UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2002

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20
unesp

1110000494

"Investigação Experimental da Tecnologia de Escoamento Pulsante em Secagem de Grãos de Alimentos"

SARA REGINA DA SILVA DIAS

178

CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO

SARA REGINA DA SILVA DIAS

INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA TECNOLOGIA DE ESCOAMENTO PULSANTE EM SECAGEM DE GRÃOS DE ALIMENTOS

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Júnior

Co-orientador: Prof. Dr. Heraldo da Silva Couto

494

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

Guaratinguetá
2002

494

Data:
Valor:
C/D/T:

Dias, Sara Regina da Silva
D541i Investigação experimental da tecnologia de escoamento pulsante em secagem de grãos de alimentos / Sara Regina da Silva Dias . – Guaratinguetá : [s.n.], 2002
75f. : il.

Bibliografia: f. 72-75
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2002
Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior
Co orientador: Prof Dr. Heraldo da Silva Couto

1. Secagem industrial (grãos de alimentos) 2. Escoamento Pulsante I. Título

CDU 66.047

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

"INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA TECNOLOGIA DE ESCOAMENTO PULSANTE EM SECAGEM DE GRÃOS DE ALIMENTOS"

SARA REGINA DA SILVA DIAS

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. José Luz Silveira
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JÚNIOR
Orientador / Unesp-Feg

Prof. Dr. PAULO MAGALHÃES FILHO
Unesp-Feg

Prof. Dr. MARCO AURÉLIO FERREIRA
INPE/Cachoeira Paulista

Agosto de 2002

DADOS CURRICULARES

SARA REGINA DA SILVA DIAS

NASCIMENTO	18.02.1973 – SÃO JOSÉ DOS CAMPOS / SP
FILIAÇÃO	Juramir Vitor Dias Maria Aurora da Silva Dias
1992/1997	Curso de Graduação Faculdade de Engenharia Química de Lorena
1998/2002	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da UNESP

à minha tia e madrinha Cristina Maria da Silva Alves, pelo incentivo e por acreditar que eu era capaz de superar os obstáculos que surgiram durante este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por conservar-me a vida e a fé,

ao meu orientador e amigo Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Júnior pela orientação, pelo auxílio e incentivo. Acreditar nas pessoas mesmo quando a maioria duvida é uma de suas virtudes, de certa forma isso contribuiu para a realização deste trabalho.

ao meu co-orientador Prof. Dr. Heraldo da Silva Couto pelo auxílio e colaboração. Todos os ensinamentos foram de grande valia,

ao Dr. Marco Aurélio Ferreira, sua participação foi muito importante,

ao Adilson Rogério Nakano, técnico, competente, sério, e meu grande amigo,

aos funcionários: Ignês, José Roberto (Soró), e José Carlos, pelos serviços prestados e sobretudo por terem sido meus "três anjos" ao me socorrerem após o acidente durante os testes,

aos funcionários e amigos do Prédio de Ensaios – LCP/INPE,

ao Daniel Ferreira, Cristiane Martins, César Botura, Sr. Otávio, Vânia e Franciane pela ajuda, incentivo e amizade,

aos amigos: Ana Maura, Márcio, Rodrigo Intini que em nossas reuniões de "cúpula", incentivaram, e mais do que isso, foram companhias agradáveis, quase família,

aos amigos e funcionários do laboratório químico – LCP/INPE.

aos colegas do departamento COMA/CPTEC do INPE por fornecerem-me gentilmente os níveis da umidade relativa do ar atmosférico a cada teste realizado

ao Departamento de Engenharia Mecânica, na área de Transmissão e Conversão de Energia, da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá.

" Para tudo há um tempo na vida...

...tempo para chorar;

tempo para sorrir."

Eclesiastes 3

DIAS, S. R. S. **Investigação experimental da tecnologia do escoamento pulsante em secagem de grãos de alimentos**. Guaratinguetá, 2002. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

RESUMO

Neste trabalho foram investigadas as características do processo de secagem de grãos de alimentos realizado com presença de um campo acústico, o que possui o potencial de aumentar consideravelmente as taxas de desumidificação. Um tubo de Rijke com fonte de energia elétrica foi utilizado para gerar o campo acústico. As oscilações foram obtidas por um sistema de controle ativo, com instalação de um alto-falante na altura ½ do comprimento do tubo. Os resultados mostraram aumento da eficiência nas taxas de secagem quando do uso de escoamento pulsante, sendo este aumento mais claramente observado com grãos de baixos teores de umidade (aproximadamente 16 %).

PALAVRAS-CHAVE: escoamentos pulsantes, secagem de grãos de alimentos.

DIAS, S. R. S. **Experimental investigation of the pulsating flow technology in drying food grains**. Guaratinguetá, 2002. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

ABSTRACT

The characteristics of drying food grains with an acoustic pulsating air flow was investigated in this dissertation. The process has the potential of considerably increasing dehumidification rates. A Rijke tube with an electrical source of energy was utilised to generate the acoustic field. The oscillations were obtained with an active control system with a speaker installed at ½ of the tube length. Results showed an increase in the drying efficiency when using pulsating flows. This increase was more clearly observed when using grains with low grain moisture contents (approximately 16 %).

KEYWORDS: pulsating flows, drying of food grains.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

Pág.

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO 15

1.1 – Posicionamento do Problema 15

1.2 – Objetivo 16

CAPÍTULO 2: OSCILAÇÕES ACÚSTICAS GERADAS TERMICAMENTE 18

2.1 – Ondas Sonoras 18

2.2 – Oscilações Acústicas Geradas por Calor 19

2.3 – Algumas Aplicações do Processo de Combustão Pulsante 21

2.4 – Combustores Tipo Rijke 25

2.5 – Controle de Instabilidades de Combustão 27

2.6 – Escoamentos Pulsantes Associados a Secagem de Alimentos 29

CAPÍTULO 3: CONSIDERAÇÕES SOBRE SECAGEM DE GRÃOS 32

3.1 – Breve Histórico sobre Secagem 32

3.2 – Reumidificação de Grãos 35

3.3 – Bases Teóricas sobre Processos de Secagem 36

3.4 – Alguns Aspectos Práticos de Processos de Secagem 39

CAPÍTULO 4: DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTOS 41

4.1 – Equipamento Utilizado 41

4.2 – Procedimentos Gerais 46

4.3 – Procedimentos com a Soja Utilizada 52

Pág.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÃO 55

5.1 – Resultados para Temperatura de Secagem de 50 °C 55

5.2 – Resultados para Temperatura de Secagem de 60 °C 63

CAPÍTULO 6: CONCLUSÃO 70

REFERÊNCIAS 72

LISTA DE FIGURAS

Pág.

FIGURA 2.1 – Esquema de um tubo de Rijke com a respectiva estrutura de onda acústica do modo fundamental (p': pressão acústica; u': velocidade acústica). 20

FIGURA 2.2 – Razão h_p/h na seção de saída de um tubo de Rijke como função da amplitude de pressão acústica na seção média do mesmo tubo (Fraenkel, 1995). 31

FIGURA 3.1 – Esquema dos fluxos de energia térmica e de vapor d'água entre uma lâmina d'água e o ar circundante. 38

FIGURA 4.1 – Combustor tipo Rijke utilizado na primeira fase do trabalho. 42

FIGURA 4.2 – Dispositivo placa de orifício e manômetro tipo "U" 43

FIGURA 4.3 – Secador e bandeja de grãos 44

FIGURA 4.4 – Tubo vertical com aquecedor elétrico utilizado na segunda fase do trabalho 45

FIGURA 4.5 – Equipamento utilizado nos experimentos desta dissertação 46

FIGURA 5.1 – Variação da umidade com o tempo para 50 g de soja com umidade inicial de 25 % e temperatura do ar de 50 °C. Pesagens efetuadas a cada 5 minutos. 56

Pág.

FIGURA 5.2 – Variação da umidade com o tempo para 90 g de soja com umidade inicial de 25 % e temperatura do ar de 50 °C. Pesagens efetuadas a cada 5 minutos. 57

FIGURA 5.3 – Variação da umidade com o tempo para 139 g de soja com umidade inicial de 25 % e temperatura do ar de 50 °C. Pesagens efetuadas a cada 5 minutos. 59

FIGURA 5.4 – Variação da umidade com o tempo para 139 g de soja com umidade inicial de 25 % e temperatura do ar de 50 °C. Pesagens efetuadas a cada 30 minutos. 60

FIGURA 5.5 – Variação da umidade com o tempo para 240 g de soja com umidade inicial de 26 % e temperatura do ar de 50 °C. 62

FIGURA 5.6 – Variação da umidade com o tempo para 200 g de soja com umidade inicial de 30,2 % e temperatura do ar de 60 °C. 64

FIGURA 5.7 – Variação da umidade com o tempo para 200 g de soja com umidade inicial de 26 % e temperatura do ar de 60 °C. 65

FIGURA 5.8 – Variação da umidade com o tempo para 240 g de soja com umidade inicial de 30,2 % e temperatura do ar de 60 °C. 65

FIGURA 5.9 – Variação da umidade com o tempo para 200 g de soja com umidade inicial de 16 % e temperatura do ar de 60 °C. 67

FIGURA 5.10 – Variação da umidade com o tempo para 200 g de soja com umidade inicial de 15,8 % e temperatura do ar de 60 °C. 68

LISTA DE TABELAS

Pág.

TABELA 4.1 – Vazões e temperaturas relativas aos testes preliminares. 49

TABELA 4.2 – Vazões e temperaturas relativas aos testes preliminares, com indução de ondas acústicas por alto falante. 50

TABELA 4.3 – Freqüências e amplitudes obtidas. 51

TABELA 5.1 – Resultados relativos à secagem de 50 g de soja com 25 % de umidade inicial e temperatura do ar de 50 °C, regimes pulsante e não pulsante. 56

TABELA 5.2 – Resultados relativos à secagem de 90 g de soja com 25 % de umidade inicial e temperatura do ar de 50 °C, regimes pulsante (P) e não pulsante (NP). 58

TABELA 5.3 – Resultados relativos à secagem de 139 g de soja com 25 % de umidade inicial e temperatura do ar de 50 °C, regimes pulsante (P) e não pulsante (NP), pesagens de 5 em 5 minutos (5) e de 30 em 30 minutos (30). 61

TABELA 5.4 – Tempos de secagem para o intervalo 25 a 23 % de umidade para as massas iniciais de 50, 90 e 139 g, com temperatura de secagem de 50 °C. Regimes pulsante (P) e não pulsante (NP), pesagens de 5 em 5 minutos (5) e de 30 em 30 minutos (30). 62

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO

1.1 – Posicionamento do Problema

Modernidade e globalização, na agropecuária, leva-nos ao conceito de agronegócio, que nada mais é do que instrumentação nas operações de produção e distribuição de suprimentos agrícolas, o armazenamento, processamento e a distribuição destes produtos agrícolas, e os itens produzidos a partir deles. Organizar e otimizar recursos humanos, financeiros e materiais, num verdadeiro esforço de parcerias, reunindo equipes de pesquisa e desenvolvimento, passou a ser o grande desafio dos dias de hoje.

Outro aspecto que sinaliza a transformação dos paradigmas atuais é encontrado no próprio Plano Plurianual do Governo Federal (PPA 2000-2003), em que foi estabelecido que os programas voltados à área agrícola devem buscar o aumento da produção agropecuária do País, com o conseqüente reflexo na geração de emprego e renda; garantir o equilíbrio entre a oferta e a demanda internas de alimentos, além de aumentar as exportações do setor (www.embrapa.br:8080/aplic/rumos.nsf/).

Associadas às parcerias com a iniciativa privada, o Programa Agricultura de Precisão contém metas que contemplam o desenvolvimento tecnológico para automação de processos na produção agropecuária. Também são contemplados os desenvolvimentos de metodologias avançadas para o agronegócio, de sistemas de rastreamento e tomada de decisão, e também de modelos, sensores, métodos, equipamentos, softwares, máquinas e implementos que levem a bons índices de produtividade e sustentabilidade sem comprometer as próximas gerações, o que, mais do que um desafio, constitui o cenário da nova realidade (www.embrapa.br:8080/aplic/rumos.nsf/).

É, notável, segundo pesquisadores, o prejuízo anual que os países sofrem em conseqüência da perda ou quebra da produção agrícola a partir da colheita. Os

alimentos deterioráveis, em geral, necessitam para a sua conservação níveis baixos de teor de umidade e medidas que mantenham o produto seco (Puzzi, 1986).

Para a perfeita conservação da massa de grãos, o teor de umidade deve ser reduzido a valores que (Calado, 1993):

- inviabilizem o desenvolvimento de agentes responsáveis pela sua degeneração (fungos e bactérias);
- reduzam a taxa de respiração dos grãos; e
- bloqueiem a ocorrência de reações enzimáticas que propiciam a auto-degeneração dos grãos.

Sob as condições climáticas brasileiras, geralmente, recomenda-se que o teor de umidade para a armazenagem seja de 13%. Casos em que o produto necessite permanecer nos armazéns por mais de um ano, o teor de umidade deve ser de 11% (Silva et al., 1991).

Assim, a secagem dos produtos alimentícios os torna mais resistentes ao ataque de bactérias e ao desenvolvimento de fungos, já que estes microrganismos sobrevivem nos alimentos e se desenvolvem graças a existência de partículas de água no seu interior, e são um dos fatores responsáveis pela deterioração desse produtos. A diminuição dos níveis de umidade aumenta a durabilidade e assim permite uma maior oferta alimentar, já que a perda será menor.

1.2 – Objetivo

Neste trabalho foram investigadas experimentalmente as características do processo de secagem realizado com a presença de um campo acústico, o que possui o potencial de aumentar consideravelmente as taxas de desumidificação. Há evidências que oscilações acústicas aumentam o coeficiente de troca convectiva entre um

escoamento de gás quente e grãos, incrementando a eficiência e a taxa de secagem e barateando custos.

Um tubo vertical com fonte de energia elétrica foi utilizado para gerar o campo acústico. Inicialmente, tentou-se utilizar o equipamento como Tubo de Rijke, com energia proveniente de um processo de combustão. O tipo de fonte teve que ser substituído devido a dificuldades em se conseguir operação sem ocorrência de fuligem para um escoamento acústico com baixa temperatura, de 50 a 60 ^{o}C, conforme requerido para secagem de grãos de soja.

No tocante ao grão escolhido, preferiu-se a soja (*Glycine max)* pela sua importância reconhecida mundialmente como significativa fonte de riqueza para os grandes países produtores como o Brasil, Estados Unidos, Argentina, China e Índia e também pelas características do grão (www.ceagesp.com.br/arm_soja.htm).

O trabalho experimental foi realizado nas dependências do Laboratório Associado de Combustão e Propulsão (LCP), localizado no campus de Cachoeira Paulista do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), instituição com a qual a UNESP mantém convênio de cooperação científica.

CAPÍTULO 2 OSCILAÇÕES ACÚSTICAS GERADAS TERMICAMENTE

2.1 – Ondas Sonoras

Ondas sonoras são ondas mecânicas longitudinais que podem se propagar em sólidos, líquidos e gases. As partículas materiais que transmitem a onda oscilam paralelamente à direção de propagação da própria onda. As ondas mecânicas longitudinais podem ser geradas com freqüências cujos valores situam-se em um intervalo muito grande; as ondas sonoras são constituídas por aquelas cujas freqüências situam-se em um intervalo capaz de estimular a sensação de audição no ouvido e no cérebro humano. Este intervalo está compreendido, aproximadamente, entre 20 Hz e 20.000 Hz, e é denominado intervalo audível (Pierce, 1981).

As ondas audíveis originam-se em cordas vibrantes (violino, cordas vocais humanas), em colunas de ar em vibração (orgão, clarineta) e em placas e membranas vibrantes (xilofone, alto-falante, tambor). Todos estes elementos vibrantes alternadamente comprimem o ar em volta deles, em seu movimento para a frente, rarefazendo-o em seu movimento de volta. O ar transmite estas perturbações em forma de onda que se propaga a partir da fonte.

Ondas longitudinais podem ocorrer nos gases que ocupam o interior de tubos. Quando isto ocorre as extremidades abertas do tubo constituem nodos de pressão acústica e antinodos de deslocamento; as extremidades fechadas têm características acústicas opostas (Ferreira, 1997). As frequências de ressonância correspondem à frequência natural do tubo e seus harmônicos. A equação abaixo fornece as frequências naturais do tubo terminação aberta (Botura, 1998):

$$f_n = \frac{n}{2}\frac{c}{L_{eff}}, n = 1,2,3... \qquad (1.1)$$

onde f é a frequência (Hz), n é número do modo, c é a velocidade da onda através do gás, L_{eff} é comprimento efetivo do tubo ($L_{eff} = L + 0{,}6a$), L é o comprimento do tubo, e a é o diâmetro interno do tubo.

2.2 – Oscilações Acústicas Geradas por Calor

Oscilações acústicas produzidas por calor foram descobertas há mais de 200 anos quando Higgins, em 1777 (em Tyndall, 1970), produziu chamas sonoras de hidrogênio em tubos abertos. Os estudos de Higgins foram seguidos por Debuc em 1796, Chlandi em 1802, Faraday em 1818 e Rijke em 1859, entre outros. Estes estudos mostraram que o som de maior amplitude deve ser produzido quando uma chama é ancorada em um tubo de diâmetro menor suprido por combustível, e está localizada dentro de um tubo de diâmetro maior. O som gerado é devido a excitação do modo fundamental acústico ou de um dos harmônicos do tubo de diâmetro maior e sua ocorrência depende sobretudo das características do queimador, da chama e do tubo (Tyndall, 1970).

Um dado processo é responsável pela ocorrência de queima pulsante quando a resposta do sistema às oscilações do escoamento no combustor causa a liberação de calor durante a fase de compressão da onda acústica no combustor. Como o processo de combustão difere de um combustor a outro, os mecanismos que controlam a ocorrência da combustão pulsante dependem do tipo de combustível, do projeto do combustor e assim por diante.

Em 1859, Rijke (em Lord Rayleigh, 1945) observou que oscilações eram geradas quando uma grelha metálica aquecida era colocada na parte inferior de um tubo vertical aberto em ambas as extremidades. Este equipamento, cujo esquema é mostrado na Figura 2.1, recebeu o nome de tubo de Rijke.

