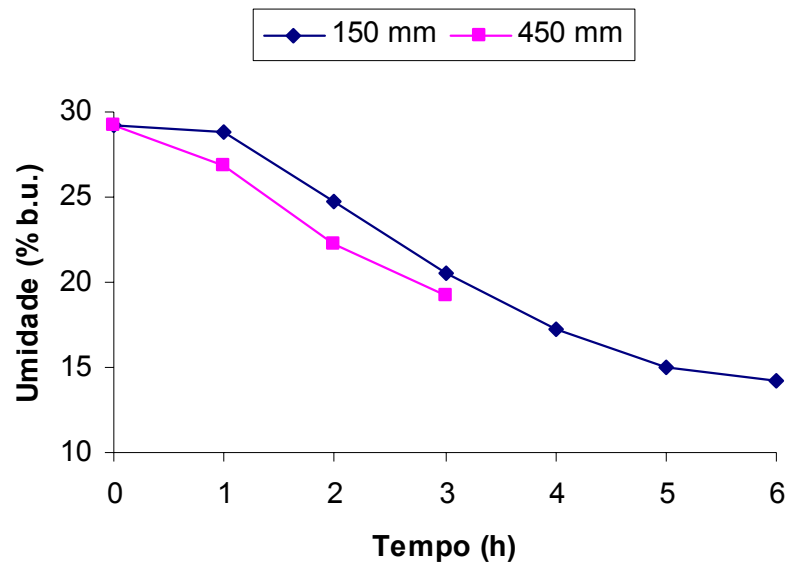


Figura 28 - Variação dos teores de água (% b.u.), no interior da câmara de repouso durante a secagem, do primeiro teste do tratamento 2.

Na Figura 28, observa-se que a curva de variação do teor de água, correspondente às amostras retiradas no nível de 450 mm da câmara de repouso, foi interrompida após 3 horas de secagem e apresentou menor teor de água em relação à curva correspondente à espessura de 150 mm. A interrupção ocorreu devido à redução do volume da massa de grãos o que corresponde a aproximadamente ao volume da água evaporada. Comportamento este semelhante ao teste do tratamento 1.

Para o teste do tratamento 3 (Figura 29), a temperatura do plenum, apresentou valor médio de $116,0 \pm 5,5$ °C. Na câmara de secagem as temperaturas médias foram de $96,6 \pm 6,8$; $76,3 \pm 2,2$; $69,3 \pm 2,2$ e $69,0 \pm 2,2$ °C, respectivamente para 100, 200, 300 e 400 mm de profundidade na massa de grãos. Observa-se que um incremento de 34,9 % na temperatura do ar de secagem, em relação ao primeiro teste do tratamento 1, proporcionou um

aumento de 55,3 %, 48,2 %, 42,6 % e 42,3 % para os níveis de profundidade da camada de 100, 200, 300 e 400 mm. Estes resultados comprovam a maior eficiência térmica do primeiro teste do tratamento 3 com relação ao tratamento 1. É importante ressaltar que este aumento de temperatura na câmara de secagem, não resultou em danos térmicos ao produto.

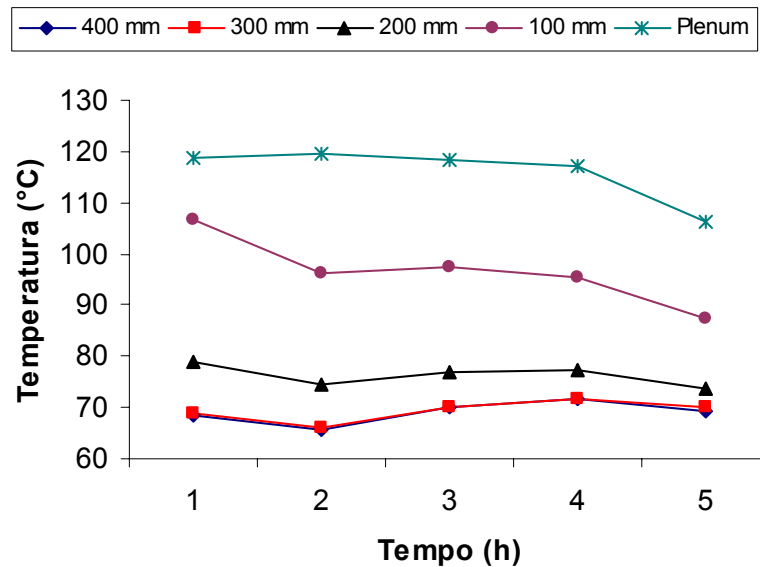


Figura 29 – Temperatura no plenum e na câmara de secagem a 100, 200, 300 e 400 mm de profundidade na massa de grãos, para o teste do tratamento 3.

Na câmara de resfriamento para o primeiro teste do tratamento 3 (Figura 30), obteve-se os valores médios de temperatura de $34,6 \pm 1,8$; $32,7 \pm 1,6$ e $31,0 \pm 2,6$ °C, para as profundidades de 150, 300 e 450 mm, respectivamente.

O comportamento da temperatura na câmara de resfriamento, observado no primeiro teste do tratamento 3 (Figura 30), foi semelhante ao observado no tratamento 1. Este comportamento era esperado considerando que em ambos os testes a massa de produto não foi resfriada. Observa-se que a temperatura, nos pontos mais próximos da câmara de secagem, com o decorrer do teste, aumentou gradativamente. Este comportamento indica que a câmara de resfriamento durante o processo de secagem, funciona como uma câmara de repouso.

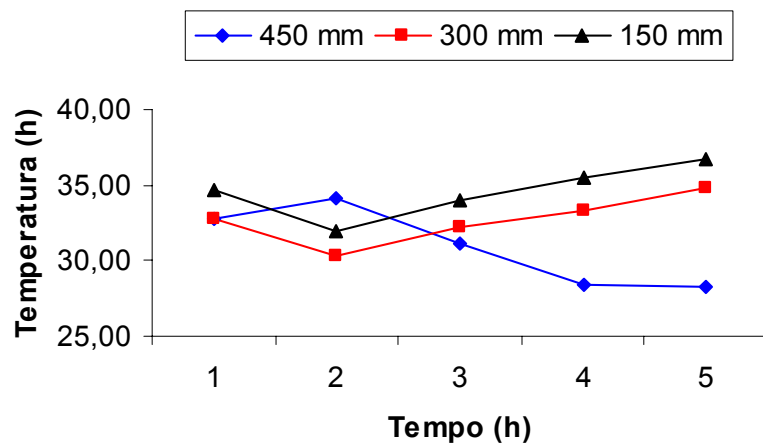


Figura 30 – Temperatura na câmara de resfriamento a 150, 300 e 450 mm de profundidade na massa de grãos, para o primeiro teste do tratamento 3.

