



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GIOVANA CEOLIN SOARES

LETÍCIA AGUZZI PERES

**SECAGEM DE ARROZ (*Oryza sativa L.*) EM ESCALA PILOTO:
avaliação de parâmetros do processo**

BAGÉ

2012

GIOVANA CEOLIN SOARES

LETÍCIA AGUZZI PERES

SECAGEM DE ARROZ (*Oryza sativa* L.) EM ESCALA PILOTO:

avaliação de parâmetros do processo

Projeto de pesquisa apresentado ao Curso de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Pampa como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientadora: Prof^ª.Dr^ª. Elizangela Gonçalves de Oliveira

BAGÉ

2012

GIOVANA CEOLIN SOARES

LETÍCIA AGUZZI PERES

SECAGEM DE ARROZ (*Oryza sativa L.*) EM ESCALA PILOTO:

avaliação de parâmetros do processo

Projeto de pesquisa apresentado ao Curso de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Pampa como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia de Alimentos.

Bagé, 13 de janeiro de 2012

Banca examinadora:

Prof^a.Dr^a. Elizangela Gonçalves de Oliveira

(Orientadora - UNIPAMPA)

Prof^a.Dr^a. Valéria Terra Crexi

(Examinadora - UNIPAMPA)

Prof^a.Msc. Gabriela Rosa

(Examinadora - UNIPAMPA)

AGRADECIMENTOS

A Deus

Gostaríamos de agradecer a Deus por todos os momentos maravilhosos que tenhamos tido em nossa vida. Por todos os momentos felizes e por que não os tristes? Muitas coisas aprendemos com eles, muitos valores conservamos e muitas vitórias conquistamos. Nesses 5 anos, aprendemos a amar e a sentir-nos amados, aprendemos a respeitar e sermos respeitados e principalmente aprendemos que não podemos ter medo de lutar para sermos felizes, devemos vencer nossos obstáculos, pois Deus sempre está ao nosso lado. Hoje estamos cheios de alegria, radiantes e eufóricos por concretizarmos um sonho.

Aos Pais

Do fundo do nosso coração, podemos dizer a vocês, pais e mães, que fazem parte dessa vitória, o nosso muito obrigado por acreditar em nosso potencial e sempre terem a certeza que, apesar das dificuldades, este momento se tornaria possível. Somos e seremos eternamente gratos e felizes por sempre podermos contar com vocês. Amamos vocês!

Aos Mestres

Agradecer é admitir que houve um momento em que se precisou de alguém; é reconhecer que o homem jamais poderá lograr para si o dom de ser auto-suficiente. Ninguém e nada cresce sozinho, sempre é preciso um olhar de apoio, uma palavra de incentivo, um gesto de compreensão, uma atitude amor. A todos vocês que quando deveriam ser simplesmente professores, foram mestres, que quando deveriam ser mestres, foram amigos e em sua amizade

nos compreenderam e nos incentivaram a seguir nosso caminho pela conquista. A vocês que compartilharam os nossos ideais, dedicamos a nossa vitória, com a mais profunda gratidão e respeito.

Aos Funcionários

A eles, que muitas vezes não foram percebidos, outras vezes até ignorados. Mas, com humildade, souberam ser coadjuvantes da nossa conquista. Agora, temos a oportunidade de agradecer-lhes por tudo, pois vocês fazem parte da nossa história e da nossa conquista.

Aos Colegas

Sabíamos que um dia cada um seguiria seu caminho e que, neste dia, a separação nos faria sorrir e chorar ao mesmo tempo... Que bom será lembrar as gargalhadas, conversas, caronas, colas, medo de provas, cervejas geladinhas, a "importância do silêncio durante as aulas", momentos de descontrações nos churrascos e festas realizadas. Tudo isso compartilhado nestes cinco anos, que ao final percebemos o quanto foram curtos. Aos nossos colegas que sabemos amigos, até breve. Aos nossos amigos que sabemos irmãos, não existe adeus...

A Ceolin & Cia Ltda

Pelo incentivo, apoio e infra-estrutura para o desenvolvimento e conclusão deste projeto.