Um critério simples, que determina se a oscilação de pressão será amplificada ou não, devido ao processo de adição de calor, foi estabelecido por Lord Rayleigh (1945).

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18 19

O critério de Rayleigh afirma que "se calor for periodicamente transferido para ou retirado de uma massa de ar oscilante (por exemplo um cilindro limitado por um pistão), o efeito produzido dependerá da fase da vibração na qual a transferência de calor ocorre. Se o calor for fornecido ao ar no movimento de maior condensação, ou removido quando da maior rarefação, as vibrações são encorajadas". As oscilações serão amortecidas se o contrário acontecer. Fisicamente, o critério de Rayleigh afirma que se a taxa de calor transferida periodicamente ao escoamento estiver em fase com o crescimento da pressão, a amplitude de pressão aumentará. O valor limite para essa amplitude ocorre quando a taxa de energia absorvida pela onda acústica se igualar à taxa de energia dissipada.

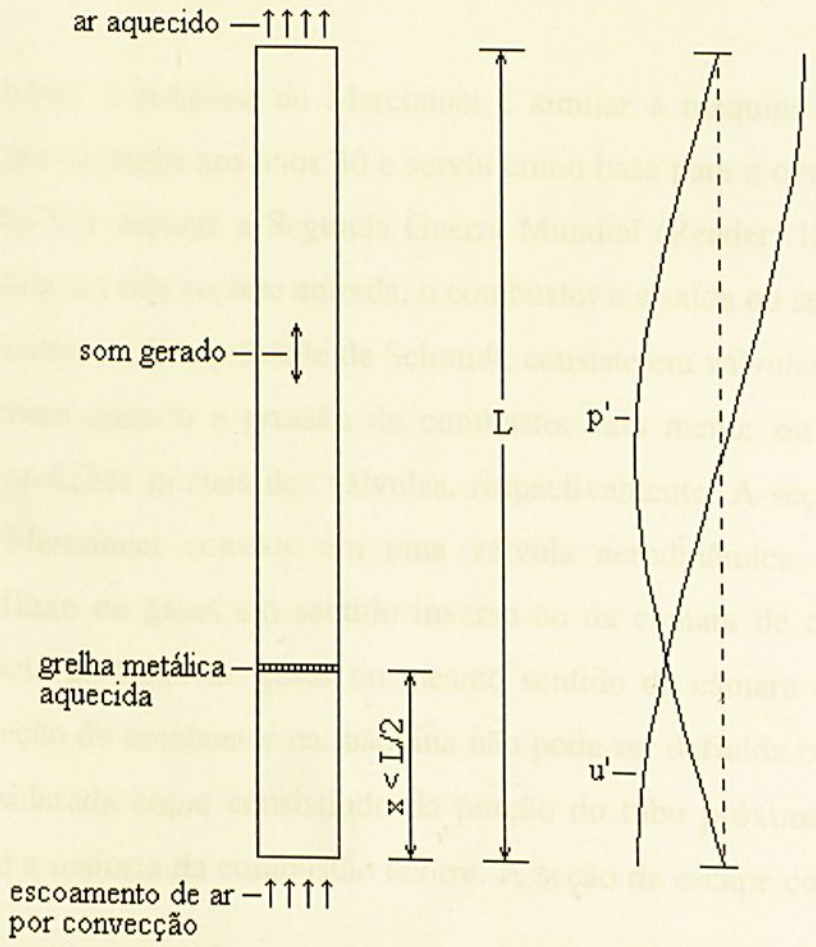


Figura 2.1 – Esquema de um tubo de Rijke com a respectiva estrutura de onda acústica do modo fundamental (p': pressão acústica; u': velocidade acústica).

2.3 – Algumas Aplicações do Processo de Combustão Pulsante

As primeiras tentativas conhecidas para utilizar o processo de combustão pulsante ocorreram no início do século XX (Putnam, 1979). As aplicações mais simples do processo de combustão pulsante foram nas áreas de propulsão e geração de energia em turbina a gás. A influência da máquina de combustão interna foi proposta por Lorin em 1908 por propulsão a jato. Nesta configuração, a combustão ocorre dentro de um cilindro e produz o escape de gás ou vapor através do bocal para produzir impulso. O cilindro da máquina está ajustado com uma combinação de cabo-pistão móvel para receber a força necessária para comprimir o conteúdo do cilindro na combustão. Um esquema diferente para a produção de impulso por combustão pulsante foi proposto por Marconnet em 1908 (Putnam, 1979).

A princípio, a máquina de Marconnet é similar à máquina de jato pulsante desenvolvida por Schmidt nos anos 30 e serviu como base para o conhecido motor do foguete alemão V-1 durante a Segunda Guerra Mundial (Reader, 1977). A máquina pode ser dividida em três seções: entrada, o combustor e a saída ou seção de escape. A entrada que descreve o jato pulsante de Schmidt, consiste em válvulas de pulsação que abrem ou fecham quando a pressão do combustor está menor ou maior do que a pressão nas condições iniciais das válvulas, respectivamente. A seção de entrada na máquina de Marconnet consiste em uma válvula aerodinâmica que oferece alta resistência a fluxo de gases em sentido inverso ao da câmara de combustão e uma baixa resistência ao fluxo de gases no mesmo sentido da câmara de combustão. A extensão da seção do combustor na máquina não pode ser definida com precisão, mas deve ser considerada como consistindo da porção do tubo próxima das válvulas de pulsação onde a maioria da combustão ocorre. A seção de escape consiste no restante do tubo.

Para iniciar a operação do combustor de Schmidt, a mistura combustível é admitida no combustor onde a ignição é feita por uma saída. O processo de combustão resultante está associado com o aumento da pressão que resulta no fechamento das

válvulas de pulsação e o movimento dos gases através do escape final. A inércia dos gases se movendo para a direita produz uma pressão negativa na câmara de combustão. Quando isto ocorre, as válvulas de pulsação abrem-se e admitem ar fresco dentro do combustor. Este ar mistura-se com o combustível que entra no combustor vindo de um recipiente separado que está capacitado a responder pela variação de pressão na câmara de combustão. A pressão negativa no combustor também resulta numa mudança de direção no fluxo de gases no fim do tubo, que retornam para dentro do combustor. Este refluxo dos produtos de combustão no final do tubo resulta numa pré-compressão da mistura combustível no interior do combustor (perto das válvulas de pulsação). A pré-compressão mais o contato da mistura combustível com as superfícies aquecidas, e a presença de radicais livres carregados nos produtos de combustão conduz a ignição da mistura combustível e ao aumento da pressão dentro do combustor.

O processo de combustão pulsante agora repetir-se-á indefinidamente sem o uso de uma faísca. A operação oscilatória resultante é controlada por leis acústicas e a frequência da operação está ligada a frequência do modo acústico fundamental e longitudinal de um tubo fechado de um lado e aberto de outro. O comprimento da máquina é aproximadamente igual a um quarto do comprimento de onda e a oscilação acústica tem um antinodo de pressão na extremidade fechada e um nodo na extremidade aberta. O impulso é produzido por uma força de reação na extremidade fechada quando os produtos de combustão escapam através do escape do tubo.

O aparelho de Schmidt é basicamente um tubo aberto em uma das extremidades e fechado na outra. Os alemães usavam gasolina como combustível que, no final da guerra, devido à escassez do produto, foi substituída por carvão pulverizado. Outras versões deste tipo de combustor foram desenvolvidas para geração de energia térmica (Sommers, 1961).

Princípios semelhantes aos utilizados por Marconnet e Schmidt foram também aplicados por Karavodine. que trabalhou no desenvolvimento da combustão pulsante

em turbina a gás em 1908 (Putnam, 1979). Uma aproximação diferente foi utilizada no mesmo ano por Holzwarth, que foi quem primeiro desenvolveu uma turbina a gás que empregava o processo de combustão pulsante. Novamente, a combustão era iniciada por um equipamento externo (por exemplo, faísca) e isto ocorria numa câmara de volume constante. O aumento de pressão era assumido como ocorrendo instantaneamente durante a combustão, com o fechamento da válvula de entrada de combustível e abertura do bocal. A inércia dos gases reduzia a pressão no combustor para um nível abaixo da pressão de retorno. Isto resultava na abertura da válvula de entrada de ar que permitia que o fluxo de oxidante entrasse no combustor. Além disso, este fluxo de ar também causava uma ligeira pré-compressão dos componentes do combustor. Como o ar continuava fluindo no interior do combustor, a válvula de combustível se abria. Em seguida, o bocal e a válvula de ar fechavam-se no combustor, enquanto o combustível continuava fluindo no combustor cheio de ar, aumentando sua pressão. Neste instante, a ignição ocorria e o processo se repetia. Nesta configuração, os gases deixando o combustor, se expandiam através das pás das turbinas para produzir trabalho. A operação bem sucedida da turbina Holzwarth foi realizada com combustível líquido. Experimentos com carvão pulverizado não conseguiram realizar a combustão completa.

O combustor Holzwarth foi provavelmente o precursor dos combustores e foi considerado por várias de suas aplicações. Combustores semelhantes que queimam gases são recentemente comercializados em diferentes aplicações como o próprio Holzwarth previu, por exemplo, o aquecimento de água (Putnam, 1979). Tais combustores apresentam economia de combustível (altas eficiências térmicas) e reduzem a formação de poluentes em comparação com os convencionais.

Um combustor conhecido como o "vaso de combustão" foi desenvolvido por Reynst nos anos 30 (Reynst, 1961). O instrumento pode ser construído de um pote de vidro com diâmetro de 70 mm coberto com metal no topo. Um orifício de diâmetro 13 mm é feito no centro da cobertura e álcool (metanol ou etanol) é colocado no interior do pote para produzir uma leve camada de combustível líquido no fundo. Para iniciar a

operação, o orifício na tampa é coberto e o pote é agitado até que o álcool cubra todas as paredes internas. Em seguida, o orifício na tampa seca e o ar é soprado dentro do pote através da tampa aberta para produzir uma mistura de combustível. Um fósforo aceso é aproximado das vizinhanças do orifício na tampa e a mistura explode, estabelecendo um processo de combustão pulsante na operação.

A ignição e a combustão da mistura no interior do pote de combustão da mistura são seguidas por um incremento de pressão de um estado inicial para um nível máximo. Devido a uma diferença de pressão entre o lado de dentro e o lado de fora do pote, um jato quente dos produtos de combustão é expelido fora do pote através do orifício da tampa. Devido à inércia do gás expelido e às perdas de calor para as paredes do pote, a pressão de dentro cai para um nível menor do que a pressão de fora. O vácuo dentro do combustor resulta em um fluxo de ar fresco dentro do pote através do orifício da tampa. O ar entrando no combustor forma um *vortex* que mistura com o combustível que continuamente se evapora da camada líquida do fundo. O processo pode proceder enquanto houver combustível e as paredes continuarem se aquecendo. As condições de operação são geometricamente similares ao aparelho de ressonância Helmholtz (Zinn, 1986).

Há diferenças fundamentais entre os "vasos combustores" do tipo Reynst e os combustores tipo Schmidt e que estão diretamente relacionadas às suas geometrias e as suas características de fluxos internos e (possivelmente) processos de combustão. No tubo Schmidt, o ar e os produtos de combustão entram e deixam o combustor através de aberturas diferentes em extremidades opostas do sistema e a pressão varia com o tempo. Em contraste, o ar e os produtos de combustão entram e deixam os "vasos de combustão" de Reynst através da mesma abertura e a pressão no combustor é aproximadamente uniforme com o tempo. As diferenças entre os dois instrumentos são também responsáveis pelas diferentes características de fluxos que devem resultar em mecanismos diferentes de combustão. A freqüência do "vaso de combustão" de Reynst, usualmente menor do que 50 Hz é inferior a do combustor tipo Schmidt de

dimensões similares. Se ocorressem oscilações no tubo tipo Schmidt dentro do "vaso de combustão" Reynst, sua freqüência deveria ser em torno de 2000 Hz.

2.4 – Combustores Tipo Rijke

Outra aplicação da combustão pulsante foi introduzida por Severyanin (em Putnam, 1979) na então União Soviética, e desenvolvida por Zinn e colaboradores nos Estados Unidos (Zinn et al, 1982; Carvalho, 1983; Carvalho et al, 1984; Wang, 1985). O combustor recebeu a denominação de combustor tipo Rijke, por consistir de um tubo de Rijke cuja grelha metálica original foi substituída por um leito em combustão. O combustor queimava carvão mineral e madeira, buscando incorporar à simplicidade do projeto, por não possuir partes móveis, as vantagens econômicas da combustão pulsante citadas na literatura, como altas taxas de consumo de combustível e de transferência de calor para um volume reduzido de câmara (Hanby, 1967; Hanby, 1968) e baixas taxas de geração de poluentes (Belles, 1979; Putnam, 1979).

Carvalho (1983) avaliou o desempenho característico da queima de carvão mineral em um combustor pulsante tipo Rijke. A queima do combustível sólido ocorria em leito posicionado a ¼ do comprimento do tubo. Foi construído um combustor no qual, para diversas razões ar/combustível, foram medidos os níveis de pulsação, as freqüências de oscilação, as temperaturas em diferentes locais e as concentrações de CO, CO_2, NO_x e SO_2. Em seu estudo foi possível demonstrar que a tecnologia funciona para diversas razões de ar/combustível e que os máximos de amplitude de pressão acústica ocorrem próximo da estequiometria. Foi possível observar também que o combustor promove um processo intenso de mistura entre combustível e ar, resultando em altas eficiências de combustão (superiores a 95 %), devido às baixas concentrações de CO e partículas não queimadas.

A partir de 1985, novas versões do combustor tipo Rijke foram desenvolvidas no Brasil, no LCP/INPE, nas quais foram testados, como combustível, álcool etílico

(Couto, 1989; Lacava et al., 1997), carvão vegetal (Ferreira e Carvalho, 1990), turfa peletizada (Ferreira et al., 1990), casca de dendê (Torres et al., 1992) e GLP (Momma, 1993; Ferreira, 1997). Assim pode-se considerar como já suficientemente conhecida a tecnologia de produção de fluxos de gases quentes com ondas acústicas em tubos de Rijke.

Couto (1989) criou um modelo acústico teórico de um tubo de Rijke cujas equações são solucionadas analiticamente. Além disso, desenvolveu um modelo dinâmico para o projeto do tubo e investigou um novo mecanismo para a origem das oscilações acústicas em câmaras de combustão. Uma planta piloto foi construída e utilizada para medir a eficiência da combustão do etanol e os coeficientes de transferência de calor de um cilindro situado no eixo longitudinal do tubo.

Momma (1993) estudou os efeitos termoacústicos em tubos de Rijke operando com chamas gasosas de difusão. O equipamento media 3,2 m de comprimento por 20 cm de diâmetro.O distribuidor de gás consistia de uma pequena câmara onde se encaixavam pequenos tubos dispostos radialmente, cujas paredes continham uma fileira de furos. Uma grade metálica poderia ser colocada sobre o distribuidor e, sobre esta grade, dispunham-se camadas de esferas de argila. Quando o gás era aceso, as esferas simulavam um leito de combustíveis sólidos e podia-se obter os maiores níveis de amplitude de pressão em testes com uma camada de esferas de argila, independente da vazão de GLP (gás liquefeito de petróleo) ou da razão ar-combustível.

Ferreira (1997) demonstrou o critério de Rayleigh em um tubo de Rijke utilizando equação similar a da conservação da energia mecânica. Além disso, desenvolveu um modelo correlacionando as freqüências de oscilação e as temperaturas da região de queima, demonstrando que os valores experimentais aproximam-se da teoria quando as condições de contorno nas interfaces do tubo de Rijke são tais que tanto a pressão quanto velocidade acústicas são contínuas. Na parte experimental de sua pesquisa, foram construídos dois combustores, de 1,4 e 2,8 m de comprimento, respectivamente, e testadas chamas gasosas pré-misturadas e de difusão. Foi possível

observar a relação das variáveis acústicas com o posicionamento do queimador e as diferentes razões ar/combustível. A parte final de sua pesquisa foi voltada para o aperfeiçoamento de combustores tipo Rijke para combustíveis sólidos, detalhando montagens inovadoras.

Martins (1998) fez um trabalho experimental obtendo o comportamento das oscilações acústicas com relação à emissão de poluentes, principalmente os óxidos de nitrogênio. Utilizando o mesmo combustor tipo tubo de Rijke de Ferreira (1997) e GLP como combustível, pode observar as emissões de CO, CO_2 e NO_x com e sem a injeção de amônia, considerado elemento dopante. Foi possível observar que houve maior formação de NO com a presença de amônia no processo pulsante.

A posição da fonte de energia tem papel fundamental na geração das ondas sonoras num processo termoacústico. Carvalho et al. (1989) determinaram a localização da fonte de calor que maximizaria a amplitude de pressão acústica no tubo. A análise mostrou as posições do aquecedor que excitavam não somente o modo característico fundamental do tubo, mas também o segundo e o terceiro harmônicos. Demonstraram que, para o modo característico fundamental, oscilações de pressão com máxima amplitude são excitadas quando o elemento aquecedor é colocado em L/4, sendo L o comprimento do tubo.

Wang (1985) e Carvalho (1995) puderam concluir que as pulsações fazem decrescer o tempo de residência das partículas abaixo de um certo diâmetro de corte e aumentam e emissão de particulados.

2.5 – Controle de Instabilidades de Combustão

Dependendo da aplicação, instabilidades de combustão podem ser benéficas, como no aumento da taxa de transferência de calor em secagem de grãos (Fraenkel, 1995), ou podem produzir resultados catastróficos como falhas do combustor em jatos ou motores de foguete (Zinn, 1986). Para atenuar essas instabilidades vários esquemas

de controle foram desenvolvidos. Os mais práticos e bem sucedidos foram aqueles baseados no princípio de uma realimentação para produzir o sinal de controle. Para extinguir uma oscilação, o controle é realizado gerando uma onda de pressão defasada exatamente 180 graus da onda de pressão dentro do tubo. Para gerar uma oscilação, o ângulo de defasagem tem que ser próximo de zero grau. Para implementar esse tipo de controle é necessário conhecer a onda de pressão existente e usar aquela pressão como uma entrada para o controlador na malha de realimentação. Um algoritmo baseado numa malha de realimentação foi desenvolvido e usado por Heckl (1988) para ativamente controlar e eliminar a instabilidade dentro de um combustor do tipo tubo de Rijke. Poinsot et al. (1989) apontaram vários estudos que usam sistemas de malha aberta, malha fechada e mecanismos de controle adaptativos para controlar instabilidades de combustão por atenuação da onda acústica. Estudos comprovaram a viabilidade de se implementar um controlador ativo em um tubo de Rijke.