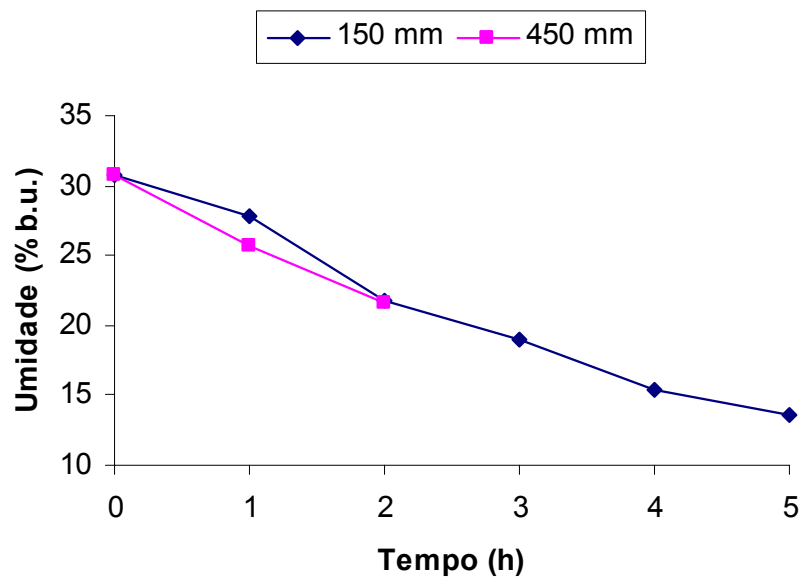


Figura 31 - Variação dos teores de água (% b.u.) no interior da câmara de homogeneização durante a secagem, do primeiro teste do tratamento 3.

4.4. Temperatura na massa de grãos

A temperatura da massa de grãos apresentou valores médios de $29,3 \pm 5,1$; $33,5 \pm 4,4$ e $36,1 \pm 4,6$ °C, para os primeiros testes dos tratamentos 1, 2 e 3, respectivamente.

Na Figura 32 observam-se as temperaturas da massa de grãos na câmara de secagem, para o primeiro teste dos tratamentos 1, 2 e 3.

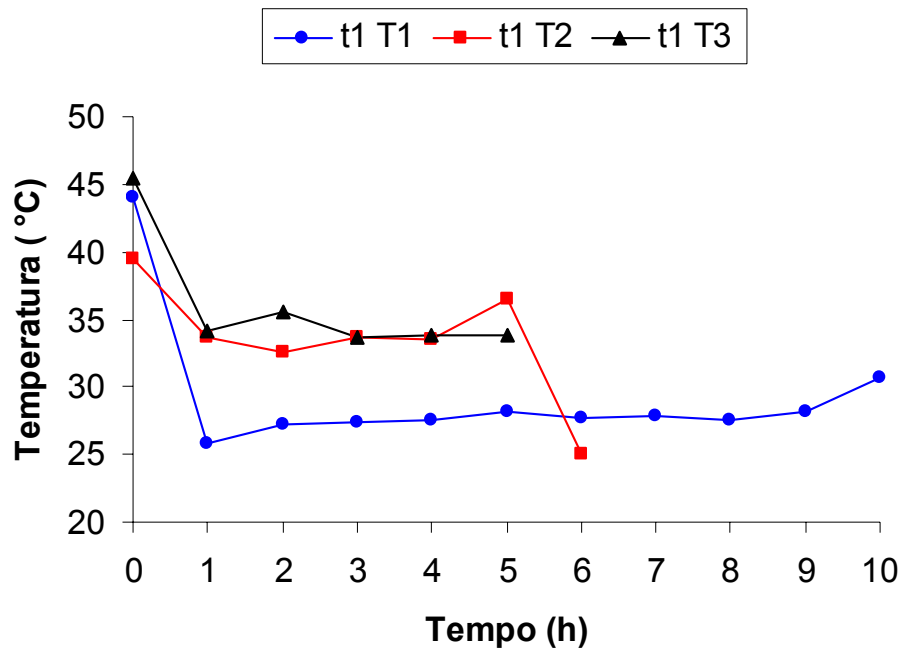


Figura 32 – Temperaturas da massa de grãos, na câmara de secagem, para o primeiro teste dos tratamentos 1, 2 e 3.

A temperatura inicial da massa de grãos, nos três tratamentos, apresentou valores elevados, visto que a operação de secagem do produto foi conduzida apenas três horas depois do final do processo de parboilização, que é realizado com alta temperatura.

Observou-se que a temperatura inicial da massa de grãos para o primeiro teste do tratamento 2, foi inferior à dos outros testes de cada tratamento em função de um maior intervalo de tempo para o início do processo de secagem do produto. Também verificou-se que, para o mesmo teste, a temperatura da massa de grãos, na última hora de secagem reduziu

consideravelmente, isto ocorreu devido que, nos últimos 30 minutos desta operação de secagem foi realizado o resfriamento do produto.

Examinando o comportamento da temperatura da massa de grãos na Figura 32, é possível observar que após o início da secagem a mesma não ultrapassou 43 °C, conforme observações de ELIAS (1998).

Os resultados permitem afirmar que para a temperatura de ar de secagem de 116,0±5,5 e 95,7±8,3 °C, a temperatura na massa de grãos foi 36,1±4,6 e 33,5±4,4 °C, respectivamente. Verificou-se que uma variação de aproximadamente 20 °C na temperatura do ar de secagem resultou em uma variação de aproximadamente 3 °C na massa de grãos. Para as condições experimentais, depreende-se que a utilização de temperaturas mais elevadas podem ser indicadas, desde que realizadas análises energética, de qualidade e de custo, visto que o tempo de secagem no tratamento 3 foi inferior em uma hora em relação ao tratamento 2 e em cinco horas em relação ao tratamento 1, mantendo a qualidade dos grãos.

4.5. Massa específica

A massa específica do arroz é função do volume, da massa e do teor de água dos grãos.

Na Figura 33 é apresentada a variação da massa específica do produto em função da variação de umidade durante a secagem, para o primeiro teste dos tratamentos 1, 2 e 3.