Ao Namorado

Agradeço ao meu namorado Guilherme, por seu essencial companheirismo, pelo carinho, pelos seus indispensáveis apoio, pela sua eterna amizade, pelos nossos inesquecíveis momentos de alegria, descontração e paciência nos meus momentos de “neura”, estando sempre por perto nos bons e maus momentos que passei neste último ano. A esta pessoa deixo meu muito obrigado.

E a todos aqueles que de alguma forma nos ajudaram nesta conquista. Muito obrigado!

"Se em horas de encontro pode haver tantos desencontros, que a hora de separação seja, tão somente, a hora de um verdadeiro, profundo e coletivo encontro. De tudo ficarão três coisas: a certeza de estar sempre começando, a certeza de que é preciso continuar e a certeza de ser interrompido antes de terminar. Fazer da queda um passo de dança; do medo, uma escada; do sonho, uma ponte; da procura, um encontro".

(Fernando Sabino)

RESUMO

O arroz (*Oryza sativa* L.) é um cereal de grande consumo mundial e, sendo um produto sazonal, sua conservação e armazenagem são justificadas. O Brasil é o maior produtor de arroz da América do Sul, concentrando 64,4% da produção na região Sul do país. O arroz é um produto agrícola que tem seu valor de comercialização dependente da qualidade física dos grãos verificada após o beneficiamento. O percentual de grãos inteiros é o parâmetro de maior importância para a indústria de arroz. Nesta situação, a operação de secagem é indispensável, porém, em função das temperaturas utilizadas, pode afetar a qualidade das sementes produzidas. Na cadeia produtiva do arroz, os custos de produção estão cada vez maiores e o preço final do produto estável ou menor. Neste contexto, estudos nos diferentes pontos da cadeia tornam-se necessários, a fim de buscar alternativas para diminuição dos custos e, conseqüentemente, tornar os produtos mais competitivos sem diminuir sua qualidade. Este trabalho teve por objetivo avaliar a operação de secagem no beneficiamento de arroz em um engenho local, visando à melhoria do processo. A secagem de arroz foi realizada em secador descontínuo de bandejas nas temperaturas de 50, 60 e 70°C, ocorrendo no primeiro e segundo período de taxa decrescente com umidade de transição de 0,135, 0,140 e 0,123 kg_{água}/kg_{sólido seco} das respectivas temperaturas. As umidades de equilíbrio obtidas pelo método dinâmico foram de 0,12 0,11 e 0,09 kg_{água}/kg_{sólido seco} (base seca, b.s.) , nas temperaturas de 50, 60 e 70°C, respectivamente. Os resultados da secagem foram analisados através dos modelos teóricos semi-empíricos de Lewis, Henderson e Pabis, Page e Overhults, nos quais os dois últimos modelos foram os que obtiveram os melhores ajustes dos dados experimentais ($R^2 > 0,98$). Conclui-se que na secagem do arroz em um secador descontínuo, para posterior beneficiamento dos grãos, a temperatura de 60°C mostrou-se mais adequada, por apresentar maior rendimento e menor quebra dos grãos.

Palavras-chave: Cereal. Modelos semi-empíricos. Secagem.

ABSTRACT

Rice (*Oryza sativa* L.) is a worldwide consumption cereal and, as a seasonal product, its conservation and storage are justified. Brazil is the biggest rice producer of South America, concentrating 64,4% of its production in the South area of the country. Rice is an agricultural product that has its marketing value depending on the quality of the grains verified after its processing. The percentage of the whole grains is the most important parameter for the rice industry. In this situation, the drying operation is essential, but, because of the very high temperature used, it can affect the quality of the produced grains. In the rice supply chain, the production cost is getting higher and higher and the final price is stable or getting lower. In this context, studies in different levels of the chain are necessary, in order to find alternatives to decrease the cost and, consequently, make the products more competitive without decreasing its quality. This paper has had the objective of evaluating the process of drying the rice during its processing in a local rice industry, in order to improve it. The drying process was done in a discontinuous drying tray in the temperatures of 50, 60 and 70°C, occurring in the first and second period of a decreasing rate with a moisture transition of 0,135, 0,140 and 0,123 $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry solid}}$ of the respective temperatures. The balance moisture obtained by the dynamic method were of 0,12, 0,11 and 0,09 $\text{kg}_{\text{water}}/\text{kg}_{\text{dry solid}}$ (dry base, b.s.), in the temperatures of 50, 60 and 70°C, respectively. The drying results were analyzed through the semi-empirical theoretical models of Lewis, Henderson and Pabis, Page and Overhults, in which the last two models were the ones that obtained the best adjustments of the experimental data ($R^2 > 0,98$). Therefore, in the rice drying process in a discontinuous drying machine, the temperature of 60°C is the most appropriate, for presenting the best results and lower grain breakage.