É possível definir uma pressão e colocar o tubo a oscilar nessa pressão pré estabelecida através desse controlador. Desta forma consegue-se eliminar um grande inconveniente desse tipo de combustor, ou seja, definir a sua pressão interna, uma vez que sem controle, o valor dessa pressão fica sob critérios não totalmente conhecidos. Uma vez que uma dada pressão está estabelecida no interior do tubo, não se conseguiria mais mudá-la, sem o controle ativo, tornando-se extremamente difícil a ocorrência da repetibilidade de testes (Ferreira, 1997).

Existem dois métodos de controle para modificar a onda acústica no interior do combustor do tipo tubo de Rijke. O primeiro método é a modulação direta do campo de pressão acústica pelo meio de alto-falantes. Esse método é chamado de controle direto (Heckl, 1988; Poinsot et al., 1989; McManus et al., 1993). O segundo método usa modulação de combustível para modular o campo acústico indiretamente através de liberação de calor na qual afeta o campo de fluxo no reator e em conseqüência afeta o campo de pressão (Dubey, 1998).

Os modos de pressão associados com a frequência de oscilação podem ser ativamente controlados induzindo uma onda de pressão via alto-falante para atenuar ou aumentar a onda de pressão existente no sistema (Botura, 1998). A posição do alto falante no tubo é também de vital importância, pois modos de pressão não podem ser controlados por um alto-falante operando no nó de pressão de sua oscilação.

Botura (1998) desenvolveu um controle ativo utilizando lógica difusa para o tubo de Rijke. A lógica difusa foi desenvolvida e proposta por Zadeh (1965), e consiste em expressar as leis operacionais de um sistema de controle através de termos lingüísticos, ao invés de equações matemáticas.

2.6 – Escoamentos Pulsantes Associados a Secagem de Alimentos

Poucas investigações foram realizadas envolvendo a interação entre partículas de grãos de alimentos e o escoamento pulsante do gás de secagem. Somente encontramos na literatura estudos sobre o incremento da taxa de evaporação de gotas de combustível quando na presença de uma escoamento acústico (Couto, 1989; Carvalho et al., 1997; Dubey et al., 1997; Lacava et al., 1997).

A secagem, embora seja uma operação de rotina, devido às grandes vantagens que apresenta, tanto para a produção de grãos como de sementes, tem que ser feita com muito cuidado por ser, também, uma operação de alto risco, visto que pode danificar seriamente a qualidade do produto em processamento.

Tamburello et al. (1982) verificaram que as oscilações acústicas aumentam o coeficiente de troca convectiva entre o gás aquecido e os grãos. Houve um ganho de eficiência, um aumento na taxa de secagem e uma economia de custos.

Lockwood (1980) testou um sistema de secagem com o uso da tecnologia de Combustão Pulsante. As ondas acústicas que resultam da Combustão Pulsante propiciam o mecanismo ultra-rápido de transferência de calor e massa. Estas ondas de

som de faixas largas são compostas de ondas de compressão acopladas rigorosamente com ondas de rarefação. O resultado é uma remoção muito eficiente e rápida da camada limite, carregada de umidade em torno de cada partícula a ser seca, resultando em taxas de secagem melhores do que o de sistemas convencionais. Esta secagem de alta velocidade continua na região onde a taxa de umidade da superfície removível excede a taxa de difusão da umidade pelo interior da partícula para a sua superfície.

Lockwood postulou que ondas sonoras de largas faixas tendem a vibrar as partículas de secagem em suas freqüências naturais. Acredita-se que o fluxo mais rápido da umidade para a superfície ocorra devido ao mecanismo responsável pelo efeito "push-pull" das ondas de compressão-vácuo.

Taxa alta de remoção de umidade significa secagem "high-speed" ou secagem de alta velocidade. O fluxo estável próximo à partícula sempre forma uma camada limite estagnada. Sabe-se que há uma mistura muito pequena da camada limite com a passagem do fluxo de ar, o que torna ineficiente o sistema de secagem sendo portanto necessária a remoção desta camada limite para se obter uma secagem eficiente. O aumento da velocidade de remoção da camada limite acontece quando se dá uma invasão e um bombardeamento das partículas a serem secas por ondas sonoras.

As ondas sonoras consistem do acoplamento das ondas de compressão e rarefação. São também conhecidas como "Sonic Boom", ondas de explosões.

A queda do teor de umidade, controlada pela taxa de difusão da umidade do interior da partícula para superfície da qual esta umidade é removida, caracteriza as secagens convencionais. Este processo é considerado lento e ineficiente. Por outro lado, o fluxo de umidade do interior da partícula para a sua superfície é mais rápida pelo mecanismo de bombardeamento com ondas sonoras, já mencionada neste trabalho.

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18 19

Fraenkel (1995) realizou um estudo teórico perturbando com parâmetros acústicos os coeficientes de troca térmica encontrados na literatura para a interação entre um gás quente e grãos (Zaitsev et al., 1976; Calado, 1993). Definindo uma razão adimensional entre os coeficientes de troca por convecção nos regimes pulsante (h_p) e permanente (h), o primeiro obtido por integração numérica no período de oscilação e o segundo tomado como o valor referente ao escoamento permanente de mesma velocidade média, verificou-se que esta razão apresentou valores significativamente acima da unidade para algumas amplitudes de pressão acústica do escoamento pulsante. A Figura 2.2 mostra valores da razão h_p/h para dois tipos de grãos diferentes, cujos coeficientes de troca em regime permanente foram determinados por Bakker-Arkema e Gupta e Srinivason (em Calado, 1993) ($\overline{v}$ é a velocidade média do escoamento). A figura evidencia o potencial da utilização de escoamentos pulsantes em secagem de grãos.

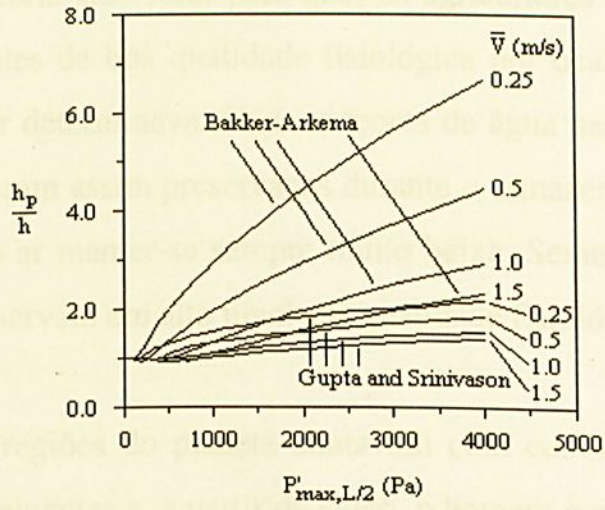


Figura 2.2 – Razão h_p/h na seção de saída de um tubo de Rijke como função da amplitude de pressão acústica na seção média do mesmo tubo (Fraenkel, 1995).

CAPÍTULO 3 CONSIDERAÇÕES SOBRE SECAGEM DE GRÃOS

3.1 – Breve Histórico sobre Secagem

Acredita-se que a agricultura tenha sido descoberta há aproximadamente 10.000 anos quando, de acordo com hipóteses de historiadores, o homem teria observado, pela primeira vez, que as plantas se originam de plântulas que, por sua vez, são conseqüência da germinação de sementes. Graças a esta descoberta, foi e é possível alimentar um número impensavelmente maior de pessoas do que pelo simples sistema de coleta e caça até então predominantes.

O desenvolvimento maior da agricultura, depois de seu surgimento, deu-se na região que hoje chamamos de Oriente Médio. Vários foram os fatores que levaram essa região a apresentar uma agricultura tão avançada em tempos tão antigos; um dos mais importantes é a alta fertilidade dos solos. Um outro fator começou a ser considerado: a baixa umidade relativa do ar que normalmente ocorre na região. A baixa umidade do ar teria sido fator pelo qual os agricultores daquela região sempre contavam com sementes de boa qualidade fisiológica por ocasião da semeadura. As baixas umidades do ar determinavam baixos teores de água nas sementes por ocasião da colheita, as quais eram assim preservadas durante o armazenamento, em virtude de a umidade relativa do ar manter-se sempre muito baixa. Sementes conservadas secas são sementes que conservam em alto nível sua qualidade fisiológica.

Nem todas as regiões do planeta contavam com condições adequadas para a secagem natural das sementes e, a partir de então, o homem percebeu a importância da secagem para a preservação das sementes e grãos. Até um certo ponto da História da Humanidade, os métodos de secagem eram do tipo a que chamamos "natural", ou seja, que fazem uso da energia solar e do vento para a secagem das sementes, sem a intermediação de qualquer equipamento mecânico.

Com relação à secagem em equipamentos fabricados pelo homem, à qual se convencionou chamar secagem artificial, os dados são poucos e também não muito

precisos. Foster (1973) relatou em seus estudos que os Estados Unidos já faziam uso de secagem artificial em 1870, e que por muitos anos o uso de secadores restringia-se às grandes empresas agrícolas; em escalas rotineiras de produção, a secagem era sempre feita pelo método natural.

Hall (1980) menciona que o uso de secadores artificiais tornou-se prática rotineira a partir da 2ª Guerra Mundial, dentro da filosofia de mecanização das atividades humanas em geral e as da agricultura em particular. A necessidade de produzir grandes quantidades de alimentos para os soldados e para estocar para a população civil levou as autoridades governamentais dos países beligerantes, e até mesmo dos não envolvidos, a estimular a agricultura. Grãos produzidos em grandes quantidades exigiam colheitas mais rápidas e armazenamento de grandes quantidades. Outros motivos contribuíram para o desenvolvimento dos secadores artificiais, por exemplo os aperfeiçoamentos constantes da Engenharia Mecânica e da genética. Novas práticas culturais levaram a aumentos de produção e é importante que se relacionem os estudos de maturação fisiológica de sementes, iniciados em torno de década de 20, os quais indicam que o ponto de colheita ocorre em torno de 10 a 20 dias antes do ponto que, normalmente, se considera como sendo o de colheita e que, nesse ponto as sementes, em geral, apresentam teor de água entre 30 e 50%.

Foster (1973) menciona que secadores do tipo contínuo foram os primeiros a ser desenvolvidos para atender ao armazenamento em silos e armazéns, ou seja, visando entrar em fluxos de grandes quantidades de grãos sendo processados. Em propriedades agrícolas, o modelo desenvolvido procurava secar e armazenar, se possível, no mesmo lugar. Os secadores baseados neste modelo eram designados secadores estacionários.
Após a 2ª Guerra Mundial, principalmente na década de 50, o custo da energia elétrica era muito baixo. Durante essa fase, o desenvolvimento em sistemas que economizassem energia foi muito pequeno. Com o passar dos anos, e a industrialização se intensificando (no Brasil, com criação da indústria automobilística), o preço da energia foi aumentando e estudos começaram a ser feitos visando economizar energia. As tecnologias que começaram a ser desenvolvidas a partir dessa

época foram as seguintes: recirculação do produto, melhor controle da velocidade do ar, uso de novas direções para o fluxo de ar, resfriamento do produto, uso de energia solar, etc.

Assim, os processos de secagem consistem em essência na remoção de líquido de um sólido por evaporação. Quando o sólido seca ocorrem dois processos fundamentais e simultâneos (Calado, 1993):

- transferência de calor para evaporar o líquido que se encontra tanto no interior quanto na periferia do material;
- transferência de massa na forma de líquido ou vapor dentro do sólido e de vapores a partir da superfície.

A transferência de calor pode ocorrer por convecção, condução, radiação ou uma combinação destes processos. Independentemente do tipo de troca, o calor deve migrar para a superfície externa e daí para o interior do sólido (Fraenkel, 1995).

O fluxo de massa dentro do grão pode ocorrer por diversos métodos diferentes (Porter, 1980):

- difusão em sólidos homogêneos;
- escoamento capilar;
- gradiente de pressão;
- gravidade; e
- seqüências de vaporizações e condensações.

Conforme já mencionado, a secagem de produtos agrícolas pode ser realizada de duas formas: natural e artificial. Define-se por secagem natural os métodos em que pela incidência da radiação solar tem-se a redução do teor de umidade dos produtos. A grande desvantagem dessa modalidade está na dependência das condições climáticas.

Já a secagem artificial ou mecânica consiste em submeter o produto à ação de uma corrente de ar quente que atravessa a massa de grãos.

A secagem de grãos, quando se usa ar aquecido mecanicamente, é uma operação de alto custo; no entanto, apresenta uma série de vantagens com relação à secagem natural (Puzzi, 1986):

- a secagem pode ser processada, independentemente, das condições do tempo;
- existe a possibilidade de se estabelecer um programa de operação com mais facilidade;
- como o processo é mais rápido do que o natural, ao sol, há um menor intervalo de tempo, que impede o desenvolvimento de fungos, insetos e roedores.

Durante a maioria desses processos de secagem a camada limite estagnada se forma em torno das partículas e há pequena mistura entre esta camada limite e a passagem do fluxo quente de gás o que prejudica as taxas de transferência de calor. Para uma redução de custo e intensificação do processo seria preciso um melhoramento nas taxas de transferência de calor e massa (Tamburello et al., 1982).

Os trabalhos desenvolvidos em secagem artificial visam principalmente acelerar o processo pela diminuição do tempo de secagem objetivando o aumento da produtividade. A melhoria da eficácia energética é também objeto de estudos intensos.

3.2 – Reumidificação de Grãos

É prática comum, nas experiências de secagem, reumidificação dos grãos com teor muito baixo de umidade, de 8 a 10 % em base úmida (b.u.) (Calado, 1993). Algumas técnicas usuais são:

- Imersão dos grãos em água líquida; em recipiente isolado, durante 3 dias, a 10 °C; em tambor rotativo isolado, durante 72 horas, 3 rpm.

- Mistura dos grãos com água líquida; em sacos plásticos, durante 2 horas, a 25 °C.
- Aspersão periódica (5 dias a 25 °C) de água líquida nos grãos acondicionados em sacos plásticos.
- Ambiente fechado em atmosfera de vapor saturado de água.
- Fluxo de ar com umidade relativa de 95 %.

É de se esperar que grãos com água natural apresentem uma menor taxa de secagem em relação em relação a grãos reumidificados, seja por qualquer técnica. Calado (1993) utilizou três das técnicas mencionadas anteriormente.

Descrevemos sucintamente a seguir os processos comumente utilizados para reumidificação de milho e soja.

Para milho, a água é colocada sobre os grãos contidos numa betoneira que girava a uma certa velocidade, de modo a garantir uma homogeneização. Ao final de cerca de duas horas, a água da superfície é reduzida através de uma etapa de secagem natural.

Para soja, inicialmente submetem-se os grãos com umidade natural (relativa à umidade de equilíbrio higroscópio nas condições de temperatura e pressão ambientes), obtida direto das fazendas, a testes de secagem em que seu teor de umidade era bastante reduzido. Em seguida, regenera-se a umidade através de dois métodos: a) umidificação lenta: a água é borrifada diariamente na superfície do grão durante cinco dias, sendo eliminada através da secagem realizada no sexto dia; b) umidificação rápida: a quantidade de água necessária é adicionada em um período de duas horas, sendo logo em seguida efetuada a secagem.

3.3 – Bases Teóricas sobre Processos de Secagem

O ar atmosférico é composto de uma mistura de gases e de vapor d'água. Os gases do ar compõem o que se chama de "ar seco"; associado ao vapor d'água, o ar

seco forma a atmosfera. Tanto as moléculas do ar seco como as do vapor de água contêm uma determinada quantidade de energia térmica, recebida do sol ou de outra fonte (queima de combustíveis, por exemplo) e que determina a temperatura, a umidade relativa, a elasticidade, a densidade e outras propriedades do ar e, no nível molecular, o grau de excitação (motilidade) de cada uma dessas moléculas. Quanto maior aquela quantidade de energia, maior a temperatura, menor a densidade do ar, maior a elasticidade, menor a umidade relativa e maior a movimentação das moléculas tanto dos gases quanto do vapor d'água.

A energia térmica contida no ar seco é designada calor sensível, ao passo que a energia do vapor d'água, calor latente. O calor sensível é o que atua sobre corpos em contato com o ar e é o mesmo que atua sobre a água no processo de evaporação.

Supondo que aquela massa de ar se situe sobre a superfície de uma lâmina de água, temos: da água para o ar, encontra-se um gradiente de concentração de moléculas de água, isto é, na água líquida, uma alta concentração de moléculas de água e, no ar, um pequeno (comparativamente) número de moléculas de água, dispersas em estado de vapor. A busca do equilíbrio determina uma movimentação de moléculas do estado líquido para o de vapor. Quando se considera a situação inversa, isto é, do ar para a água, encontra-se um gradiente de energia térmica, ou seja, no ar encontra-se um alto nível de calor sensível, enquanto que na água não há calor sensível, apenas latente. Considerados os dois gradientes, a situação que se tem é a da Figura 3.1, onde (1) denota o gradiente de calor sensível e (2) denota o gradiente de moléculas de água.

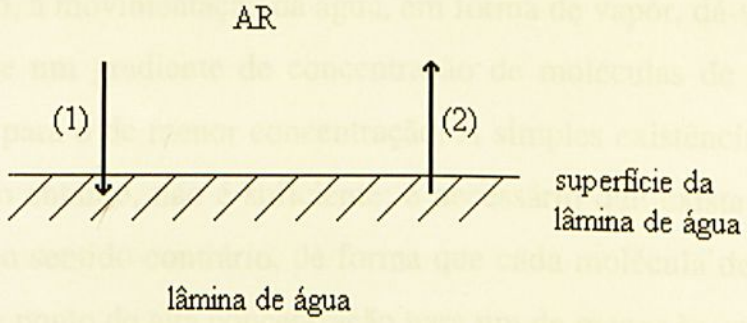


Figura 3.1 – Esquema dos fluxos de energia térmica e de vapor d'água entre uma lâmina d'água e o ar circundante.