A massa específica inicial do arroz parboilizado variou durante a secagem, apresentando valores de 581,7; 590,2 e 592,2 kg.m⁻³, para os testes relativos aos tratamentos 1, 2 e 3, respectivamente.

A massa específica final também variou em cada teste de secagem, apresentando valores de 545,8; 548,1 e 544,4 kg.m⁻³, para os primeiros testes dos tratamentos 1, 2 e 3, respectivamente.

A curva referente ao primeiro teste do tratamento 1 apresentou um comportamento diferenciado em relação aos demais. Atribui-se a este comportamento, possíveis erros experimentais, além da inexistência de um

fator de correção para os resultados de medição da balança de peso hectolítrico, para arroz.

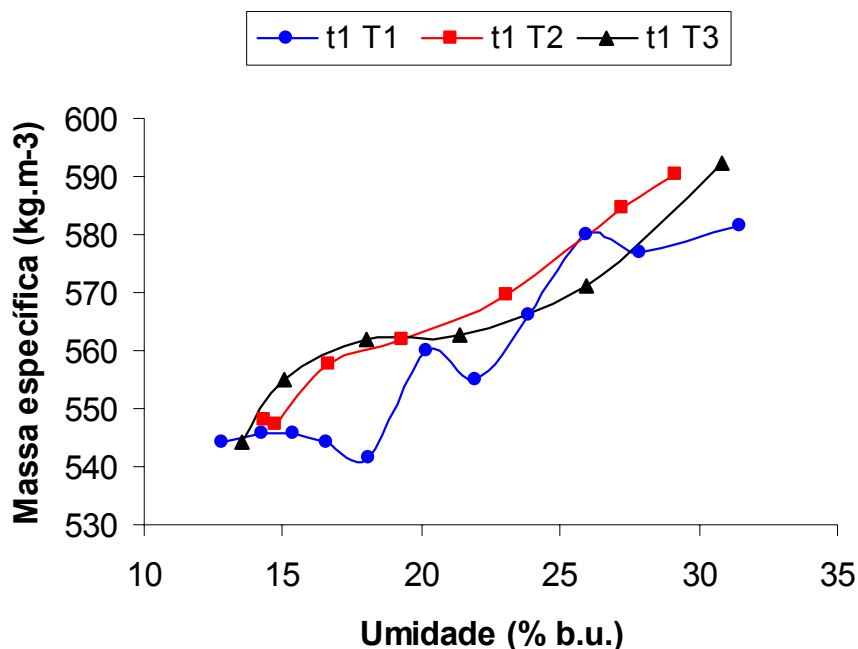


Figura 33 – Massa específica do arroz parboilizado em função da umidade, para o primeiro teste dos tratamentos 1, 2 e 3.

Observou-se uma redução da massa específica do arroz parboilizado em função da redução de umidade, este comportamento foi semelhante nos três tratamentos. A redução da massa específica, ocorreu devido à remoção de água dos capilares dos grãos. Admite-se que estes espaços foram ocupados com ar, que possui massa específica menor que a água, conforme FONTANA (1986a).

Pelos resultados apresentados na Figura 33 observa-se que a temperatura de secagem não influenciou os valores finais da massa específica, considerando as condições experimentais.

4.6. Ângulo de repouso

O ângulo de repouso aumenta com o aumento da umidade do produto, apresentando um comportamento que tende à linearidade para os teores de água entre 13 e 30 % b.u. (FONTANA, 1986a).

Na Figura 34, apresenta-se a variação do ângulo de repouso do produto em função de sua umidade, durante secagem para o primeiro teste dos tratamentos 1, 2 e 3.

O ângulo de repouso do arroz parboilizado úmido variou em cada teste, porém com valores próximos. Estes valores foram de 35,7; 36,5 e 35,7° para os primeiros testes dos tratamentos 1, 2 e 3, respectivamente.

No primeiro teste do tratamento 3, o ângulo de repouso dos grãos secos, foi relativamente menor que para os outros tratamentos, apresentando um valor de 28°, enquanto os testes dos tratamentos 1 e 2 apresentaram 29,9 e 30,3° respectivamente.

Verificou-se que a redução do ângulo de repouso do arroz parboilizado em função da redução de umidade, teve um comportamento próximo do linear para os três testes de secagem. Este comportamento está de acordo com o relatado por outros autores (MOHSENIN, 1970; BROOKER et al, 1974; FONTANA, 1986a).

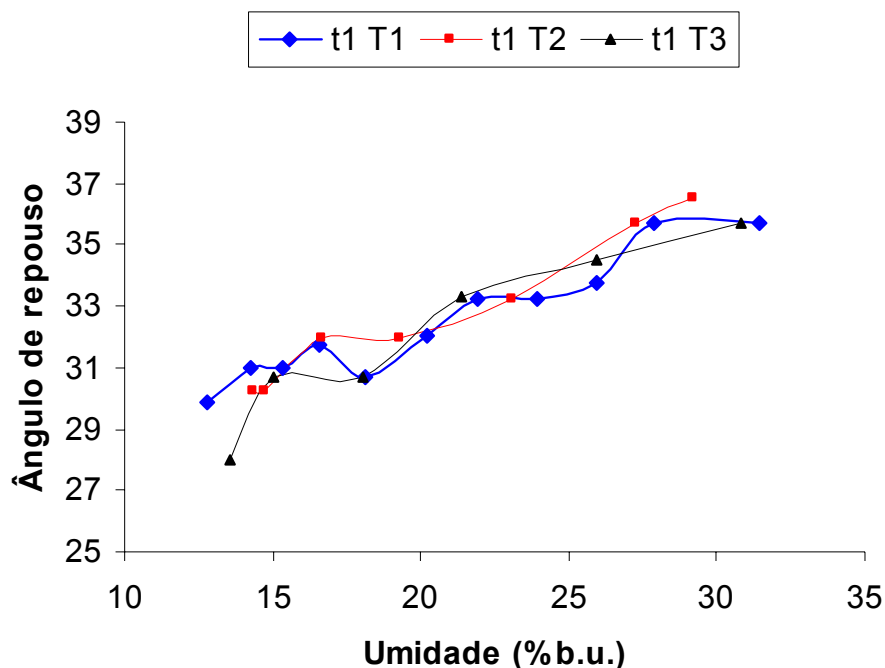


Figura 34 - Ângulo de repouso do arroz parboilizado em função da umidade, para o primeiro teste dos tratamentos 1, 2 e 3.