Key-words: Cereal. Semi-empirical models. Drying.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estruturas de um grão de arroz	22
Figura 2 - Isoterma de adsorção e de dessorção típica de alimentos	30
Figura 3 - Esquema do processo de secagem de um material sólido	31
Figura 4 - Curva de taxa de secagem em função da umidade	33
Figura 5 - Silo para secagem estacionária de sementes	37
Figura 6 - Secador intermitente	38
Figura 7 - Secador industrial descontínuo	45
Figura 8 - Unidade de beneficiamento em escala piloto	46
Figura 9 - Umidade em função do tempo	51
Figura 10 - Umidade em função do tempo, em escala semi-log	51
Figura 11 - Adimensional de umidade em função do tempo	52
Figura 12 - Taxa de secagem em função da umidade média	52
Figura A1 - Umidade em função do tempo	67
Figura A2 - Umidade em função do tempo, em escala semi-log	68
Figura A3 - Adimensional de umidade em função do tempo	68
Figura A4 - Taxa de secagem em função da umidade média	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química e conteúdo vitamínico de quatro cereais (%)	21
Tabela 2 - Composição da casca do arroz	23
Tabela 3 - Classes do arroz	24
Tabela 4 - Tipos do arroz	25
Tabela 5 - Equações semi-empíricas para secagem de grãos	48
Tabela 6 - Resultados estatísticos obtidos dos modelos de secagem de arroz	54
Tabela 7 - Valores obtidos após o beneficiamento do arroz	55
Tabela A1 - Valores obtidos de testes preliminares, da secagem do arroz reumidificado em secador industrial descontínuo.	69

NOMENCLATURA

A_a	Atividade de água	(-)
C	Constante do modelo	(-)
D_{ef}	Difusividade efetiva mássica	(m ² /s)
L	Espessura	(m)
K	Constante de secagem	(s ⁻¹)
n	Parâmetro de ajuste	(-)
P_s	Pressão de vapor de água saturada	(-)
P_v	Pressão parcial de vapor de água	(-)
R_p	Raio da partícula esférica ou cilíndrica	(m)
T_{bs}	Temperatura do bulbo seco	(°C)
t	Tempo	(s)
UR	Umidade relativa	(%)
μ	Raíz	(-)
∇	Gradiente	(-)
V_{ar}	Velocidade do ar	(m/s)
X	Conteúdo de umidade	(kg _{água} /kg _{sólido seco})
X_0	Umidade inicial do sólido	(kg _{água} /kg _{sólido seco})
X_e	Umidade de equilíbrio do sólido	(kg _{água} /kg _{sólido seco})

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo geral	17
2.2 Objetivos específicos	17
3. JUSTIFICATIVA	18
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
4.1 Arroz	20
4.1.1 Estruturas de um grão de arroz	22
4.1.2 Classes do arroz	23
4.1.3 Tipos do arroz	25
4.2 Água nos alimentos	25
4.2.1. Atividade de água - A_a	26
4.2.2 Água no grão	27
4.2.3 Isotermas de sorção	29
4.3 Secagem	30
4.3.1 Curvas típicas de secagem	32
4.4 Métodos de secagem	35
4.4.1 Secagem natural	35
4.4.2 Secagem artificial	36
4.4.2.1 Secagem estacionária	36
4.4.2.2 Secagem intermitente	37
4.5 Cinética de secagem	38
4.6 Armazenamento	42