As setas na Figura 3.1 indicam as direções da movimentação da energia calórica ou das moléculas de água. Assim, a tendência é de energia térmica passar do corpo do ar para o da água e de moléculas de água do corpo da água para o do ar. Ocorre, desta forma, uma troca: o calor flui para a água e moléculas de água passam para o ar. Uma determinada molécula de água, situada na superfície da lâmina de água, recebe a energia que está vindo do ar e, com isso, adquire condições de se soltar das outras às quais está ligada. Circundada desta nova carga de energia térmica, essa molécula desprende-se das outras e solta-se no ar, flutuando, originando e integrando-se ao estado chamado "estado de vapor".

Se ar e água formassem um sistema fechado, verificar-se-ia que o processo de secagem descrito é um processo adiabático, ou seja, as trocas entre o corpo de água e o de ar se fazem com preservação da energia, visto que o calor sensível utilizado para evaporar a água passa a se constituir em calor latente, ligado ao vapor d'água.

Se no lugar de uma lâmina de água houvesse uma semente em contato com o ar de secagem, desde que se formassem os gradientes considerados, a secagem daquela semente ocorreria por processo de evaporação igual ao que foi descrito.

Em resumo, a movimentação da água, em forma de vapor, dá-se essencialmente pela existência de um gradiente de concentração de moléculas de água, sempre no sentido de maior para o de menor concentração. A simples existência do gradiente de vapor de água, no entanto, não é suficiente; é necessário que exista um gradiente de energia térmica no sentido contrário, de forma que cada molécula de vapor d'água se movimente de um ponto de alta concentração para um de menor às custas de uma certa quantidade de energia.

A essa energia térmica que movimenta uma molécula de água ao longo de um gradiente de concentração, dá-se, também, o nome de pressão de vapor. A pressão de vapor existe, tanto na água em forma de vapor como na água adsorvida às partículas coloidais na semente. Esta água adsorvida é descrita por Hunt e Pixton (1974), como sendo aquela cujas forças que agem são intermoleculares, também conhecidas como forças de Van der Waals. A movimentação do vapor d'água vai dar-se na direção em que a pressão de vapor estiver mais forte.

Se a pressão de vapor de água da semente for maior do que a pressão de vapor da água da atmosfera, a semente perde água; se for o contrário, a semente absorve água. A pressão de vapor do ar é função essencialmente da umidade relativa; por outro lado, como a temperatura e a movimentação (vento) do ar influem sobre a umidade relativa (U.R.), esses fatores influem também sobre a pressão de vapor do ar. A adição de energia a uma semente, por exemplo, faz com que as moléculas de água se agitem mais, ficando mais fáceis de se desprenderem da semente, vaporizando-se. A ventilação do ar retira do ambiente sobre a semente as moléculas de água que se vaporizaram, criando a possibilidade de que o déficit de pressão de vapor se mantenha no sentido semente – ar e, portanto, que a secagem continue.

3.4 – Alguns Aspectos Práticos de Processos de Secagem

Carvalho (1994) menciona em seus trabalhos que a secagem é um processo simultâneo de transferência de calor e de umidade. O calor é necessário para evaporar

a umidade que é removida da superfície do produto pelo meio externo, geralmente o ar.

Exposta a elementos de secagem, uma semente seca em dois estágios. Um primeiro, que se inicia a partir de um ponto qualquer de um teor de umidade elevado, e que decresce até valores entre 16 e 17 %, recebe o nome de período de secagem a taxa constante. Como o próprio nome diz, a perda de água removida na unidade de tempo é sempre a mesma. Ao atingir o teor de umidade da semente um determinado valor (que se acredita estar entre 16 e 17 % e ao qual denomina-se teor de umidade crítico), a taxa de secagem passa a ser variável, tornando-se cada vez menor à medida que o processo avança. Esse período recebe o nome de período de secagem a taxas decrescentes.

Pesquisadores como Brooker et al. (1974) postulam que sementes de cereais secam integralmente dentro do período de taxas decrescentes, tendo em vista que, nessas espécies, o período de taxa constante é tão rápido que não se justificaria incluí-lo em uma análise do processo de secagem.

CAPÍTULO 4 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO E PROCEDIMENTOS

4.1 – Equipamento Utilizado

Para a realização deste trabalho experimental, primeiramente foi utilizado um combustor tipo tubo de Rijke em aço inox 316, com 280,0 cm de comprimento e 7,2 cm de diâmetro interno, já montado no LCP/INPE, e utilizado anteriormente por Martins (1998). Para o presente trabalho, foi instalado um complemento na base do tubo, de 10,0 cm, para o controle direto com alto-falante, conforme indicado por Botura (1998). O combustor é mostrado na Figura 4.1.

O tubo possui câmara de desacoplamento de 60,0 cm de diâmetro interno e 39,5 cm de altura para simular as condições de contorno de tubo aberto na extremidade inferior e para o controle da vazão do ar de combustão. O mesmo possui uma camisa d'água para refrigeração de diâmetro externo 10,2 cm e interno de 7,6 cm.

Na primeira etapa de testes, pretendia-se apenas tornar o combustor operacional com temperatura na descarga, dentro da faixa adequada para secagem de grãos de soja.

Foi utilizado o mesmo queimador de Ferreira (1997) e Martins (1998), com diâmetro nominal de 12,0 mm e cerca de 300,0 mm de comprimento. Na sua parte superior há um tampão com 6 furos de 1,0 mm de diâmetro espaçados ao redor de uma circunferência de 3,8 mm de raio. Na parte de central há um furo cego roscado para a fixação de um disco maciço de 3,0 mm de altura e um ressalto de 0,3 mm para promover o escoamento do gás pelos orifícios de 1,0 mm, desviando o fluxo para a direção radial.

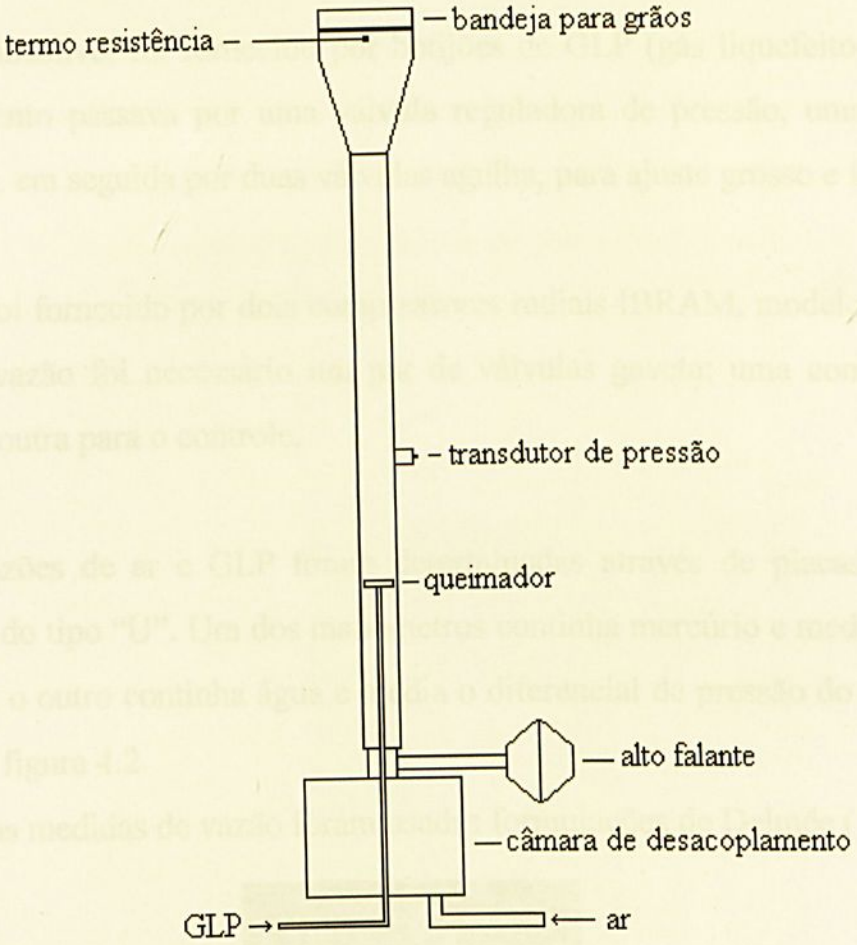


Figura 4.1 – Combustor tipo Rijke utilizado na primeira fase do trabalho.

No combustor foi colocado um termopar chromel – alumel (bitola 1,5 mm, isolação mineral) na entrada da bandeja de grãos para monitorar a temperatura de saída do tubo. Depois, este termopar foi substituído por uma termo resistência, conforme mostrado na figura.

Um transdutor de pressão piezoelétrico Kistler modelo 7261 foi colocado na altura 5/8 do comprimento do tubo. Esta disposição permitia determinar o perfil da onda acústica no interior do equipamento. O transdutor foi ligado a um amplificador de carga Kistler, modelo 5006, cujas saídas foram acopladas a um osciloscópio Tektronix, modelo 7633.

O combustível foi fornecido por botijões de GLP (gás liquefeito de petróleo), cujo escoamento passava por uma válvula reguladora de pressão, uma válvula tipo liga/desliga e, em seguida por duas válvulas agulha, para ajuste grosso e fino da vazão.

O ar foi fornecido por dois compressores radiais IBRAM, modelo CR-8. Para o controle da vazão foi necessário um par de válvulas gaveta: uma com saída para a atmosfera, e outra para o controle.

As vazões de ar e GLP foram determinadas através de placas de orifício e manômetros do tipo "U". Um dos manômetros continha mercúrio e media a pressão de alimentação, o outro continha água e media o diferencial de pressão do dispositivo e é mostrado na figura 4.2

Para as medidas de vazão foram usadas formulações de Delmée (1987).

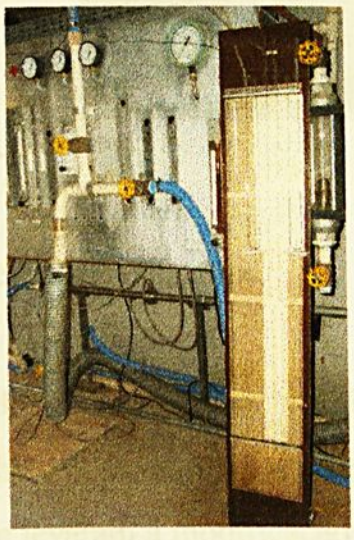


Figura 4.2 – Dispositivo placa de orifício e manômetro tipo "U".

Ferreira (1997) projetou e construiu um dispositivo do tipo placa de orifício com um tubo de 35,0 mm de diâmetro interno e tomadas de pressão nos flanges, apesar de, na maioria das determinações da vazão de ar ter 44,4 mm de diâmetro interno. Seus resultados provaram que o dispositivo de 35,0 mm poderia ser utilizado sem a necessidade de correções das medidas e este mesmo dispositivo foi utilizado para a determinação da vazão de ar neste trabalho.

O secador foi projetado e construído em aço carbono, com diâmetro superior de 20,5 cm e diâmetro inferior de 7,6 cm e foi acoplado na extremidade superior do tubo de Rijke através de flanges. Uma bandeja de diâmetro 20,5 cm e altura de 5,0 cm, com tela metálica e abertura suficiente para segurar os grãos de soja utilizada como leito de grãos. Esta bandeja podia ser removida em tempos determinados para que as amostras pudessem ser pesadas.

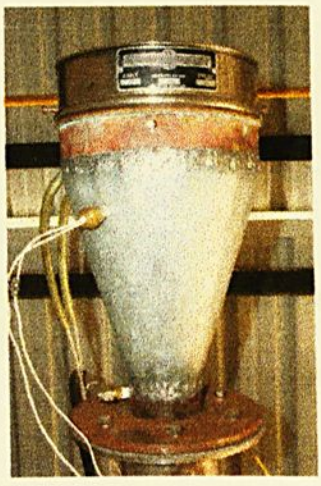


Figura 4.3 – Secador e bandeja de grãos

Houve a necessidade de modificar o sistema de combustão proposto originalmente para os trabalhos da presente dissertação e para tanto a queima de GLP foi descartada. As razões que levaram à modificação do sistema são discutidas no item 4.2.

Nesta segunda etapa de testes foi utilizada uma malha elétrica de resistência de 45,7 Ω para o aquecimento do ar de secagem. A malha foi envolta em tripé de tubos de aço inoxidável, inserido no tubo vertical próximo ao leito de grãos no secador. Um esquema do equipamento é mostrado na Figura 4.4, e uma fotografia do mesmo na Figura 4.5.

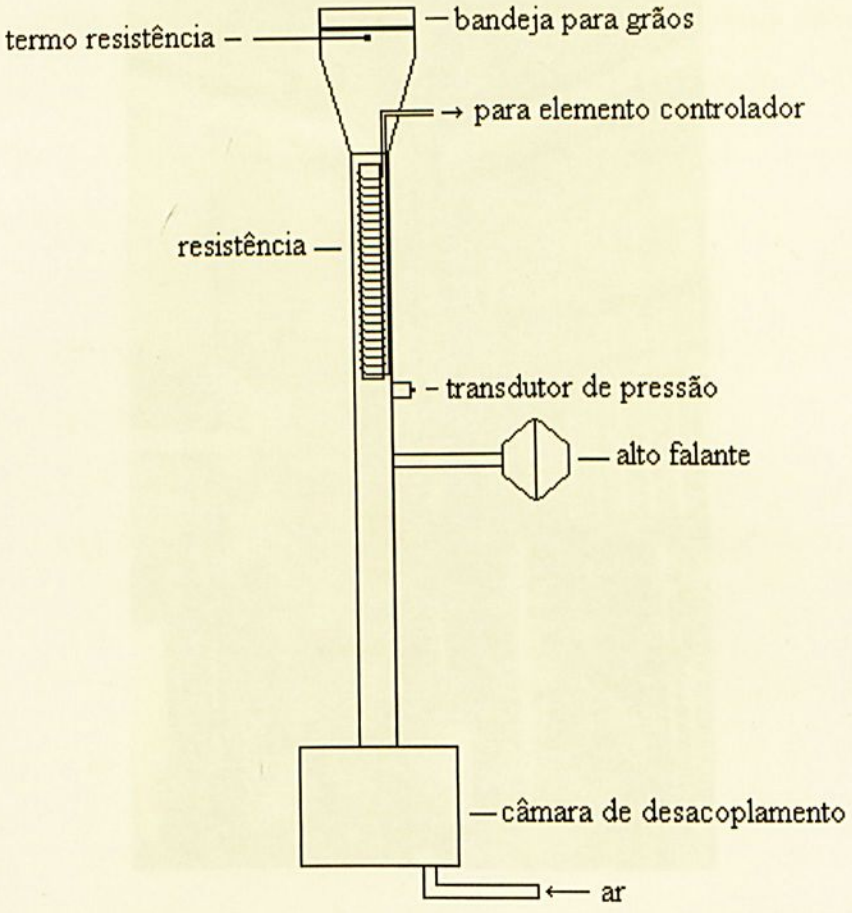


Figura 4.4 – Tubo vertical com aquecedor elétrico utilizado na segunda fase do trabalho.

Nesta etapa alguns dispositivos foram incluídos, outros trocados. Optou-se pela troca do termopar tipo chromel-alumel por uma termo resistência de platina com resistência de 100 Ω a 0°C, conhecida por Pt 100. Escolheu-se o Pt 100 como sensor de temperatura por possuir maior precisão dentro da faixa de temperatura utilizada para secagem de grãos, além de possuir características de estabilidade e repetibilidade melhores do que o termopar. A termo resistência foi instalada no secador abaixo do leito de grãos. O alto-falante foi instalado a meia altura do tubo para transformar os sinais elétricos gerados por um gerador de função em ondas acústicas dentro do tubo.

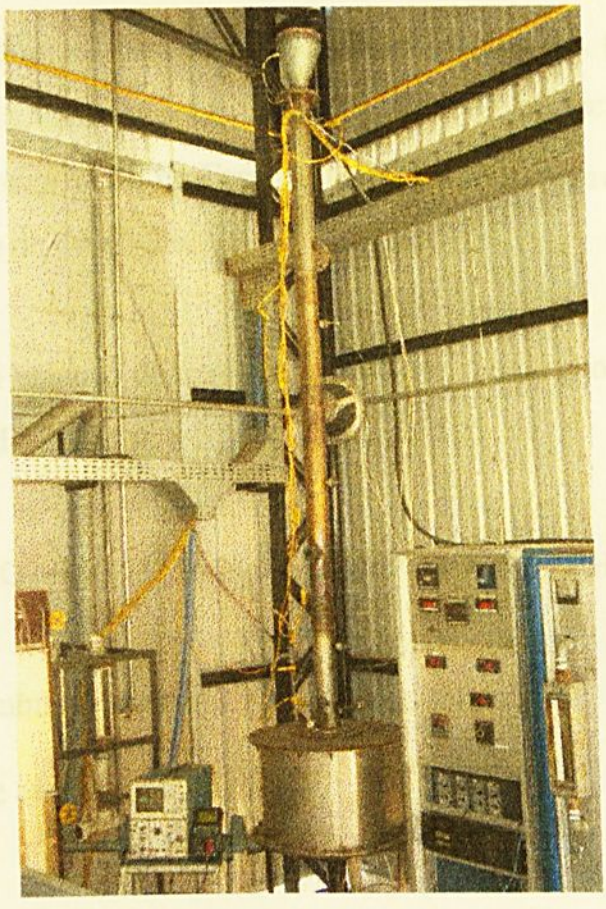


Figura 4.5 – Equipamento utilizado nos experimentos desta dissertação.

4.2 – Procedimentos Gerais

Na primeira etapa dos testes foi realizada a queima de GLP utilizando ar atmosférico como comburente.

O calor excessivo durante a secagem grãos de soja pode ocasionar danos aos grãos, motivo pelo qual recomenda-se 38 °C como temperatura máxima de secagem de soja para semente e 48 °C como temperatura máxima para secagem da soja destinada para agroindústria (www.ceagesp.com.br/arm_soja.htm). Dessa forma, tivemos que reduzir a temperatura, e alguns testes preliminares foram realizados para termos referência das temperaturas médias alcançadas no topo do tubo pelo combustor.

Sendo o GLP uma mistura de hidrocarbonetos pode-se, para efeito do balanço de massa, considerá-lo como um composto de fórmula molecular média CpHq. Foi assumida a mesma composição de Ferreira (1997), $C_{3,425}\,H_{7,824}$, o que resulta em um peso molecular médio de 49 g/gmol.