4.7. Energia

Na Tabela 10 são apresentados os valores de poder calorífico inferior, demanda horária e total de combustível, energia elétrica e entalpia específica.

Observou-se pequena diferença na demanda horária de combustível para o primeiro teste dos tratamentos 1 e 2 cujas temperaturas de secagem foram 80 e 100 °C, respectivamente. No primeiro teste do tratamento 3 esta demanda foi mais elevada, devido à utilização de uma temperatura de secagem mais alta (120 °C).

Tabela 10 – Demanda horária e total de combustível, poder calorífico inferior, utilização de energia elétrica e entalpia específica medida experimentalmente (com e sem o uso de energia elétrica), para o primeiro teste dos três tratamentos

Parâmetros	t1 T1	t1 T2	t1 T3
Tipo de combustível	GLP	GLP	GLP
Demanda de combustível:			
Horária, kg.h ⁻¹	0,6	0,58	0,9
Total, kg	6,0	3,5	4,5
PCI, kJ.kg ⁻¹	49185,5	49185,5	49185,5
Energia elétrica, kWh	13,38	7,56	6,01
Entalpia específica, kJ.kg ⁻¹ :			
Sem energia elétrica	6443,51	4735,88	5147,32
Com energia elétrica	7494,98	5484,40	5650,31

O primeiro teste do tratamento 1, apresentou maior demanda de combustível que o primeiro teste dos tratamentos 2 e 3, em função de ter sido realizado à noite, período em que a temperatura ambiente é mais baixa e a umidade relativa é mais elevada. Além do que a temperatura de 80 °C no ar de secagem proporcionou um incremento de 4 e 5 horas, respectivamente, em relação ao primeiro teste dos tratamentos 2 e 3.

4.7.1. Energia elétrica

Na Tabela 11 estão apresentados os valores da demanda de energia elétrica para a movimentação do ar de secagem e do produto.

Verificou-se que a demanda de energia elétrica nos três tratamentos de secagem foi diretamente proporcional ao tempo de duração da operação.

Para uma demanda de potência de 1,47 kW, o primeiro teste do tratamento 3, necessitou 55,1 % e 20,5 % menos energia elétrica que os testes do tratamento 1 e 2, respectivamente, para a realização do processo de secagem do produto.

Tabela 11 – Demanda de energia elétrica (kWh) para o primeiro teste dos três tratamentos de secagem

Parâmetros	t1 T1	t1 T2	t1 T3
Tempo de operação, h	10	6	5
Demanda de energia elétrica, kWh:			
Movimentação do ar de secagem	9,46	5,36	4,16
Movimentação do produto	3,92	2,20	1,85
Demanda de energia elétrica total, kWh	13,38	7,56	6,01

Os resultados apresentados na Tabela 11 permitem afirmar que houve variação na demanda de energia elétrica para a movimentação do ar e dos grãos, considerando-se a mesma demanda de potencia do sistema. Analisando os resultados observados no primeiro teste de cada tratamento verifica-se que, para a movimentação do ar, houve redução de 43,3 % de T2 para T1; de 56 % de T3 para T1 e 22,4 % de T3 para T2. Em relação à movimentação do produto esta redução foi de 43,9 % de T2 para T1; de 52,8 % de T3 para T1 e 15,9 % de T3 para T2.

Verifica-se que um sistema, operando com a mesma vazão específica de ar, porém com temperaturas diferentes, poderá apresentar diferentes demandas de energia elétrica. Para as condições experimentais observou-se que a demanda de energia elétrica reduziu conforme o aumento na temperatura do ar de secagem.

4.7.2. Entalpia específica

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

Os resultados referentes à entalpia específica, considerando o combustível e a soma de combustível e energia elétrica, estão apresentados na Figura 35, para o primeiro teste dos tratamentos 1, 2 e 3.

Verificou-se menor entalpia específica no teste do tratamento 2, considerando apenas o combustível utilizado e considerando a soma de combustível mais a energia elétrica. Ressalta-se que este teste foi encerrado quando o produto apresentava um teor de água superior aos demais.

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 para as temperaturas de secagem mais elevadas.

Para as condições experimentais observou-se uma demanda total de combustível equivalente a 295, 172 e 221 MJ para os primeiros testes dos tratamentos 1, 2 e 3 respectivamente. As estimativas desta demanda, elaborada com base na termodinâmica do ar foi 243, 216 e 210 MJ. Estes resultados indicam que a eficiência do sistema, com relação ao aproveitamento de combustível foi 83 e 96 % para o primeiro teste dos tratamentos 1 e 3. Para o tratamento 2 a demanda equivalente de combustível medida foi menor que a estimada. Isto ocorreu devido a interrupção deste teste quando o produto apresentava teor de água superior ao dos outros tratamentos.

Estimativas das características termodinâmicas do ar, utilizando o "software" GRAPSI, mostram que o teste do tratamento 2 apresentou menor entalpia específica do que o primeiro teste do tratamento 3. Verificou-se que, para as condições psicrométricas observadas no experimento e considerando o aquecimento do ar de 100 para 120 °C, a redução da umidade relativa foi de 2,7 para 0,9 %, resultando em pouco aumento no potencial de secagem do ar. Além disso, ressalta-se que o primeiro teste do tratamento 2 foi concluído quando o produto continha teor de água superior ao do teste do tratamento 3.

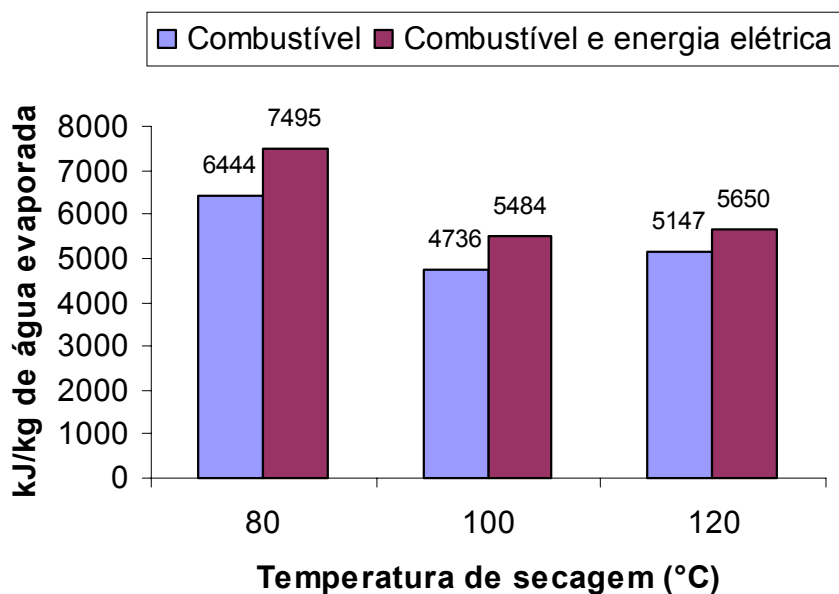


Figura 35 – Entalpia específica observada no primeiro teste dos três tratamentos de secagem.