5. MATERIAL E MÉTODOS	45
5.1 Matéria-prima	45
5.2 Equipamentos	45
5.3 Procedimento experimental de secagem	46
5.3.1 Secagem em secador descontínuo para caracterização da secagem	46
5.3.2 Secagem em secador descontínuo	47
5.3.3 Determinação de grão inteiro (rendimento)	48
5.4 Metodologia de cálculos	48
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
6.1 Caracterização da secagem	50
6.1.1 Modelos empíricos	53
6.2 Rendimento	55
7. CONCLUSÃO	57
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
APÊNDICE	68

1. INTRODUÇÃO

O Brasil, cuja produção de arroz ultrapassa dez milhões de toneladas por safra, é um dos dez maiores produtores mundiais e o maior da América do Sul, sendo que, na região Sul concentram-se mais de 64,4% da produção nacional (IBGE, 2011). Por ser o arroz um produto sazonal e de consumo constante, a conservação e armazenagem do produto torna-se indispensável (NESS, 1998).

No Brasil, a área cultivada com arroz se aproxima de 3,2 milhões de hectares, com produção em torno de 12,6 mil toneladas. O Rio Grande do Sul, Estado de maior produção, colhe anualmente cerca de 6 milhões de toneladas. A produção total do Município de Bagé por ano é de 1 milhão e 800 mil sacas de 50 kg e a área cultivada de arroz irrigado é de 18 mil hectares (CONAB, 2010).

A tecnologia para a produção do arroz de alto padrão de qualidade preconiza, genericamente, a execução da colheita no momento mais próximo possível da maturidade fisiológica (SARAVIA, PERES e RISSO, 2007).

As sementes quando atingem a maturidade fisiológica apresentam teores de água acima de 30%, os quais não são compatíveis com a tecnologia disponível para a colheita mecânica (VILLELA e SILVA, 1992), por este motivo, a colheita das sementes de arroz é realizada com teor de água em torno de 20 a 24%. Essa umidade é considerada alta para o armazenamento seguro, tornando o processo de secagem fundamental para a manutenção da qualidade das sementes (SARAVIA, PERES e RISSO, 2007).

Para que se possam minimizar as perdas na qualidade fisiológica dos grãos, após a colheita, se faz necessário conhecer o método de secagem mais seguro e saber quais os níveis de temperatura e de umidade que são considerados ideais para esse processo (SARAVIA, PERES e RISSO, 2007).

Pode-se conceber a secagem como um processo de transferência simultânea de calor e de matéria. O ar, ao mesmo tempo em que fornece calor ao sistema, absorve água do produto em forma de vapor. O gasto de energia térmica provocado pela evaporação da água é acompanhado

por um resfriamento do ar. Contudo, o ar absorve em forma de vapor o que perdeu sob a forma de calor, caracterizando um processo adiabático ou isoentálpico. Grãos são produtos higroscópicos e, como tal, podem sofrer variações no seu conteúdo de água, a qualquer momento, de acordo com as condições do ar ambiente que os circundam (ELIAS et al., 1996).

Comparado com outros grãos, o arroz apresenta dificuldades específicas na secagem, como a textura da casca, o sistema convencional mais adequado não ser o contínuo e a necessidade da utilização de temperaturas do ar não muito altas, para reduzir a quebra dos grãos provocada pela tensão de vapor e a alta umidade com que é colhido. No método intermitente, o secador opera por cargas, reduzindo gradualmente a umidade a valores próximos a 13% (BOEMEKE, 2000).

Os danos mais frequentemente observados, quando a secagem por ar aquecido não for convenientemente controlada, são redução de vigor e germinação das sementes, alterações de cor, formação de crosta periférica, perda de matéria seca, redução da integridade física dos grãos, diminuição da digestibilidade das proteínas, desestruturação do amido, suscetibilidade à incidência de defeitos e redução da conservabilidade, além do desperdício de tempo e de energia (ELIAS, 1998).