Foi realizado o balanço de massa e, para tanto, a equação estequiométrica para a composição adotada de GLP foi:

$$1C_{3,425}\,H_{7,824} + 5,381\,O_2 + 20,23256\,N_2 \rightarrow 3,425\,CO_2 + 3,912\,H_2O + 20,23256\,N_2 .$$

Assim, a razão ar/combustível em massa na estequiometria é:

$\left(\frac{AR}{C}\right) = 15,104$ g de ar/g de combustível.

A proporção entre o combustível e o oxidante foi definida pela razão ar/combustível normalizada, α, que é a razão $(m_{ar}/m_c)/(m_{ar}/m_c)_{esteq}$, onde m_{ar} é a vazão mássica de ar, m_c é a vazão mássica do combustível, e $(m_{ar}/m_c)_{esteq}$ é a razão ar/combustível estequiométrica.

O queimador foi colocado 44,5 cm da base. Esta posição foi escolhida para que a chama se concentrasse na metade inferior do tubo, e desta forma, se conseguisse, de acordo com o critério de Rayleigh induzir o primeiro modo de oscilação.

O procedimento de partida consistia em inicialmente deixar fluir o ar e em seguida através da janela localizada na metade inferior do tubo, colocava-se uma mecha de estopa acesa. Só então era aberta a válvula de alimentação de GLP e a combustão iniciada.

Ferreira (1997) verificou que o início do processo oscilatório era facilitado se as vazões de GLP e de ar fossem da ordem de 0,35 e 6,00 g/s, respectivamente. Foram

escolhidas estas mesmas vazões para dar início aos testes e foram medidas, com termopar tipo K, temperaturas médias de 600°C.

Com testes preliminares, sem o uso de grãos para secagem, foi possível observar que seria necessário reduzir a temperatura na descarga e para isso dois métodos poderiam ser utilizados:

- aumento da vazão de ar de combustão, o qual foi denominado de "ar primário", ou
- criar outra entrada de ar, cujo ar seria chamado de "ar secundário".

A primeira solução foi descartada porque o aumento da velocidade de escoamento, provoca descolamento e apagamento da chama. Sendo assim, a segunda opção foi implementada.

Assim, foi feito um estudo de qual seria o melhor posicionamento e, de acordo com Couto (1989), um aquecimento a ¼ ou um resfriamento a ¾ do comprimento medidos a partir da base do tubo de Rijke encorajariam as oscilações acústicas. Dessa forma, foi injetado ar (que aqui chamaremos de ar secundário) a ¾ da altura do tubo.

Nos testes com aquecimento de ar por combustão foram utilizados dois compressores radiais diferentes em paralelo. Nas medidas de vazão de ar primário utilizou-se dispositivo de placa de orifício com diâmetro de tubo de 35,00 mm e 17,76 mm de orifício, manômetros diferenciais em U e termopar tipo K. Para medir a vazão do ar secundário utilizou-se rotâmetro de marca OMEL com condições de calibração de 60 ºC e 0,5 mbar.

Para todos os testes era necessário fazer a observação da pressão barométrica e da umidade relativa do ar por serem parâmetros importantes na secagem.

Observou-se durante os testes que as oscilações permaneceram perceptíveis pelo ouvido humano com vazões de ar secundário menores de 45 g/s e com temperaturas de 140 °C.

Para reduzir ainda mais a temperatura na descarga foi proposto utilizar a camisa d'água já existente no tubo de Rijke. Dessa forma foi possível chegar a temperaturas de 44 °C para vazões de ar primário de 6,300 g/s, de GLP de 0,257 g/s, de ar secundário de 55,000 g/s e de água de 21 l/min, mas sem obter oscilação. Entretanto, a camisa d'água estava vazando, provavelmente por causa de trincas ocasionadas pelo alto aquecimento que o tubo recebeu durante os inúmeros testes já realizados. Além disso, o tubo foi construído com materiais distintos e a dilatação dos mesmos é diferente nos pontos de solda. O vazamento de água alterava a umidade e, consequentemente, os parâmetros de secagem.

Para reparar esse problema e ainda manter temperatura baixa, utilizou-se uma vazão de 15 g/s de ar, ao invés de água, dentro da camisa com entrada no topo e saída na base (contra corrente), provocando decréscimos de 10 °C. O outro sentido de vazão do ar (da base para o topo) foi testado sem sucesso. Os resultados desses testes são mostrados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Vazões e temperaturas relativas aos testes preliminares.

GLP (g/s)	**Ar primário (g/s)**	**Ar secundário (g/s)**	**Ar_{camisa} (g/s)**	**α**	**T_{topo} (°C)**
0,156	2,893	60	15	1,23	77
0,233	6,321	53	15	1,80	41
0,214	6,600	60	15	2,04	44
0,153	5,847	60	15	2,53	39
0,153	5,671	50	15	2,46	47
0,153	5,708	60	15	2,47	39

Os testes provaram que é possível diminuir a temperatura de saída do tubo de Rijke para valores aceitáveis para secagem de grãos.

Observou-se que as últimas configurações, que utilizam ar secundário, não provocaram oscilações naturais, que é uma característica do tubo de Rijke. Portanto, optou-se por provocar oscilação utilizando alto falante posicionado no inserto de 10 cm na base do tubo, conforme mostrado na Figura 4.1.

Os resultados dos testes com indução de ondas acústicas no tubo por meio de um alto falante são mostrados na Tabela 4.2.

Em todos os testes com combustão observou-se a ocorrência de muita fuligem, mesmo com grandes excessos de ar primário, e apagamentos da chama. Para resolver esse problema, seria necessário realizar mais testes de combustão. No entanto, optou-se por não utilizar a combustão para provocar o escoamento pulsante, de modo a minimizar atrasos na obtenção do objetivo principal desta dissertação, que era examinar o efeito das pulsações na secagem.

Tabela 4.2 – Vazões e temperaturas relativas aos testes preliminares, com indução de ondas acústicas por alto falante.

GLP (g/s)	**Ar primário (g/s)**	**Ar secundário (g/s)**	**Ar $_{camisa}$ (g/s)**	**T_{topo} (°C)**	**α**	**Freqüência (Hz)**
0,154	6,040	60	15,0	48	2,60	145
0,220	5,671	60	16,5	33	1,71	70
0,220	5,671	60	16,5	33	1,71	143
0,220	6,441	60	16,5	40	1,94	143
0,163	6,441	60	16,5	42	2,62	143

Para aquecimento sem combustão foram eliminadas todas as entradas de ar para resfriamento, mantendo-se apenas o ar primário. O inserto de 10 cm foi retirado. As oscilações foram obtidas através de controle ativo, com o alto falante posicionado a meia altura do tubo, já que o posicionamento na base do tubo não propiciava níveis de pressão acústicas desejadas. Para medir a pressão acústica, o transdutor de pressão foi posicionado na altura de 5/8 do comprimento do tubo a partir da base. Esta posição foi escolhida mediante testes realizados variando as tomadas de pressão no tubo. Pretendia-se obter a posição na qual obter-se-ia o máximo de amplitude de pressão acústica para o modo fundamental porque a velocidade acústica na extremidade superior do equipamento, onde estava localizada a bandeja de grãos, era máxima. Os resultados estão listados na Tabela 4.3. A freqüência e amplitude de pressão acústica escolhidos foram 70 Hz e 28 mbar, respectivamente.

Tabela 4.3 – Freqüências e amplitudes obtidas.

L/8		**L/4**		**3L/8**		**L/2**		**5L/8**		**3L/4**	
F (Hz)	P (mbar)	F (Hz)	P (mbar)	F (Hz)	P (mbar)	F (Hz)	P (mbar)	F (Hz)	P (mbar)	F (Hz)	P (mbar)
71	12	69,5	20	70	25	68	25	69,5	28	70	25
114	8	115	11	115	8	175	28	113	6	113	10
175	25	174	19	228	16	283	12	174	22	175	11
227	15					945	12	228	12	285	13

Para realizar o aquecimento do ar sem combustão havia quatro possibilidades:

- ar passando em serpentina com aquecimento por combustão (fora do tubo);
- malha elétrica envolta na tubulação de ar primário;
- aquecedor elétrico de placas paralelas dentro e no topo do tubo;
- malha elétrica dentro do tubo envolto em tripé de tubo de aço no topo.

As três primeiras soluções não tiveram êxito. A primeira por não haver área suficiente para ocorrer aquecimento necessário, além de haver o perigo por estar ocorrendo combustão sem nenhuma proteção. A segunda aquecia o ar no início do tubo a altas temperaturas, mas a troca convectiva na câmara de desacoplamento e nas paredes do tubo não permitia que se alcançasse a temperatura desejada na descarga. A terceira obteve êxito na temperatura, mas as placas paralelas matavam as oscilações e não era possível chegar aos níveis de pressão necessários. A única solução viável foi utilizar uma malha elétrica de resistência de 45,7 Ω envolta em tripé de tubos de aço, inserido dentro do tubo vertical próximo ao leito de grãos. Com este dispositivo, foram alcançados níveis de temperatura adequados e de pressão acústica mais altos.

Para realizar o controle do aquecimento, primeiramente utilizou-se um Variac, com controle manual, mas optou-se por utilizar um controlador universal de processos (marca Novus, modelo N1100). O esquema do novo equipamento foi ilustrado na Figura 4.4.

4.3 – Procedimentos com a Soja Utilizada

A escolha do grão recaiu sobre a soja (*Glycine Max*) por sua forma aproximadamente esférica, de fácil análise e por ser um produto de ampla utilização. A soja é um produto de uso intenso na indústria de óleo desde 1970, além de ser um alimento de extraordinário valor nutritivo e de custo acessível (www.ceagesp.com.br/arm_soja.htm).

Em relação ao processo de secagem, verificou-se que as sementes de soja devem ser colhidas com teores de umidade em torno de 15 a 18% base úmida (b.u.), e a umidade recomendada para o armazenamento varia de 10 a 12 % b.u. (www.cnpq.br/areas/pronex/resumos/tecnologia/180_96.htm), dependendo das condições climáticas do local e do período de armazenamento. Deste modo, os grãos

devem necessariamente passar pelo processo de secagem e resfriamento que tem por finalidade preservar as características do produto por um longo período de tempo.

Uma saca de grãos de soja foi doada por uma fazenda do Vale do Paranapanema, no Estado de São Paulo. Testes no Laboratório Químico do LCP/INPE mostraram que o teor de umidade desta soja era de 10,4 % b.u. Portanto, foi preciso reumidificar os grãos para serem submetidos aos ensaios de secagem.

A umidificação artificial de soja não altera sua cinética de secagem, uma vez que os desvios percentuais são poucos significativos, em relação à curva de secagem da soja com umidade natural (Calado, 1993). Para reumidificar os grãos, utilizamos o método de aspersão periódica por 5 dias a 25 °C de água líquida nos grãos lacrados em sacos plásticos (Calado, 1993). O cálculo da umidade desejada pode ser estimado através da fórmula (Krzyzanowzki, F., 2002):

$$P_1\,(g) \times M_1(\%) = P_2(g) \times M_2\,(\%)\,, \qquad (4.1)$$

onde P_1 é o peso inicial da amostra de grãos, P_2 é o peso final da amostra de grãos, M_1 é a porcentagem de matéria seca inicial da amostra de grãos e M_2 é a porcentagem de matéria seca que se deseja obter.

As diferenças dos pesos final e inicial é a quantidade de água a ser borrifada, considerando a densidade da água igual a um.

Para a análise da umidade da soja utilizamos as recomendações do Ministério da Agricultura e Reforma Agrária (1992). O método escolhido para determinar o grau de umidade da soja foi o Método de Estufa a 105 °C, utilizado para todas as espécies de sementes e grãos. A percentagem de umidade foi calculada na base do peso úmido, aplicando-se a fórmula:

$$\%Umidade\ (b.u.) = \frac{100 \cdot (P - p)}{P - t}, \qquad (4.2)$$

na qual P é o peso inicial (o peso do recipiente e sua tampa mais o peso do grão úmido), p é o peso final (o peso do recipiente e sua tampa mais o peso do grão seco), e t é a tara (o peso do recipiente e sua tampa). O resultado final é dado pela média aritmética das percentagens de cada uma das sub amostras retiradas da amostra média. As amostras de soja utilizadas para determinação do teor de umidade pelo Método da Estufa a 105 °C foram inutilizadas.

Do estudo de processos de secagem de soja, citados por Calado (1993), escolheu-se um fluxo mássico de ar de 0,527 kg/m².s, o que para uma bandeja com 0,033 m² implica em uma vazão mássica de 17,4 g/s.

Nos ensaios foram realizadas pesagens em intervalos de 5 min para testes de pequena duração e 20 ou 30 min para testes de longa duração. A balança digital utilizada é de marca Gehaka, modelo BG4000 com precisão de 0,01 g.

Com os pesos medidos calculou-se a umidade por uma simples regra de três com base na umidade inicial.

CAPÍTULO 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 – Resultados para Temperatura de Secagem de 50 °C

No primeiro conjunto de testes, comparamos o efeito do escoamento pulsante com o não pulsante para massas iniciais de 50, 90 e 139 g de soja com umidade inicial de 25 %. Adicionalmente, foram testadas amostras de 240 g de soja com teor de umidade inicial de 26 %.

A Figura 5.1 mostra a variação da umidade com o tempo para a secagem de 50 g de soja com umidade inicial de 25 %, em uma temperatura de secagem de 50 °C, em testes com duas horas de duração. A vazão de ar foi de 17,4 g/s em ambos os casos. A umidade foi determinada a cada 5 minutos. Como os testes dos regimes pulsante e não pulsante foram realizados em dias diferentes, não foi possível repetir a umidade relativa do ar, que correspondeu a 35 % para o primeiro caso e 33 % para o segundo. No regime pulsante, a frequência e a amplitude de pressão medidas foram 70 Hz e 28 mbar, respectivamente.

Observamos nestes dois testes praticamente as mesmas curvas de secagem para os regimes pulsante e não pulsante, ou seja, com os presentes resultados não vislumbramos vantagem na utilização de oscilações acústicas. O tempo de duas horas mostrou-se muito pequeno para a redução da umidade a níveis aceitáveis para o armazenamento de grãos.

Se dividirmos as curvas de umidade em três partes, correspondentes às quedas de umidade de 25 para 24 %, de 24 para 23 % e de 23 para 22 %, temos os resultados da Tabela 5.1, da qual observamos, conforme esperado, o grau de dificuldade crescente em se retirar a umidade do alimento conforme o mesmo torna-se mais seco. No terceiro intervalo de queda de umidade, o tempo requerido é 12 vezes maior que no primeiro.

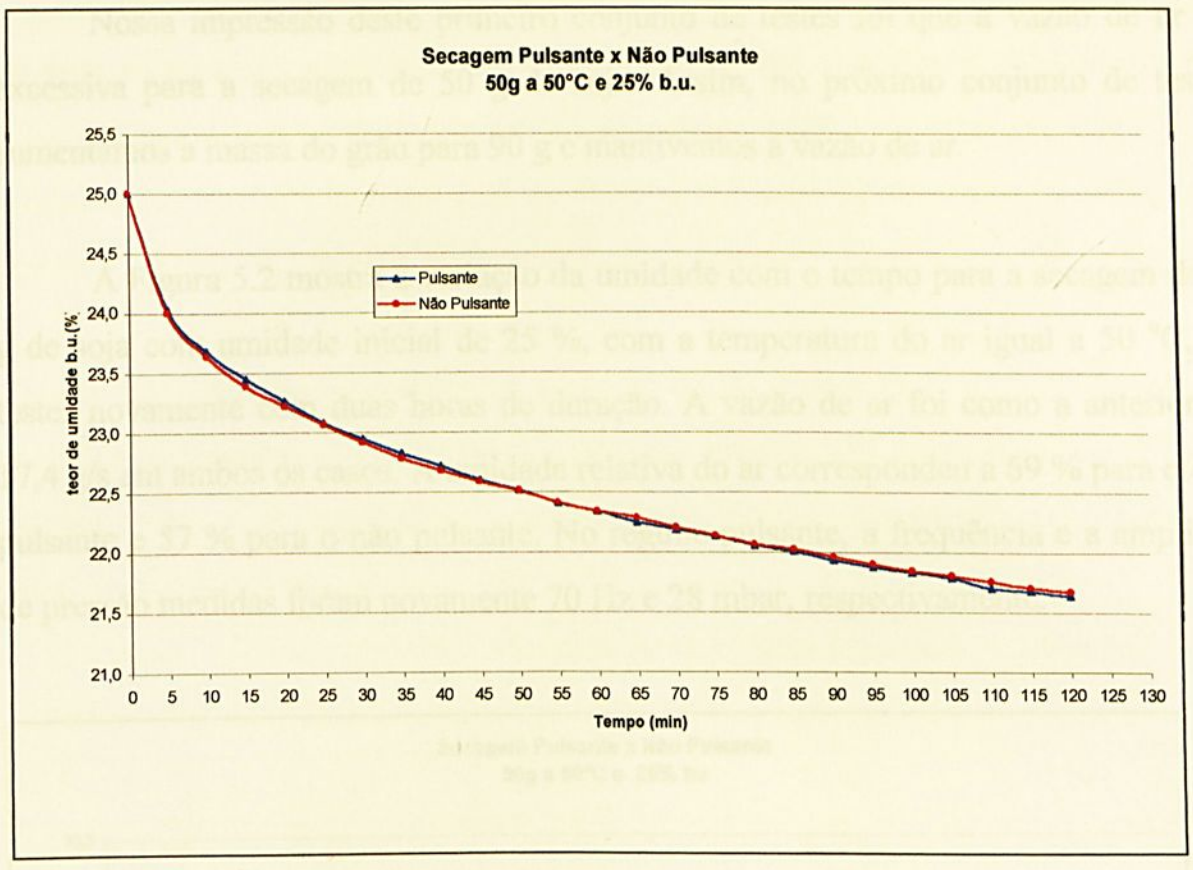


Figura 5.1 – Variação da umidade com o tempo para 50 g de soja com umidade inicial de 25 % e temperatura do ar de 50 °C. Pesagens efetuadas a cada 5 minutos. No regime pulsante, a frequência e a amplitude de pressão medidas foram 70 Hz e 28 mbar, respectivamente.

Tabela 5.1 – Resultados relativos à secagem de 50 g de soja com 25 % de umidade inicial e temperatura do ar de 50 °C, regimes pulsante e não pulsante.