4.8. Qualidade do produto

Na Tabela 12 é apresentado o rendimento de engenho, inteiros e quebrados para o produto antes da parboilização, para o produto secado ao sol em terreiro de cimento e no secador, para o primeiro teste dos tratamentos 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 12 - Rendimento de engenho, inteiros e quebrados para os testes dos tratamentos 1, 2 e 3

Parâmetros	Renda (g)	Inteiros (g)	Quebrados (g)
t1 T1	70,22a	60,45a	9,77a
t1 T2	69,85a	59,60a	10,25a
t1 T3	68,95a	59,46a	9,49a
Terreiro	70,30a	57,94a	12,35a
Não parboilizado	68,58a	57,71a	10,87a

Pela análise de variância (SAEG 5.0), para o nível de 5 % de probabilidade, não houve diferença significativa entre os tratamentos, testemunha (secagem em terreiro) e produto não parboilizado.

4.9. Resultados observados experimentalmente

Na Tabela 13 estão apresentados os resultados observados experimentalmente no primeiro teste dos tratamentos 1, 2 e 3.

Tabela 13 - Resultados observados experimentalmente no primeiro teste dos tratamentos 1, 2 e 3

Parâmetros	t1 T1	t1 T2	t1 T3
1) Do produto			
Umidade inicial, % b.u.	31,5	29,2	30,9
Umidade final, % b.u.	12,8	14,3	13,6
Massa específica inicial, kg.m ⁻³	581,68	590,24	592,20
Massa específica final, kg.m ⁻³	545,80	548,05	544,36
Ângulo de repouso inicial,	35,71	36,50	35,70
Ângulo de repouso final,	29,90	30,27	27,98
Massa inicial, kg	245	245	249
Massa final, kg	199,2	208,7	205,9
2) Do ar			
Temperatura de secagem, °C	86,0	95,7	116,0
Temperatura de exaustão, °C	36,5	42,6	44,5
Temperatura ambiente, °C	24,4	30,4	28,8
3) Do secador			
Vazão de ar, m ³ .min ⁻¹	7,2	7,2	7,2
camada de secagem, m	0,4	0,4	0,4
camada de resfriamento, m	0,4	0,4	0,4
Área de secagem, m ²	0,283	0,283	0,283

Continua . . .

Continuação da Tabela 13:

Parâmetros	t1 T1	t1 T2	t1 T3
4) Da energia			
Tipo de combustível	GLP	GLP	GLP
Massa de combustível, kg	6,0	3,5	4,5
Energia elétrica, kWh	13,38	7,56	6,01
5) Do desempenho			
Duração do teste	10	6	5
Redução da umidade, %	18,7	14,9	17,3
Eficiência energética, kJ.kg ⁻¹ :			
sem energia elétrica	6443,51	4735,88	5147,32
com energia elétrica	7494,98	5484,40	5650,31

5. CONCLUSÕES

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

O secador, em todos os testes, apresentou uniformidade no teor final de água dos grãos.

O produto teve boa fluidez em todos os pontos do secador, resultando em uniformidade na velocidade de deslocamento dos grãos.

A intermitência no processo, associada à concorrência no fluxo de ar e de grãos, permitiu trabalhar com temperaturas elevadas no ar de secagem, sem que o produto atingisse temperaturas que provocassem danos térmicos.

A utilização de 120 °C no ar de secagem mostrou-se eficiente energeticamente e não danificou o produto. Entretanto, é necessária uma análise de custo operacional, como complementação da análise técnica, para o estabelecimento de uma opção operacional.

A energia elétrica utilizada para movimentação dos grãos e o ar de secagem, é pequena em relação à energia utilizada para o aquecimento do ar de secagem.

O primeiro teste de secagem do tratamento 2 necessitou 58,3 e 22,2 % menos combustível que o primeiro teste dos tratamentos 1 e 3 respectivamente, para realizar a secagem do produto.

O primeiro teste do tratamento 2, foi mais eficiente energeticamente em comparação com o primeiro teste dos tratamentos 1 e 3, necessitando 26,5 e 8,0 % menos energia para evaporar um kg de água do produto.

O menor potencial de secagem (tratamento 1) observado no ar ambiente influenciou diretamente o consumo específico de energia, em relação àquele observado nos tratamentos 2 e 3.

O incremento de temperatura não influenciou a qualidade final do produto.

A qualidade final do produto secado no secador desenvolvido e no terreiro foi à mesma.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMATO, G.W.; SILVEIRA FILHO, S. **Parboilizado, Importâncias e Perspectivas** Lavoura Arrozeira. IRGA, Porto Alegre, v.41, n.382, 1988. p.9-11.
- AMATO, G.W.; SILVEIRA FILHO, S. **Parboilização de arroz no Brasil**. Porto Alegre: CIENTEC, 1991. 91p.
- 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**. Pelotas: Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, UFPEL, 2002. 93p. (Dissertação, Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial).
- BECHTELL, D.B.; POMERANZ, Y. The rice kernel. In: POMERANZ, Y. **Advances in cereal science and technology**. Saint Paul, Minnesota: A.A.C.C., 1980. v.3, p.73-109.
- BHATTACHARYA, S. **Kinetics on colour changes in rice due to parboiling** Journal of Food Engineering, 29, 1996, p.99-106.
- BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Comissão Técnica de Normas e Padrões. **Normas de identidade, qualidade, embalagem e apresentação do arroz**. Brasília: 1988. v.8, n.20/6, 25p.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying Cereal Grains**. Wesport: AVI Publishing, 1974. 265 p.

- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Theory and simulation of grain**. Drying and storage of grains and oilseeds. New York: An Avi Book, 1992. 450p.
- CAMPOS, M.G. **Percentual de grãos inteiros no beneficiamento de arroz em casca, em relação à temperatura do ar e ao tempo de residência na câmara de secagem**. Viçosa: UFV, 1990. 53p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Agrícola).
- CARVALHO, J.L.V.; AMATO, G.W.; MAZZARI, M.R.; GERMANI, R. **Retenção de vitaminas B1 e B2 em arroz parboilizado processado em autoclave e em estufa no Brasil**. Lavoura Arrozeira. IRGA, Porto Alegre, v.45, n.403,1992. p.12-14.
- CARVALHO, J.L.V. **Parboilização: O perfil tecnológico de algumas agroindústrias sob a ótica da gelatinização**. Reunião nacional de pesquisa de arroz. Goiânia: EMBRAPA – CNPAF, 1998. v.1, 433-435p.
- CHATTOPADHYAY, P.K.; KUNZE, O.R. **Fissuring characteristics of parboiled and raw milled rice**. Transactions of the ASAE, St Joseph: ASAE, v. 29, n. 6, 1986. p.1760-66.
- CONAB. Site <http://www.conab.gov.br> **Indicadores de Agropecuária, Estimativa de Safra**, 2002.
- ELBERT, G.; TOLABA, M.P.; SUÁREZ, C. **Effects of drying conditions on head rice yield and browning index of parboiled rice**. Journal of Food Engineering, 47, 2001, 37-41p.
- 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.
- ELIAS, M.C. **Tempo de espera para secagem e qualidade de arroz para semente e indústria**. Pelotas: UFPEL, 1998. 132p. (Tese de Doutorado).
- ELIAS, M.C.; ROMBALDI, C.V.; SILVA, J.A.; NORA, L.; DIAS, A.R.G. **Industrialização de arroz**. Pelotas: Pólo de Alimentos. UFPEL. COREDESUL, 1996.18p.
- FONSECA, H.; SOAVE, J.; AZZINE, L.E.; BANZATTO, N.V.; CAMARGO, O.B.A. **Arroz, produção, pré-processamento e transformação agroindustrial**. Piracicaba: ESALQ, v. 2, s.d.. 170p.

- FONTANA, C. **Propriedades físicas e térmicas do arroz**. Santa Maria: Edições UFSM, 1986^a. 68p. (Série caderno didático 5).
- FONTANA, C. **Secagem de arroz parboilizado**. Santa Maria: Edições UFSM, 1986^b. 52p. (Série caderno didático 4).
- FRANCO, G. **Tabela de Composição Química dos Alimentos**. São Paulo: Editora Ateneu, 1995. 307p.
- GALLI, J. **Origem, distribuição e domesticação do arroz**. Lavoura Arrozeira. IRGA, Porto Alegre, v.31, n.309, 1978. p.63-68.
- GARIBOLDI, F. **El Sancochado Del Arroz**. Cadernos de Fomento Agropecuário, 97. Roma: FAO, 1974. 103p.
- GARIBOLDI, F. **Parboiled Rice**. In: HOUSTON, D.F. **Rice chemistry and technology**. Saint Paul, Minnesota, A.A.C.C., 1972. 358-380p.
- HOSENEY, R.C. **Principios de ciencia y tecnología de los cereales**. Zaragoza: ACRIBIA, 1991. 321 p.
- HOUSTON, D.F. **Rice chemistry and technology**. Saint Paul, Minnesota, A.A.C.C., 1972. 517p.
- JARDIM, A. **Planeta arroz 2000**. Cachoeira do Sul, 2000. p.6
- LACERDA FILHO, A.F.; QUEIROZ, D.M.; ROA, G. **Avaliação experimental de secador comercial intermitente de arroz**. Viçosa: CENTEINAR, 1981. 24p.
- MILMAN, M.J. **Equipamentos para pré-processamento de grãos**. Pelotas: Editora e Gráfica Universitária - UFPel, 2002. 206p.
- MILMAN, M.J. **Manejo da relação de intermitência e da temperatura do ar na secagem industrial do arroz**. Pelotas: Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, UFPEL, 2001. 54p. (Dissertação, Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial).
- MOHSENIN, N.N. **Physical properties of plant and animal materials**, Structures, physical characteristics and mechanical properties. New York, Gordon and Breach, 1970. v.1.
- MÜHLBAUER, W.; KUPPINGER, H.; ISAACS, G.W. **Design and operating conditions of single-stage concurrent-flow and two-stage concurrent-counter flow grain dryer**. ASAE. Logan: ASAE. 1978. 28p.
- MÜLLER, M.M. **Comportamento hidrotérmico do arroz na operação de**

- encharcamento para parboilização.** Pelotas: Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, UFPEL, 1999. 31p. (Dissertação, Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial).
- PEDROSO, B.A. **Arroz irrigado: obtenção e manejo de cultivares.** Porto Alegre, Ed. Sagra, 1982. 175p.
- ROMBALDI, C.V.; BARBOSA, F.F.; FERREIRA, M.R.; SILVA, M.S.; SILVA, L.H.; ELIAS, M.C. Tempo de armazenamento e qualidade do arroz para parboilização. **Revista da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 16; n. 3: 1987-90.1998.
- 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
- SHARMA, A.D.; KUNZE, O.R. **Post-drying fissure developments in rough rice.** Transaction of the ASAE. St Joseph: ASAE, v. 25, n. 2, 1982. p. 465-68.
- SILVA, J.S.; LACERDA FILHO, A.F.; BERBET, P.A. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas.** In: SILVA, J.S. Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. Viçosa: Editora Aprenda Fácil, 2000. 395-467p.
- SILVEIRA, R.S. **Manejo da Temperatura do ar na secagem estacionária e efeitos no desempenho industrial e nas propriedades funcionais do arroz parboilizado.** Pelotas: Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, UFPEL, 2000. 130p. (Dissertação, Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial).
- SINDARROZ-SC. Sindicato da indústria de arroz no estado de Santa Catarina. www.sindarroz.sc.com.br/arrozparboilizado.htm, 2002.
- STEFFE, J.F.; SINGH, R.P. **Theoretical and practical aspects on rough rice tempering,** Transaction of the ASAE. St Joseph: ASAE, v. 23, n. 3, 1980. p. 775-82.
- STEFFE, J.F.; SINGH, R.P.; BAKSHI, A.S. **Influence of tempering time and cooling on rice milling yields and moisture removal.** Transactions of the ASAE, St Joseph: ASAE, v. 22, n. 5, 1979. p. 1214-18