A secagem de arroz em casca é normalmente realizada em secadores intermitentes ou contínuos (RUIZ e NESS, 2001). No Rio Grande do Sul, o método mais empregado é o intermitente, que se caracteriza pela movimentação descendente dos grãos no equipamento, em perpendicular e através da massa de ar também em movimento, seguida pelo período de intermitência, que é a descontinuidade do contato ar-grãos, promovida pela recirculação dos grãos no secador, para que a transferência de água do centro para a periferia dos grãos se dê sem a presença da componente de pressão dinâmica provocada pela movimentação do ar. Neste método, do início ao final da operação, os grãos permanecem recirculando no interior do secador e o seu contato com o ar é descontínuo (ELIAS et al., 1996).

Segundo Mhimid, Nasrallah e Fohr (2000), a secagem de grãos é uma operação de grande interesse nos setores industrial e agrícola e a otimização do custo desta operação com a preservação da qualidade requer um estudo de transferência de massa e calor durante a secagem.

O estudo da secagem de materiais em camada delgada é utilizado para a determinação experimental dos parâmetros que caracterizam a operação, obtendo-se assim um melhor domínio do processo, como também um maior conhecimento dos fundamentos e mecanismos envolvidos (CHIRIFE, 1983).

Para ter controle preciso desta operação e a verificação de sua eficácia é de significativa importância entender como ocorrem os fenômenos de transferência de massa e calor durante a secagem de arroz. Para isto, os parâmetros físicos que comandam estes fenômenos devem ser determinados, e a possível dependência de outros fatores deve ser avaliada.

A utilização de equações semi-empíricas, para representar a cinética de secagem de grãos visa buscar uma forma de representar o comportamento da secagem que se ajuste melhor aos dados experimentais (BARROZO, SARTORI e FREIRE, 1998).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Este trabalho teve como objetivo estudar a operação de secagem de arroz (*Oryza sativa* L.), da variedade Olimar, em um secador industrial (unidade piloto) e posterior beneficiamento para análise do rendimento do produto final.

2.2. Objetivos específicos

(i) Caracterizar a secagem de arroz com casca em um secador industrial, com escoamento perpendicular do ar de secagem, através de curvas de secagem;

(ii) Estimar a umidade de equilíbrio das amostras, utilizando o método dinâmico;

(iii) Analisar os modelos semi-empíricos (Lewis, Henderson e Pabis, Page e Overhults) de secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70°C;

(iv) Realizar a secagem em um secador industrial, com escoamento perpendicular do ar de secagem, para posterior beneficiamento do arroz, simulando as condições utilizadas no engenho.

3. JUSTIFICATIVA

Na cadeia produtiva do arroz, os custos de produção estão cada vez maiores e o preço final do produto estável ou menor. Neste contexto, estudos nos diferentes pontos da cadeia tornam-se necessários, a fim de buscar alternativas para diminuição dos custos e, conseqüentemente, tornar os produtos mais competitivos sem diminuir sua qualidade.

Entre esses pontos, merece destaque o pós-colheita, especialmente no que se refere à secagem e ao armazenamento, pois o preço pago pela saca de arroz (50 kg) depende principalmente da integridade física do grão.

Dentre outros fatores, afirma-se que a secagem favorece ao maior ou menor rendimento de engenho e, os danos mais frequentemente observados, quando a secagem não é convenientemente controlada, são alterações de cor, formação de crosta periférica, perda de matéria seca, redução da integridade física dos grãos, diminuição da digestibilidade das proteínas, desestruturação do amido, suscetibilidade à incidência de defeitos e redução da conservação, além, do desperdício de tempo e de energia.

A secagem do arroz é essencial para possibilitar o armazenamento livre do ataque microbiológico e de insetos, pois a colheita, se realizada na faixa de umidade recomendada pela literatura, entre 18 e 23%, não permite o armazenamento seguro. Também deve ser observado o fato que grãos de variedades diferentes devem ser recebidos separadamente e assim mantidos, para não prejudicar o beneficiamento indústria.