Queda da umidade (%)	Tempo gasto (min)*	Massa de água evaporada (g)*	Massa total de ar (g)	Relação ar/água
25 a 24	5	2	5220	2610
24 a 23	20	1,9	20880	10989
23 a 22	60	2,1	62640	29829

*Dados retirados de tabelas de resultados não reproduzidas aqui.

Nossa impressão deste primeiro conjunto de testes foi que a vazão de ar era excessiva para a secagem de 50 g de soja. Assim, no próximo conjunto de testes, aumentamos a massa do grão para 90 g e mantivemos a vazão de ar.

A Figura 5.2 mostra a variação da umidade com o tempo para a secagem de 90 g de soja com umidade inicial de 25 %, com a temperatura do ar igual a 50 °C, em testes novamente com duas horas de duração. A vazão de ar foi como a anterior, de 17,4 g/s em ambos os casos. A umidade relativa do ar correspondeu a 69 % para o caso pulsante e 57 % para o não pulsante. No regime pulsante, a frequência e a amplitude de pressão medidas foram novamente 70 Hz e 28 mbar, respectivamente.

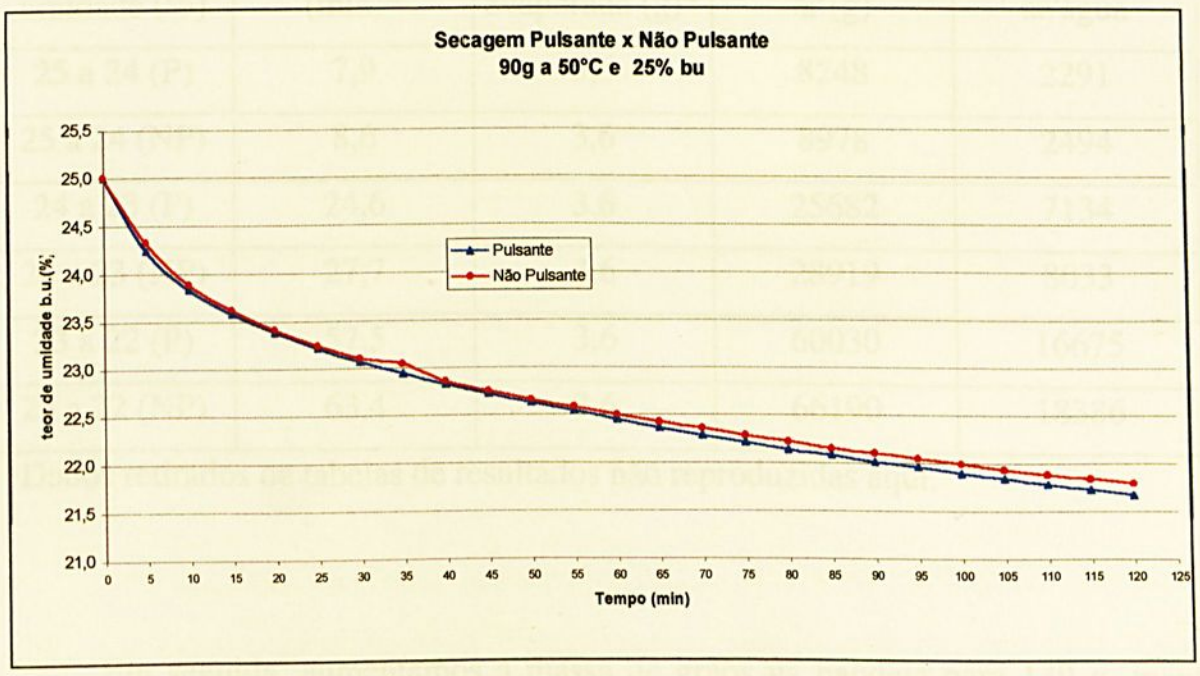


Figura 5.2 – Variação da umidade com o tempo para 90 g de soja com umidade inicial de 25 % e temperatura do ar de 50 °C. Pesagens efetuadas a cada 5 minutos. No regime pulsante, a frequência e a amplitude de pressão medidas foram 70 Hz e 28 mbar, respectivamente.

Aqui, uma certa vantagem do processo de secagem pulsante pode ser observada com relação à secagem não pulsante. Novamente dividindo as curvas de umidade em três partes como fizemos no item anterior, temos os resultados da Tabela 5.2. Observamos que a relação entre as massas de ar e água diminuíram com relação aos

valores da Tabela 5.1, ou seja, a secagem é mais eficiente para uma maior massa inicial de soja na mesma umidade. Observamos também que o processo pulsante foi mais eficiente que o não pulsante em termos da relação entre as massas de ar e de água retirada do grão. Nos intervalos 25-24 %, 24-23 % e 23-22 %, o regime pulsante foi 8,9 %, 12,6 % e 10,3 % mais eficiente, respectivamente.

Tabela 5.2 – Resultados relativos à secagem de 90 g de soja com 25 % de umidade inicial e temperatura do ar de 50 °C, regimes pulsante (P) e não pulsante (NP). No regime pulsante, a frequência e a amplitude de pressão medidas foram 70 Hz e 28 mbar, respectivamente.

Queda da umidade (%)	Tempo gasto (min)*	Massa de água evaporada (g)*	Massa total de ar (g)	Relação ar/água
25 a 24 (P)	7,9	3,6	8248	2291
25 a 24 (NP)	8,6	3,6	8978	2494
24 a 23 (P)	24,6	3,6	25682	7134
24 a 23 (NP)	27,7	3,6	28919	8033
23 a 22 (P)	57,5	3,6	60030	16675
23 a 22 (NP)	63,4	3,6	66190	18386

*Dados retirados de tabelas de resultados não reproduzidas aqui.

Em seguida, aumentamos a massa de grãos na bandeja para 139 g, mantendo todos os outros parâmetros anteriores.

A Figura 5.3 mostra a variação da umidade com o tempo para a secagem de uma massa inicial 139 g de soja com umidade de 25 %, com a temperatura do ar de 50 °C, em testes de 45 minutos de duração, com pesagens efetuadas a cada 5 minutos. A vazão de ar foi como a anterior, de 17,4 g/s em ambos os casos. A umidade relativa do ar correspondeu a 60 % para o caso pulsante e 56 % para o não pulsante. No regime

pulsante, a frequência e a amplitude de pressão medidas foram de novo 70 Hz e 28 mbar, respectivamente.

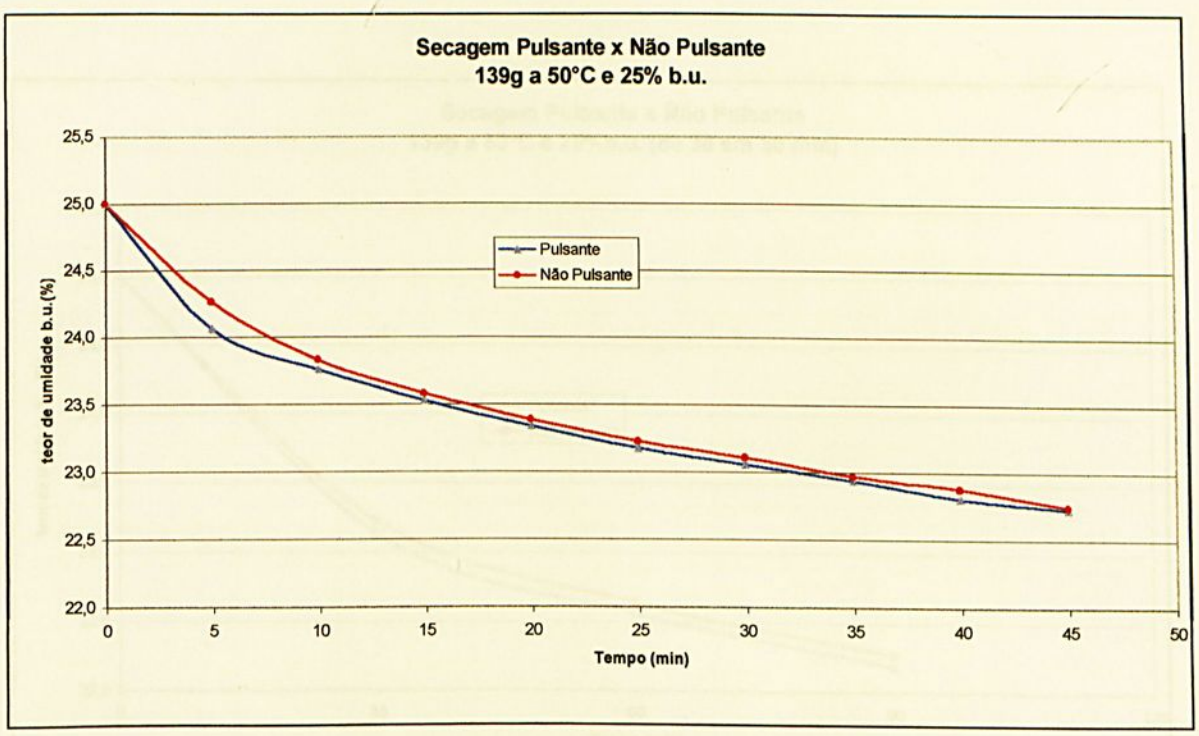


Figura 5.3 – Variação da umidade com o tempo para 139 g de soja com umidade inicial de 25 % e temperatura do ar de 50 °C. Pesagens efetuadas a cada 5 minutos. No regime pulsante, a frequência e a amplitude de pressão medidas foram 70 Hz e 28 mbar, respectivamente.

Um conjunto adicional de testes com duração de 90 minutos foi realizado para 139 g de massa inicial de soja. Neste caso, as pesagens foram efetuadas a cada 30 minutos. A umidade relativa do ar foi 63 % para o caso pulsante e 73 % para o caso não pulsante. Os outros parâmetros foram idênticos ao conjunto anterior. A variação da umidade com o tempo para esta situação é apresentada na Figura 5.4.

Aqui também dividimos as curvas de umidade em partes como fizemos em itens anteriores, obtendo os resultados da Tabela 5.3.

Para o caso de pesagem a cada 30 minutos, colocamos na Tabela 5.3 apenas o intervalo de queda de 25 para 23 %. Incluímos este intervalo também para o caso de pesagens de 5 em 5 minutos.

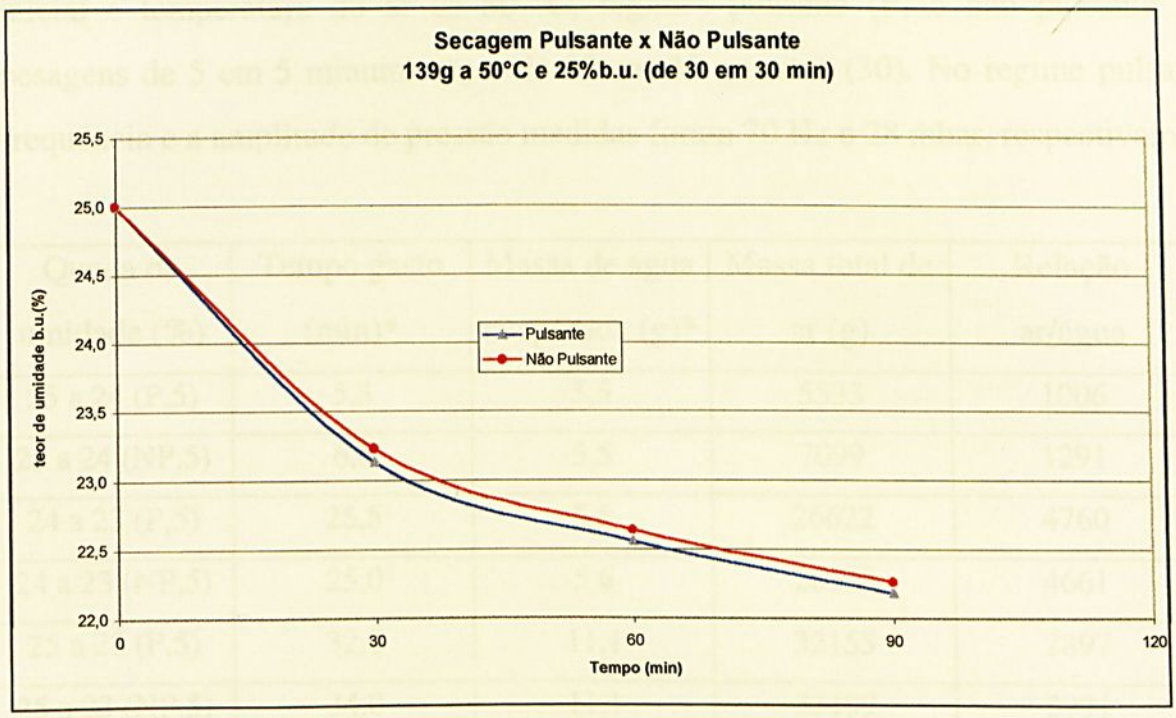


Figura 5.4 – Variação da umidade com o tempo para 139 g de soja com umidade inicial de 25 % e temperatura do ar de 50 °C. Pesagens efetuadas a cada 30 minutos. No regime pulsante, a frequência e a amplitude de pressão medidas foram 70 Hz e 28 mbar, respectivamente.

Aqui também observamos uma certa vantagem do processo pulsante sobre o não pulsante, embora menor que no item anterior. Para o caso de pesagens de 5 em 5 minutos, o tempo para se atingir 23 % de umidade foi 6 % maior no caso não pulsante. Para o caso seguinte, o tempo para se atingir 23 % de umidade foi 10 % maior no caso não pulsante.

A Tabela 5.4 resume os intervalos de tempo requeridos par a umidade reduzir-se de 25 para 23 % para as massas iniciais de 50, 90 e 139 g. Observamos que os tempos de secagem para o intervalo em questão não variaram consideravelmente para as massas iniciais de 90 e 139 g, sendo os mesmos maiores com relação àquele

correspondente à massa inicial de 50 g. A relação ar/água, no entanto, que fornece o custo específico da secagem, é favorável à maior massa inicial testada (139 g).

Tabela 5.3 – Resultados relativos à secagem de 139 g de soja com 25 % de umidade inicial e temperatura do ar de 50 °C, regimes pulsante (P) e não pulsante (NP), pesagens de 5 em 5 minutos (5) e de 30 em 30 minutos (30). No regime pulsante, a frequência e a amplitude de pressão medidas foram 70 Hz e 28 mbar, respectivamente.

Queda da umidade (%)	Tempo gasto (min)*	Massa de água evaporada (g)*	Massa total de ar (g)	Relação ar/água
25 a 24 (P,5)	5,3	5,5	5533	1006
25 a 24 (NP,5)	6,8	5,5	7099	1291
24 a 23 (P,5)	25,5	5,6	26622	4760
24 a 23 (NP,5)	25,0	5,6	26100	4661
25 a 23 (P,5)	32,0	11,1	32155	2897
25 a 23 (NP,5)	34,0	11,1	33199	2991
25 a 23 (P,30)	33,6	11,4	33512	2940
25 a 23 (NP,30)	37,3	11,1	35392	3188

*Dados retirados de tabelas de resultados não reproduzidas aqui. Interpolação realizada, quando necessário.

Para finalizar o conjunto de testes com temperatura de secagem de 50 °C, investigamos uma massa inicial muito maior que as anteriores, 240 g, com uma umidade inicial de 26 %, durante 60 minutos, com pesagens realizadas a cada 5 minutos. A vazão de ar foi minimamente superior às anteriores, 17,5 g/s em ambos os casos pulsante e não pulsante. A umidade relativa do ar correspondeu a 80 % para ambos os casos, pulsante e não pulsante. No regime pulsante, a frequência e a amplitude de pressão medidas foram de novo 70 Hz e 28 mbar, respectivamente. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 5.5.

unesp

Tabela 5.4 – Tempos de secagem para o intervalo 25 a 23 % de umidade para as massas iniciais de 50, 90 e 139 g, com temperatura de secagem de 50 °C. Regimes pulsante (P) e não pulsante (NP), pesagens de 5 em 5 minutos (5) e de 30 em 30 minutos (30).

Massa inicial (g)	Tempo requerido para secar de 25 para 23 % de umidade	Relação ar/água
50 (P,5)	25,0	6692
50 (NP,5)	25,0	6692
90 (P,5)	32,5	4712
90 (NP,5)	36,3	5263
139 (P,5)	32,0	2897
139 (NP,5)	34,0	2991
139 (P,30)	33,6	2940
139 (NP,30)	37,3	3188

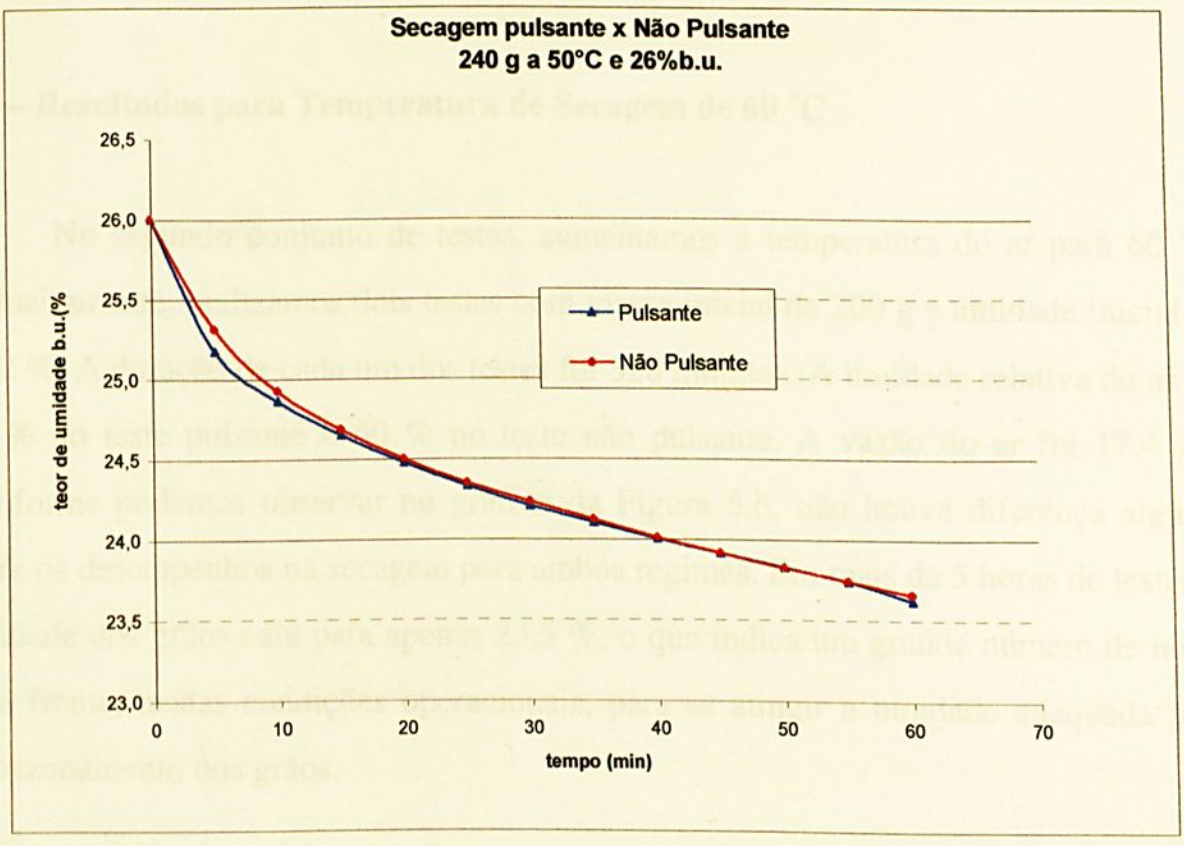


Figura 5.5 – Variação da umidade com o tempo para 240 g de soja com umidade inicial de 26 % e temperatura do ar de 50 °C. No regime pulsante, a frequência e a amplitude de pressão medidas foram 70 Hz e 28 mbar, respectivamente.