- TAVARES, A.F.S.; ELIAS, M.C.; ROMBALDI, C.V.; NORA, L. Grau de polimento e propriedades funcionais do arroz. **Revista da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 8, n.16, 1998. p.1871-4
- VELLUPILLAI, L.; VERMA, L.R. **Drying and tempering effects on parboiled rice equation**. Transactions of the ASAE. St Joseph: ASAE, v. 29, n. 1, 1986. p. 312-19.
- WALKER, P.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W. **Energy efficiency in concurrent-flow rice drying**. ASAE. St Joseph: ASAE, 1978. 16p (paper n. 78-3540)

APÊNDICES

Apêndice A

Curva característica do ventilador

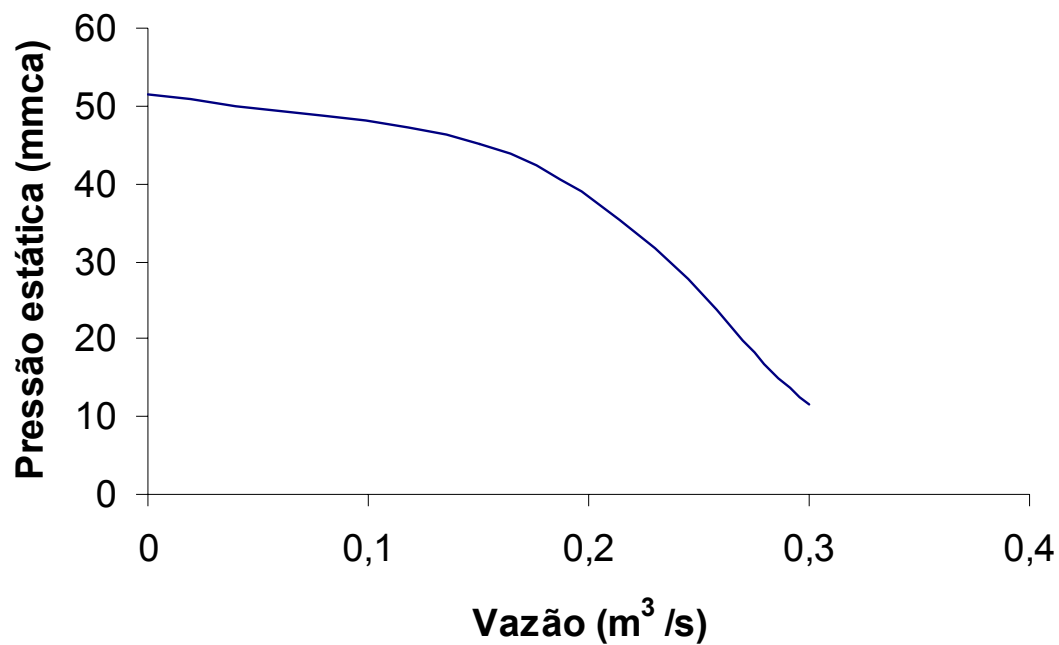


Figura 1A – Curva característica do ventilador utilizado no secador desenvolvido.

Apêndice B

Tabela 1B - Temperaturas médias do ar de secagem, exaustão e ambiente,
teste 1 do tratamento 1

Tempo (h)	Secagem (°C)	Exaustão (°C)	Ambiente (°C)
1	82,7	34,2	26,9
2	82,8	33,5	25,2
3	88,7	34,0	24,2
4	90,0	35,6	24,3
5	87,7	36,2	24,3
6	84,2	37,3	24,2
7	85,0	37,8	24,2
8	85,4	38,4	23,8
9	84,9	38,2	23,3
10	89,0	39,8	23,2

Tabela 2B - Temperaturas médias do ar de secagem, exaustão e ambiente,
teste 2 do tratamento 1

Tempo (h)	Secagem (°C)	Exaustão (°C)	Ambiente (°C)
1	81,9	37,5	33,5
2	80,8	35,5	31,9
3	85,7	36,9	30,2
4	85,2	37,5	28,0
5	87,2	38,5	27,0
6	85,4	39,1	26,2
7	86,2	39,9	25,6
8	84,9	40,0	24,9
9	81,2	40,3	24,9

Tabela 3B - Temperaturas médias do ar de secagem, exaustão e ambiente,
teste 3 do tratamento 1

Tempo (h)	Secagem (°C)	Exaustão (°C)	Ambiente (°C)
1	81,4	33,4	25,4
2	82,3	35,3	25,8
3	85,2	35,2	25,2
4	84,8	35,6	24,8
5	86,2	36,2	24,5
6	83,9	37,2	24,2
7	84,6	38,1	23,9
8	84,3	38,5	23,6
9	85,1	38,1	23,1
10	84,6	38,7	22,9

Tabela 4B – Temperaturas médias do ar de secagem, exaustão e ambiente,
teste 1 do tratamento 2

Tempo(h)	Secagem (°C)	Exaustão (°C)	Ambiente (°C)
1	102,0	39,0	33,1
2	98,3	40,4	33,0
3	96,7	42,7	32,2
4	99,9	44,9	29,4
5	98,4	46,2	27,8
6	79,1	42,1	26,6

Tabela 5B - Temperaturas médias do ar de secagem, exaustão e ambiente,
teste 2 do tratamento 2

Tempo (h)	Secagem (°C)	Exaustão (°C)	Ambiente (°C)
1	109,9	38,3	33,3
2	100,2	39,7	30,5
3	99,2	41,7	27,9
4	103,6	42,4	26,3
5	104,7	42,5	25,0
6	99,9	46,2	23,9

Tabela 6B - Temperaturas médias do ar de secagem, exaustão e ambiente,
teste 3 do tratamento 2

Tempo (h)	Secagem (°C)	Exaustão (°C)	Ambiente (°C)
1	98,2	39,8	31,2
2	99,6	40,2	30,9
3	97,2	43,1	30,1
4	99,6	45,2	28,9
5	98,4	46,8	27,1
6	97,5	47,1	25,9

Tabela 7B - Temperaturas médias do ar de secagem, exaustão e ambiente,
teste 1 do tratamento 3

Tempo (h)	Secagem (°C)	Exaustão (°C)	Ambiente (°C)
1	118,7	40,7	33,1
2	119,4	41,6	31,0
3	118,3	45,7	28,3
4	117,2	47,1	26,5
5	106,3	47,3	25,0

Tabela 8B - Temperaturas médias do ar de secagem, exaustão e ambiente,
teste 2 do tratamento 3

Tempo (h)	Secagem (°C)	Exaustão (°C)	Ambiente (°C)
1	122,4	39,6	33,3
2	124,8	42,6	32,9
3	115,3	45,8	30,5
4	120,4	50,3	28,4