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

O rendimento de grãos inteiros e quebrados o principal parâmetro a ser considerado na avaliação comercial do arroz para a avaliação da qualidade e do valor do produto final. Dentre outros fatores, os métodos e as condições de manejo da secagem, aos quais o produto é submetido, afetam diretamente o beneficiamento, interferindo, principalmente, na porcentagem de grãos inteiros obtidos.

Devido à importância econômica e social do arroz no mercado agrícola brasileiro que pode ser afetado pelo processo de secagem, a escassez de energia e o aumento do seu custo de produção remetem para a necessidade de mais estudos dos dois principais processos de secagem deste cereal.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Arroz

O arroz, dentre os cereais cultivados no mundo, é o que mais se destaca por ser um dos principais alimentos empregados na dieta humana. O seu uso na alimentação varia segundo os hábitos dos diferentes povos. Esta característica exige, na fase pós-colheita, o emprego de técnicas distintas para o seu preparo (BARBOSA, 2002).

Hoje o arroz é uma das mais importantes culturas e um dos principais produtos que compõem a cesta básica, sendo a principal fonte energética dentre os grãos, constituindo a base da alimentação para mais de 50% da população mundial (PEDROSO, 1982).

Esse cereal contribui com cerca de um quarto das calorias ingeridas pelos brasileiros, representa em torno de 15% do gasto total com alimentos, e possui consumo médio per capita na Região Sul de 18 kg, inferior à média nacional de 25 kg/hab/ano. As variações são expressivas de região para região e dentro de cada região. O Centro-Oeste é a região de maior consumo, com até 42 kg/hab/ano tomando-se por base o arroz beneficiado (IRGA, 2011).

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

Na Tabela 1 são comparadas as composições químicas dos grãos de arroz, milho, trigo e aveia. Destes cereais, o arroz possui a mais baixa percentagem de proteína e a mais alta percentagem de carboidratos solúveis (SINDARROZ, 2002).

Tabela 1 - Composição química e conteúdo vitamínico de quatro cereais (%).

Componente (%)	Arroz	Milho	Trigo	Aveia
Umidade	12,0	10,6	12,0	8,3
Proteína	7,2	9,4	11,8	14,2
Lipídeos	0,6	4,3	1,2	7,4
Cinza	0,5	1,3	0,5	1,9
Carboidratos solúveis	79,7	74,4	74,5	68,2

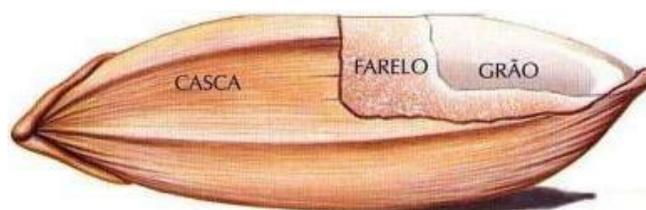
Fonte: www.sindarroz-sc.com.br

O arroz armazena sua energia no grão, predominantemente nas moléculas de amido que se formam nos amiloplastos e que são constituídas, basicamente, por polímeros de a-D-glicose: amilose e amilopectina. A relação amilose/amilopectina é fator preponderante na diferenciação do comportamento das cultivares de arroz, no encharcamento. Enquanto as cultivares, com teor de amilose abaixo de 30%, têm maior facilidade de hidratação, aqueles com teores acima têm mais dificuldade de absorver água, além de, proporcionalmente, reterem menor quantidade de água no seu interior (TAVARES et al., 1998; MÜLLER, 1999).

4.1.1. Estruturas de um grão de arroz

Para entender as características nutricionais do arroz, é preciso saber que este cereal pode ser dividido em diferentes partes. Existem várias maneiras de se dividir um grão de arroz, dependendo da complexidade desejada. Para avaliar o processamento do arroz e suas implicações, é comum dividi-lo como na figura abaixo (SINDARROZ, 2002).

Figura 1- Estruturas de um grão de arroz.



Fonte: www.ufrgs.br/alimentus/terradearroz/grao/gr_divisao.htm.