Com as curvas da Figura 5.5 podemos observar:

- não há vantagem aparente do regime pulsante sobre o não pulsante para esta massa inicial de soja;
- tempo gasto para diminuir a umidade inicial no seu primeiro 1 % é da mesma ordem de grandeza daqueles obtidos anteriormente;
- tempo gasto para diminuir a umidade de 25 para 24 % neste caso é muito superior ao tempo relativo ao mesmo intervalo de umidade nos casos anteriores.

A terceira observação acima nos indica que há uma certa quantidade de água que adere superficialmente ao grão, em uma película que seca em condições similares, mesmo com umidades iniciais diferentes.

Foram testadas amostras de soja com massas superiores a 240 g, mas não se conseguiu amplitude de oscilação no nível daquela obtida anteriormente (28 mbar).

5.2 – Resultados para Temperatura de Secagem de 60 °C

No segundo conjunto de testes, aumentamos a temperatura do ar para 60 °C. Primeiramente, realizamos dois testes com massa inicial de 200 g e umidade inicial de 30,2 %. A duração de cada um dos testes foi 320 minutos. A umidade relativa do ar foi 52 % no teste pulsante e 60 % no teste não pulsante. A vazão do ar foi 17,4 g/s. Conforme podemos observar no gráfico da Figura 5.6, não houve diferença alguma entre os desempenhos na secagem para ambos regimes. Em mais de 5 horas de testes, a umidade dos grãos caiu para apenas 23,5 %, o que indica um grande número de horas pela frente, nestas condições operacionais, para se atingir a umidade adequada para armazenamento dos grãos.

O mesmo comportamento foi observado no conjunto de testes seguintes, onde se repetiram os parâmetros do conjunto anterior, mas iniciou-se com umidade dos grãos

grãos de 26 % e vazão de ar de 17,4 g/s. A duração de cada um testes deste conjunto foi de 140 minutos. Os resultados são mostrados na Figura 5.7. Neste caso, as umidades relativas do ar de secagem foram 78 e 55 %, para os regimes pulsante e não pulsante, respectivamente. No presente caso, a umidade dos grãos também caiu muito pouco durante os testes, para 22,5 %.

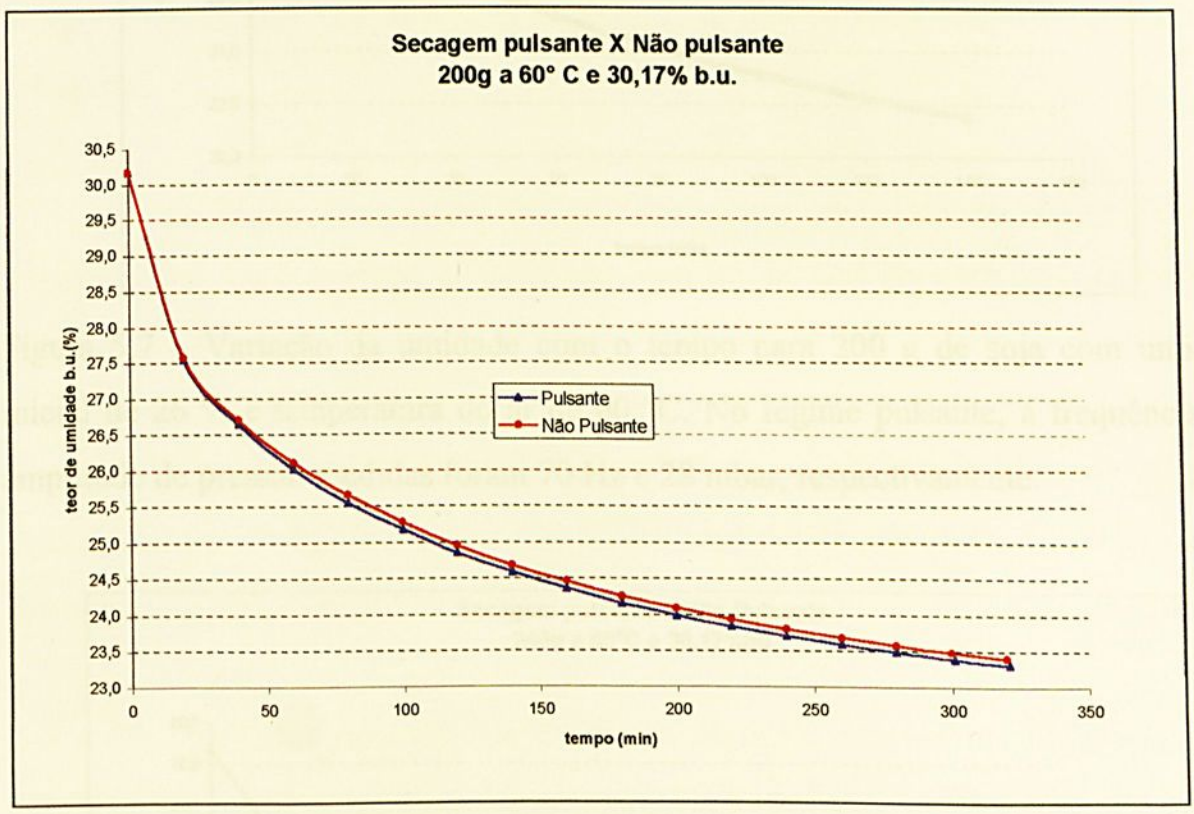


Figura 5.6 – Variação da umidade com o tempo para 200 g de soja com umidade inicial de 30,2 % e temperatura do ar de 60 °C. No regime pulsante, a frequência e a amplitude de pressão medidas foram 70 Hz e 28 mbar, respectivamente.

Novamente, o mesmo comportamento foi observado no conjunto de testes seguinte, onde se alterou a vazão de ar para 13,3 g/s e iniciou-se com massa de 240 g. A duração de cada um dos testes foi de 100 minutos. Os resultados são mostrados no gráfico da Figura 5.8. Neste caso, as umidades relativas do ar de secagem foram 36 e 37 % nos testes pulsante e não pulsante, respectivamente. Mais uma vez, a umidade dos grãos caiu muito pouco, para 25,2 %.

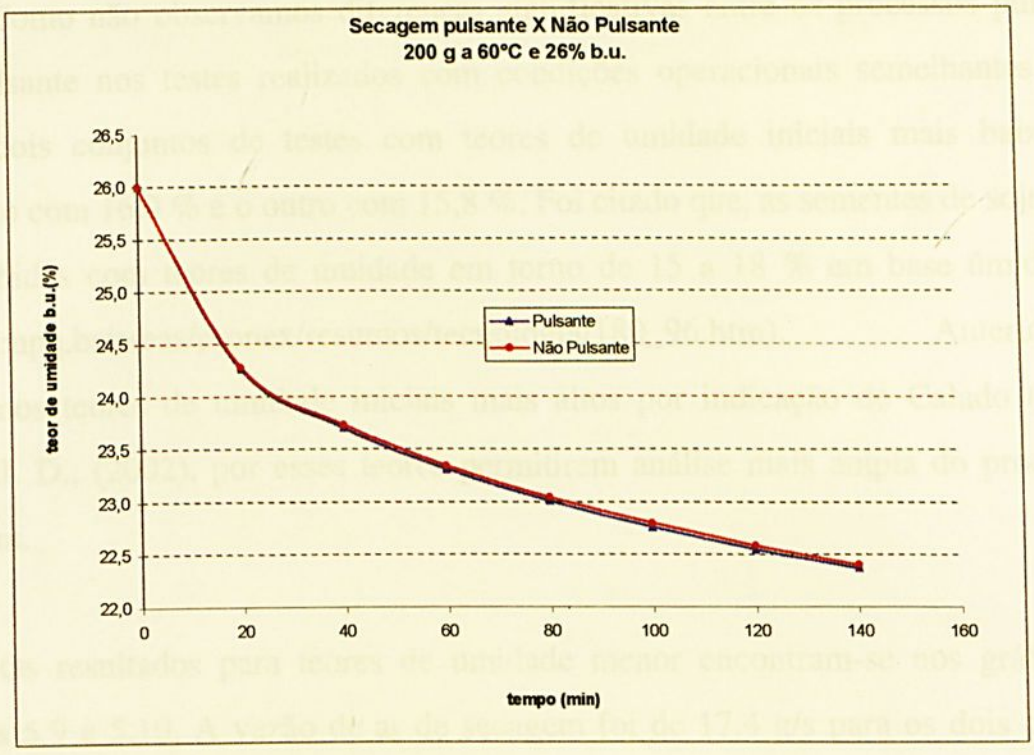


Figura 5.7 – Variação da umidade com o tempo para 200 g de soja com umidade inicial de 26 % e temperatura do ar de 60 °C. No regime pulsante, a frequência e a amplitude de pressão medidas foram 70 Hz e 28 mbar, respectivamente.

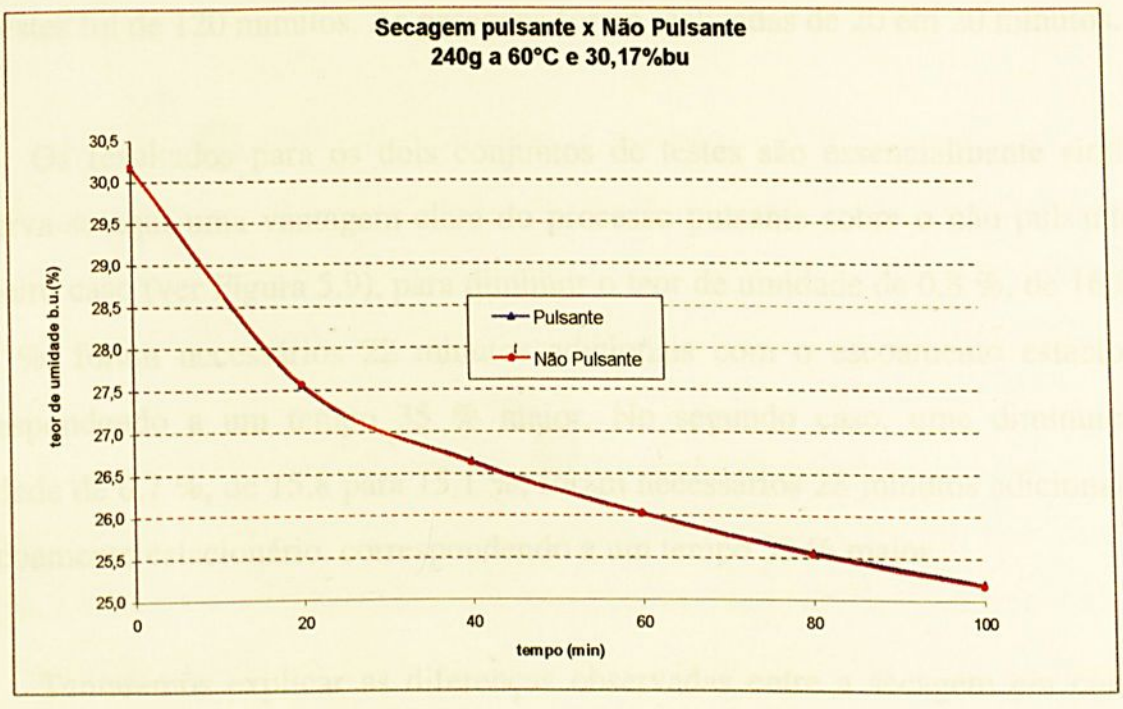


Figura 5.8 – Variação da umidade com o tempo para 240 g de soja com umidade inicial de 30,2 % e temperatura do ar de 60 °C. Excepcionalmente a vazão de ar foi 13,3 g/s. No regime pulsante, a frequência e a amplitude de pressão medidas foram 70 Hz e 28 mbar, respectivamente.

Como não observamos diferenças significativas entre os processos pulsante e não pulsante nos testes realizados com condições operacionais semelhantes, foram feitos dois conjuntos de testes com teores de umidade iniciais mais baixas, um conjunto com 16,0 % e o outro com 15,8 %. Foi citado que, as sementes de soja devem ser colhidas com teores de umidade em torno de 15 a 18 % em base úmida (b.u.) (www.cnpq.br/areas/pronex/resumos/tecnologia/180_96.htm). Anteriormente, utilizamos teores de umidade iniciais mais altos por indicação de Calado (1993) e Biagi, J. D., (2002), por esses teores permitirem análise mais ampla do processo de secagem.

Os resultados para teores de umidade menor encontram-se nos gráficos das Figuras 5.9 e 5.10. A vazão de ar de secagem foi de 17,4 g/s para os dois casos. As umidades relativas para os testes da Figura 5.9 foram 35 e 40 % para os casos pulsante e não pulsante, respectivamente. Para os testes da Figura 5.10, as umidades relativas foram 31 e 34 % para os casos pulsante e não pulsante, respectivamente. Nos dois casos pulsantes a amplitude de pressão foi 28 mbar e a frequência foi 70 Hz. A duração dos testes foi de 120 minutos. As pesagens foram realizadas de 20 em 20 minutos.

Os resultados para os dois conjuntos de testes são essencialmente similares. Observa-se aqui uma vantagem clara do processo pulsante sobre o não pulsante. No primeiro caso (ver Figura 5.9), para diminuir o teor de umidade de 0,8 %, de 16,0 para 15,2 %, foram necessários 22 minutos adicionais com o escoamento estacionário, correspondendo a um tempo 35 % maior. No segundo caso, uma diminuição de umidade de 0,7 %, de 15,8 para 15,1 %, foram necessários 28 minutos adicionais com o escoamento estacionário, correspondendo a um tempo 39 % maior.

Tentaremos explicar as diferenças observadas entre a secagem em condições pulsantes e não pulsantes segundo o mecanismo de fluxo interno de líquido no grão.

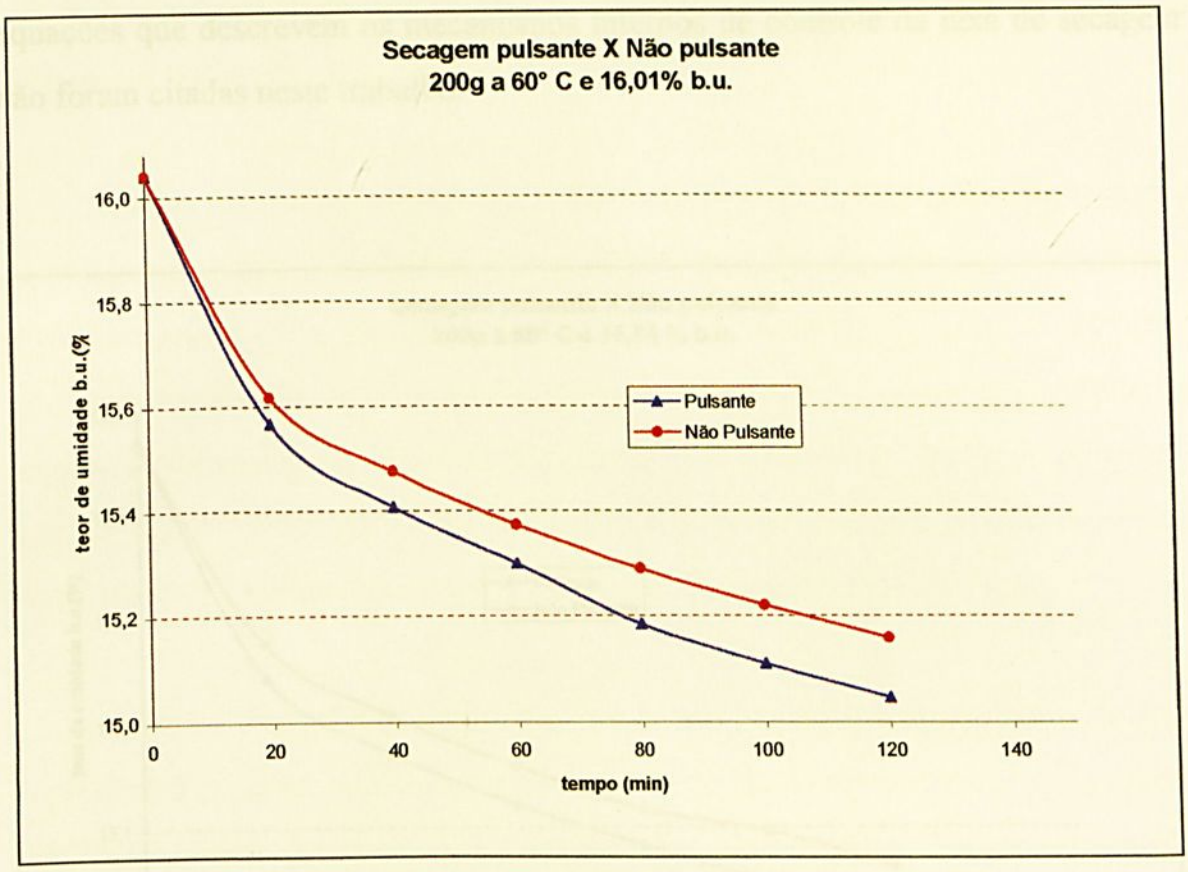


Figura 5.9 – Variação da umidade com o tempo para 200 g de soja com umidade inicial de 16 % e temperatura do ar de 60 °C. No regime pulsante, a frequência e a amplitude de pressão medidas foram 70 Hz e 28 mbar, respectivamente.