Tabela 9B - Temperaturas médias do ar de secagem, exaustão e ambiente,
teste 3 do tratamento 3

Tempo (h)	Secagem (°C)	Exaustão (°C)	Ambiente (°C)
1	115,4	38,7	30,4
2	119,1	40,3	27,1
3	123,9	40,8	24,7
4	123,2	43,3	24,7
5	122,4	44,4	24,2

Tabela 10B - Temperaturas da massa de grãos, na câmara de secagem, para os testes 1, 2 e 3 do tratamento 1

	0h	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h
t1 (°C)	44,1	25,8	27,2	27,4	27,5	28,1	27,7	27,9	27,5	28,1	30,7
t2 (°C)	42,5	30,8	30,7	28,9	28,6	28,6	30,3	30,2	28,9	29,6	-
t3 (°C)	45,3	28,0	27,6	27,8	28,1	27,9	27,5	28,0	27,4	27,3	28,1

Tabela 11B - Temperaturas da massa de grãos, na câmara de secagem, para os testes 1, 2 e 3 do tratamento 2

	0h	1h	2h	3h	4h	5h	6h
t1 (°C)	39,5	33,6	32,6	33,6	33,5	36,5	25
t2 (°C)	42,6	32,1	31,7	35,1	32,3	31	34,7
t3 (°C)	40,5	31,9	32,1	33,0	32,4	31,9	33,8

Tabela 12B - Temperaturas da massa de grãos, na câmara de secagem, para os testes 1, 2 e 3 do tratamento 3

	0h	1h	2h	3h	4h	5h
t1 (°C)	45,4	34,1	35,5	33,7	33,8	33,8
t2 (°C)	43,5	35,6	35,1	32,2	30,6	-
t3 (°C)	42,9	31,8	31,4	32,9	33,7	34,4

Tabela 13B – Variação da umidade do arroz parboilizado, para os testes 1, 2 e 3 do tratamento 1

	0h	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h
t1 (% b.u.)	31,47	27,87	25,93	23,90	21,94	20,21	18,12	16,57	15,33	14,27	12,79
t2 (% b.u.)	29,44	26,54	24,59	22,61	20,62	18,79	17,09	15,64	14,10	13,30	-
t3 (% b.u.)	30,41	27,20	25,11	23,70	22,01	20,57	17,97	16,70	15,50	14,48	13,20

Tabela 14B – Variação da umidade do arroz parboilizado, para os testes 1, 2 e 3 do tratamento 2

	0h	1h	2h	3h	4h	5h	6h
t1 (% b.u.)	29,16	27,23	23,04	19,29	16,65	14,72	14,32
t2 (% b.u.)	30,74	26,29	23,63	20,24	17,75	15,42	13,44
t3 (% b.u.)	30,20	25,99	22,90	19,86	17,52	15,01	13,08

Tabela 15B – Variação da umidade do arroz parboilizado, para os testes 1, 2 e 3 do tratamento 3

	0h	1h	2h	3h	4h	5h
t1 (% b.u.)	30,83	25,93	21,35	18,02	15,06	13,56
t2 (% b.u.)	30,09	23,58	18,84	15,74	12,10	-
t3 (% b.u.)	29,94	26,6	23,2	20,0	17,0	14,7

Tabela 16B – Variação da massa específica do arroz parboilizado, para os testes 1, 2 e 3 do tratamento 1

	0h	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h
t1 (kg.m ⁻³)	581,68	577,00	579,84	566,24	555,12	560,04	541,56	544,24	545,80	545,64	544,32
t2 (kg.m ⁻³)	590,92	586,64	574,52	572,88	564,56	560,36	557,44	558,52	552,16	555,44	-
t3 (kg.m ⁻³)	586,32	582,45	575,23	572,96	564,65	560,90	552,49	546,14	545,53	542,81	544,19

Tabela 17B – Variação da massa específica do arroz parboilizado, para os testes 1, 2 e 3 do tratamento 2

	0h	1h	2h	3h	4h	5h	6h
t1 (kg.m ⁻³)	590,24	584,52	569,60	562,00	557,52	547,12	548,05
t2 (kg.m ⁻³)	570,52	569,84	552,52	545,84	541,40	535,02	534,82
t3 (kg.m ⁻³)	582,30	578,43	563,50	556,96	552,30	542,15	541,78

Tabela 18B – Variação da massa específica do arroz parboilizado, para os testes 1, 2 e 3 do tratamento 3

	0h	1h	2h	3h	4h	5h
t1 (kg.m ⁻³)	571,08	592,20	562,88	561,96	554,88	544,36
t2 (kg.m ⁻³)	583,76	584,12	565,56	554,80	542,52	-
t3 (kg.m ⁻³)	582,16	576,52	572,80	560,32	546,96	540,92

Tabela 19B – Variação do ângulo de repouso do arroz parboilizado, para os testes 1, 2 e 3 do tratamento 1

	0h	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h	10h
t1	35,71	35,70	33,77	33,27	33,27	32,01	30,69	31,74	30,96	30,96	29,90
t2	37,99	35,71	34,51	33,77	33,27	32,00	32,00	30,96	30,96	29,35	-
t3	36,20	35,70	34,45	34,23	33,85	32,62	31,74	32,01	30,69	30,96	30,69

Tabela 20B – Variação do ângulo de repouso do arroz parboilizado, para os testes 1, 2 e 3 do tratamento 2

	0h	1h	2h	3h	4h	5h	6h
t1	36,50	35,70	33,27	32,00	32,00	30,27	30,27
t2	35,71	33,30	33,00	32,51	30,70	30,20	30,60
t3	35,70	33,27	33,30	32,51	32,01	30,96	29,90

Tabela 21B – Variação do ângulo de repouso do arroz parboilizado, para os testes 1, 2 e 3 do tratamento 3

	0h	1h	2h	3h	4h	5h
t1	35,70	34,51	33,28	30,70	30,70	27,98
t2	35,70	33,27	32,00	30,70	27,98	35,70
t3	35,70	34,50	32,77	32,00	32,00	32,77

Tabela 22B – Consumo de combustível (GLP) utilizado para secagem de arroz parboilizado, para os testes 1, 2 e 3 dos tratamentos 1, 2 e 3

	Tratamento 1 (kg)	Tratamento 2 (kg)	Tratamento 3 (kg)
t1	6,0	3,5	4,5
t2	5,5	3,0	4,0
t3	5,8	3,7	4,8