O grão de arroz consiste da cariopse e de uma camada protetora, a casca. A casca, composta de duas folhas modificadas, a pálea e a lema, corresponde a cerca de 20% do peso do grão, pode-se observar a composição da casca na Tabela 2. A cariopse é formada por diferentes camadas, sendo as mais externas o pericarpo, o tegumento e a camada de aleurona, que representam 5-8% da massa do arroz integral. A camada de aleurona apresenta duas estruturas de armazenamento proeminentes, os grãos de aleurona (corpos protéicos) e os corpos lipídicos. O embrião ou gérmen está localizado no lado ventral na base do grão, é rico em proteínas e lipídios, e representa 2-3% do arroz integral. O endosperma forma a maior parte do grão (89-94% do arroz integral) e consiste de células ricas em grânulos de amido e com alguns corpos protéicos (JULIANO e BECHTEL, 1985).

Tabela 2 - Composição da casca do arroz.

Proteína (%)	Gordura (%)	Fibras (%)	Cinzas (%)	Carboidratos (%)
2,0 – 2,8	0,3 – 0,8	34,5 – 45,9	13,2 – 21,0	22,0 – 34,0

Fonte: www.ufrgs.br/alimentus/terradearroz/grao/gr_casca.htm.

Através da descascagem, separa-se a casca da cariopse, obtendo-se o arroz integral. Este pode ser polido para remoção do farelo (pericarpo, tegumento, camada de aleurona e gérmen), que representa 8,5-14,8% do arroz integral (JULIANO e BECHTEL, 1985), obtendo-se o arroz branco polido. Os grãos também podem ser submetidos à parboilização, processo hidrotérmico através do qual se obtém o arroz parboilizado, o qual pode ser consumido na forma integral ou polido.

4.1.2. Classes do arroz

O arroz em casca e o arroz beneficiado são divididos em 5 classes, assim identificadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Classes do arroz.

Classes	Características
Longo Fino	É o produto que contiver no mínimo 80% dos grãos inteiros medindo 6,0 mm ou mais no comprimento; 1,80 mm no máximo na espessura e cuja relação comprimento/largura seja superior a três, após o polimento dos grãos.
Longo	É o produto que contiver no mínimo 80% dos grãos inteiros medindo 6,0 mm ou mais no comprimento, após o polimento dos grãos.
Médio	É o produto que contiver, no mínimo 80% dos grãos inteiros medindo de 5,0 mm a menos de 6,0 mm no comprimento, após o polimento dos grãos.
Curto	É o produto que contiver, no mínimo 80% dos grãos inteiros medindo menos de 5,0 mm no comprimento, após o polimento dos grãos.
Misturado	É o produto que, contendo menos de 80% de uma das classes anteriores, apresentar-se-á constituído por duas ou três classes distintas. Deverá constar, obrigatoriamente, no Certificado de Classificação, a percentagem de cada uma das classes que compõem a mistura.

Fonte: www.agencia.cnptia.embrapa.br.

4.1.3. Tipos do arroz

O arroz beneficiado é dividido em 5 tipos, assim identificadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Tipos do arroz.

Tipo	Característica
Tipo 1	É o produto que contiver no máximo 10% de grãos quebrados.
Tipo 2	É o produto que contiver no máximo 20% de grãos quebrados
Tipo 3	É o produto que contiver no máximo 30% de grãos quebrados.
Tipo 4	É o produto que contiver no máximo 40% de grãos quebrados.
Quirera	Considerado fragmento de arroz, que não tem o mesmo valor comercial do grão.

Fonte: www.agencia.cnptia.embrapa.br.

4.2. Água nos alimentos

A presença de água nos alimentos em quantidades adequadas e com localização definida é imprescindível nos alimentos para que tenham qualidade aceitável para o consumidor. Entretanto, o conteúdo de água nos alimentos faz com que eles sejam altamente perecíveis; por isso, são requeridos métodos efetivos de conservação quando se pretende armazená-los por longos períodos. Sabe-se que a extração da água por secagem e a transformação ao estado sólido são

métodos eficazes para a conservação de alimentos, mas alteram suas propriedades (ORDÓÑEZ et al., 2005)

Usualmente o conteúdo de água de um alimento é obtido pela determinação da água total contida no alimento. Entretanto, esse valor nos fornece indicações de como está distribuída a água nesse alimento, como também não permite saber se toda a água está ligada do mesmo modo ao alimento (BOBBIO e BOBBIO, 2001).