Conforme foi citado anteriormente, a secagem é o processo de remoção do líquido de um sólido por evaporação. A massa de água do interior do sólido na secagem desloca-se para a superfície na forma de líquido ou de vapor e nas superfícies como vapor, esta última através de uma película de ar estagnada para o ambiente.

Fraenkel (1995) menciona que o deslocamento desta massa de água se faz por escoamento capilar, difusão de vapor e difusão de líquido. À medida que a secagem avança. Chega-se a um ponto em que a superfície evaporante está insaturada. O plano de evaporação desloca-se para o interior do sólido. Fraenkel (1995) diz que na secagem de baixos teores de umidade o período que predomina é o segundo período a taxa decrescente onde a taxa de secagem é agora governada pela velocidade do movimento da umidade interna e a influência das variáveis externas diminui. Existem

equações que descrevem os mecanismos internos de controle da taxa de secagem que não foram citadas neste trabalho.

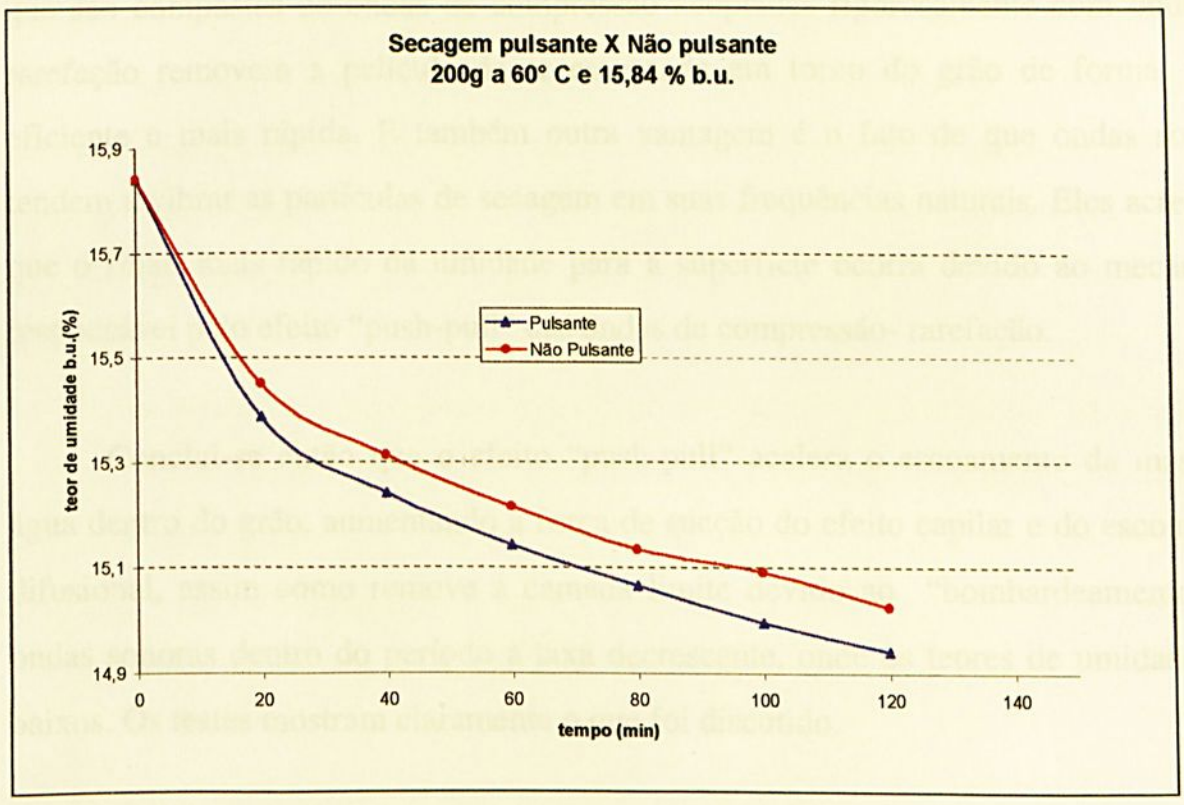


Figura 5.10 – Variação da umidade com o tempo para 200 g de soja com umidade inicial de 15,8 % e temperatura do ar de 60 °C. No regime pulsante, a frequência e a amplitude de pressão medidas foram 70 Hz e 28 mbar, respectivamente.

É interessante realçar a teoria da capilaridade na qual admite-se que um leito de esferas não porosas é constituído pelas partículas em torno de um espaço vazio denominado poro. Estes poros estão ligados por passagens de diversas dimensões, sendo as mais estreitas os estrangulamentos. Quando a água é removida do leito, a curvatura da sua superfície nos interstícios da esferas da camada superior aumenta, e a pressão capilar, resultante desta curvatura, aparece. À medida que a remoção de água continua, esta força de sucção arrasta a água do interior do leito para a superfície. Há um aumento desta força a medida que a umidade diminui e os poros mais finos vão sendo abertos e por difusão de vapor a água é removida.

Desta forma pode-se explicar a eficiência do escoamento pulsante neste período, com teores baixos de umidade.

Vimos que Lockwood (1980) e Tamburello et al. (1982) postulam que as ondas que são compostas de ondas de compressão acopladas rigorosamente com ondas de rarefação removem a película de ar estagnada em torno do grão de forma mais eficiente e mais rápida. E também outra vantagem é o fato de que ondas sonoras tendem a vibrar as partículas de secagem em suas frequências naturais. Eles acreditam que o fluxo mais rápido da umidade para a superfície ocorra devido ao mecanismo responsável pelo efeito "push-pull" das ondas de compressão- rarefação.

Conclui-se então que o efeito "push-pull" acelera o escoamento da massa de água dentro do grão, aumentando a força de sucção do efeito capilar e do escoamento difusional, assim como remove a camada limite devido ao "bombardeamento" por ondas sonoras dentro do período a taxa decrescente, onde os teores de umidades são baixos. Os testes mostram claramente o que foi discutido.

CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível evidenciar o potencial da utilização de ondas acústicas na secagem de grãos de soja.

Testes com combustão pulsante em um tubo de Rijke já instalado nas dependências do LCP/INPE foram realizados no início da investigação. No entanto, o tipo de fonte térmica teve que ser substituído devido à ocorrência de fuligem nos gases de exaustão, mesmo com valores altos de excessos de ar.

No tocante à temperatura de saída no combustor, foi verificado ser possível a diminuição da mesma para valores de até 33 ^{o}C. Foi instalada uma entrada de ar, denominado ar secundário, para que a queda de temperatura fosse possível. Oscilações acústicas com esta instalação de ar secundário não foram observadas, as oscilações foram obtidas apenas quando se utilizava um sistema para controle ativo.

Nos demais testes foi utilizada uma malha elétrica, para o aquecimento, o que permitiu a realização de testes pulsantes.

Foi escolhido um fluxo mássico de ar de 0,527 kg/m².s, o que para uma bandeja com 0,033 m² implica em uma vazão mássica de 17,4 g/s. Esta vazão foi utilizada em todos os testes, com exceção de um conjunto de dois testes, um pulsante e outro não pulsante, onde se alterou a vazão de ar para 13,3 g/s, não houve resultados satisfatórios. Para uma massa de grãos inicial acima de 240 g havia diminuição da amplitude de oscilação acústica, a qual nos testes com menor quantidade de grãos era 28 mbar. Optou-se por trabalhar com o maior valor de amplitude de pressão porque a velocidade acústica na extremidade superior do equipamento, onde estava localizada a bandeja de grãos, era máxima.

Por outro lado, com 50 g de soja, a vazão de ar estabelecida era grande demais para evidenciar ganhos no escoamento pulsante.

Os testes foram realizados com massas iniciais de grãos de 90, 139 e 200 g. Os teores de umidade inicial foram 16, 25, 26 e 30 %. Notou-se clara evidência do potencial das pulsações em incrementar o processo de secagem quando foram testadas amostras de 200 g com umidade inicial de aproximadamente 16 %. Esta umidade inicial está dentro da faixa na qual a soja é colhida industrialmente.

Sugere-se retornar ao processo de combustão utilizando controle ativo e chama pré misturada, na tentativa de solucionar o problema da fuligem. Como o excesso de ar é muito grande, a temperatura na base da bandeja pode ser controlada alterarando a vazão de combustível, o que alterará minimamente a vazão total. Diferentes vazões de combustível serão necessárias para testes em diferentes regimes, pulsante e não pulsante.

Sugere-se otimizar o processo de secagem com potencial acústico e utilizar outros produtos agrícolas.

Sugere-se também trabalhar com testes de maior duração, sempre a partir de teores iniciais de umidade até 18 %, que é a faixa onde o regime pulsante sobressai.

REFERÊNCIAS

Belles, F.E., R&D and Other Needs for Exploitation of Pulse Combustion in Space Heating Applications, *Proc. of the Symposium on Pulse Combustion Technology for Heating Applications*, 167-180, 1979.

Biagi, J.D., *Comunicação Pessoal*, UNICAMP, 2002.

Botura, C.A., Estudo e Projeto de um Controlador Usando Lógica Difusa Aplicada ao Controle Ativo de um Combustor do Tipo Tubo de Rijke, *Dissertação de Mestrado*, Universidade Estadual Paulista, 1998.

Brooker, D.B.; Bakker-Arkema, F.W.; Hall, C.W., *Drying Cereal Grains*, The AVI Publishing Company, Westport, Connecticut, p. 265, 1974.

Callado, V.M.A., Modelagem e Simulação de Secadores em Leito Fixo e Deslizante, *Tese de Doutorado*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1993.

Carvalho, J.A., Investigation of the Characteristics of a Coal Burning Rijke Type Pulsating Combustor, *Tese de Doutorado*, Georgia Institute of Technology, 1983.

Carvalho, J.A.; Wang, M.R.; Miller, N.; Daniel, B.R.; Zinn, B.T., Controlling Mechanisms and Performance of Coal Burning Rijke Type Pulsating Combustors, *Proc. of the Twentieth Symposium International on Combustion*, 2011-2017, 1984.

Carvalho, J.A.; Ferreira, M.A.; Bressan, C.; Ferreira, J.L.G., Definition of Heater Location to Drive Maximum Amplitude Acoustic Oscillations in a Rijke Tube, *Combustion and Flame*, 76(1), 17-27, 1989.

Carvalho, J.A., Behavior of Solid Particles in Pulsating Flows, *J. Sound and Vibration*, 185(4), 581-593, 1995.

Carvalho, J.A.; McQuay, M.Q.; Gotaç, P.R., The Interaction of Liquid Reacting Droplets with the Pulsating Flow in a Rijke-Tube Combustor, *Combustion and Flame*, 108(1-2), 87-103, 1997.

Carvalho, N.M., *A Secagem de Sementes*, FUNEP-UNESP/FCAVJ/Jaboticabal, SP, 1994.

Couto, H.S., Queima de Combustíveis Líquidos em Combustores Pulsantes, *Tese de Doutorado*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1989.

Delmée, G.J., *Manual de Medição de Vazão*, Editora Edgard Blucher, 1987.

Dubey, R.K.; Black, D.L.; McQuay, M.Q.; Carvalho, J.A., The Effect of an Acoustic Field on the Burning of a Hydrogen-stabilized Ethanol Spray Flame in a Propane-fired Rijke-tube Combustor, *Combustion and Flame*, 110, 25-38, 1997.

Dubey, R.K., A Parametric Study on the Effect of an Acoustic Field on a Spray Fired Rijke-Tube Pulse Combustor, *Tese de Doutorado*, Brigham Young University, 1998.

Ferreira, M.A.; Carvalho, J.A., Performance Characteristics of an Experimental Rijke Type Pulsating Combustor, *Fuel*, 69(6), 684-689, 1990.

Ferreira, M.A.; Bressan, C.; Victório, J.R.S.; Carvalho, J.A.; Heiskanen, V.P., Burning of Finnish Peat Pellets in a Brazilian Experimental Pulsating Combustor, *Anais do III Encontro Nacional de Ciências Térmicas*, Itapema, 761-766, 1990.

Ferreira, M.A., Abordagem Teórica e Experimental de Combustores do Tipo Rijke, *Tese de Doutorado*, Universidade Estadual Paulista, 1997.

Foster, C.H., Heated Air Grain Drying, in Sinha, R.H.; Muir, W.E., ed., *Grain Storage, Part of a System*, The AVI Publishing Co., Westport, Connecticut, 33-38, 1973.

Fraenkel, S.L., Estudo Teórico da Secagem em Leito Fixo com Escoamento Pulsante, *Dissertação de Mestrado*, Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1995.

Hall, C.W., *Drying and Storage of Agricultural Crops*, The Avi Publishing Company, Inc., Westport, Connecticut, p. 381, 1980.

Hanby, V.I., The Effect of Gaseous Oscillations on the Combustion Rate of Solid Fuel Particles, *Journal of Fuel Society*, 18, 44-49, 1967.

Hanby, V.I., Convective Heat Transfer in a Gas-fired Pulsating Combustor, *Paper ASME no. 68-WA/FU-1*, 1968.

Heckl, M.A., Active Control of the Noise from a Rijke Tube, *Journal of Sound and Vibration*, 124, 117-133, 1988.

Hunt, W.H.; Pixton, S.W., Moisture, Its Significance, Behavior, and Measurement, in Christensen, C.M., ed., *Storage of Cereal Grains and Their Products*, American Association of Cereal Chemistry Incorporated, Saint Paul, Minnesotta, 1-53, 1974.

Krzyzanowzki, F., *Comunicação Pessoal*, EMBRAPA, 2002

Lacava, P.T.; Carvalho, J.A.; McQuay, M.Q., Pulsating Combustion Characteristics of a Spray Flame in a Rijke Tube with Two Different Atomizers, *Fuel*, 76(9), 845-851, 1997.

Lockwood, R.M., Drying Food and Wastes with Pulsating Combustion, *Proceedings of the Symposium on Pulse Combustion Technology for Heating Applications*, 224, 1980.

Lord Rayleigh, *The Theory of Sound*, New York, NY, Dover, v.2, cap. 16, 224-235, 1945.

Martins, C.A., Emissões de NO_x em Combustor Pulsante Tipo Tubo de Rijke Operando com Combutível Gasoso, *Dissertação de Mestrado*, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998.

McManus, K.R.; Poinsot, T.; Candel, S., A Review of Active Control of Combustion Instabilities, *Progress in Energy and Combustion Science*, 19, 1-29, 1993.

Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, *Regras para Análise de Sementes*, 1992.

Momma, L.J., Estudo da Frequência e Amplitude de Pressão Acústica em Combustores Pulsantes Tipo Tubo de Rijke, *Dissertação de Mestrado*, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1993.

Pierce, A.D., *Acoustics, an Introduction to Its Physical Principles and Applications*, McGraw-Hill Book Company, 1981.

Poinsot, T.; Bourienne, F.; Candel, S.; Esposito, E.; Lang, W., Suppression of Combustion Instabilities by Active Control, *Journal of Propulsion and Power*, 5(1), 14-20, 1989.

Porter, H.F., Sistemas Gás-sólido. In: Perry, H.R., *Manual de Engenharia Química*, 5ª. edição, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, Capítulo 20, 1980.

Putnam, A.A., A Review of Pulse Combustor Technology, *Proc. of the Symposium on Pulse Combustion Technology for Heating Applications*, 1-21, 1979.

Puzzi, D., *Abastecimento e Armazenagem de Grãos*, Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1986.

Reader, G.T., The Pulse Jet, 1906-1966, *Journal of Naval Sciences*, 3(4), 226-232, 1977.

Reynst, F.H., *Pulsating Combustion, the Collected Works of F.H. Reynst*, Thring, M.W., ed., London, Pergamon Press, 1961.

Silva, L.C.; Silva, J.S.; Queiroz, D.M.; Oliveira Filho, D., Desenvolvimento e Avaliação de um Secador de Café Intermitente de Fluxos Contracorrentes, *Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola*, 1991.

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18 19

Sommers, H., Experiences with Pulsating Tube Firing in an Experimental Installation. In: Thring, M.W., ed., *Pulsating Combustion, the Collected Works of F.H. Reynst*, London, Pergamon Press, 262-274, 1961.

Tamburello, N.M.; Hill, G.A.; Goldman, Y.; Seginer, A.; Salomon, M.; Timnat, Y., The Development of a Vegetable and Fruit Dehydration Unit with a Pulse-combustion Chamber, *Proc. of the Symposium on Pulse Combustion Technology for Heating Applications*, 13.1-13.7, 1982.

Torres, E.A.; Victório, J.R.S.; Ferreira, M.A.; Carvalho, J.A., Pulsating Combustion of Palm Oil Fruit Bark, *Fuel*, 71(3), 257-261, 1992.

Tyndall, J., On Sounding and Sensitive Flames, *Physical Sciences, The Royal Institution. Library of Science*, 2, 30-37, 1970.

Wang, M.R., Mechanisms and Performance of a Coal Burning Rijke Type Pulsating Combustor, *Tese de Doutorado*, Georgia Institute of Technology, 1985.

Zadeh, L.A., Fuzzy Sets, *Information and Control*, 8, 338-353, 1965.

Zaitsev, E.D.; Redeskop, V.I; Shvetsov, V.V., Hydrodynamics and External Heat Exchange of a Vibrated Fluidized Layer of Pharmaceutical Preparations, *Pharmaceutical Chemistry Journal*, 10, 354-358, 1976.

Zinn, B.T.; Carvalho, J.A.; Miller, N.; Daniel, B.R., Development of a Pulsating Combustor for Burning of Wood, *Proc. of the Symposium on Pulse Combustion Technology for Heating Applications*, 11.1-11.11, 1982.

Zinn, B.T., Pulsating Combustion, In *Advanced Combustion Methods*, Weinberg, F.W., ed., 113-181, 1986.

cm 1 2 3 4 5 6 7 8 unesp 12 13 14 15 16 17 18 19