O termo atividade de água foi criado para designar o quanto de água está disponível no alimento, ou seja, para indicar a intensidade com que a água está associada aos constituintes não aquosos (RIBEIRO e SERAVALLI, 2007).

4.2.1. Atividade de água – A_a

Nos alimentos, a água existe sob duas formas: água livre e água combinada, sendo a água total a soma dessas duas parcelas (CELESTINO, 2010).

A água livre (ou água não ligada) está presente nos espaços intergranulares e entre os poros do alimento. Essa água mantém suas propriedades físicas e serve como agente dispersante para substâncias coloidais e como solvente para compostos cristalinos (CELESTINO, 2010).

A água livre é conhecida como atividade de água (A_a) e corresponde à relação entre a pressão parcial de vapor de água (P_v), pois, na operação de secagem, a água é retirada do alimento por meio de uma fase gasosa insaturada, e a pressão de vapor de água saturada (P_s), à mesma temperatura (Equação 1) (FENNEMA, 1993).

$$A_a = P_v/P_s \quad (1)$$

A atividade de água é um dos fatores mais importantes para a indústria de alimentos, pois quantifica a água disponível para o crescimento de microrganismos e as reações que podem alterar os alimentos, o que possibilita a previsão da estabilidade. A atividade de água pode ser

determinada por um medidor de atividade de água, e seu valor varia numericamente de 0 a 1 (GAVA, SILVA e FRIAS, 2009; BOBBIO e BOBBIO, 2001)

A água combinada é a soma de água absorvida e água ligada. A primeira está presente na superfície das macromoléculas como amido, pectina, celulose e proteína por forças de Van der Waals e pontes de hidrogênio. A água de hidratação ou ligada está associada quimicamente com outras substâncias do alimento e não é eliminada na maioria dos métodos de determinação de umidade (CELESTINO, 2010).

É importante ressaltar que a atividade de água do alimento é uma propriedade intrínseca da amostra, enquanto a umidade relativa (de equilíbrio) depende da atmosfera em equilíbrio com a amostra (RIBEIRO e SERAVALLI, 2007).

Os produtos podem ser divididos em: perecível, com alto teor de água (como frutas, legumes e vegetais) e deteriorável, com teor de água de 15 a 30% na época de colheita (como os grãos) (ORDÓÑEZ et al., 2005).

4.2.2. Água no grão

Após a colheita faz-se necessário à adoção de alguns processos para conservação do produto, que consiste basicamente na retirada de parte da água contida no mesmo, pois, o comportamento dos grãos durante o armazenamento depende da temperatura e do teor de umidade em que se encontra o produto (BROOKER, BAKKER-ARKEM e HALL, 1974).

Para entender melhor o papel da água dos grãos, é necessário compreender alguns princípios básicos que envolvem a fixação da água pelos constituintes químicos dos produtos (BROOKER, BAKKER-ARKEM e HALL, 1974).

A água contida nos grãos se apresenta em diferentes formas, em função da natureza das ligações químicas existentes entre os componentes da matéria seca e as moléculas de água, determinando, assim, os diferentes níveis de hidratação do produto. Uma porção de água está

estritamente associada com a substância adsorvedora (BROOKER, BAKKER-ARKEM e HALL, 1974).

Constitui-se de uma camada monomolecular fortemente polarizados, que pode estar combinada por intermédio de ligações químicas com a substância, ou seja, é parte integrante de uma dada substância. Encontra-se também nos grãos uma quantidade de água representada por uma camada polimolecular, que se fixa sobre a camada monomolecular precedente e que estão ligadas à matéria por meio de ligações eletromagnéticas, e constituem-se em água pseudoligadas, não-solventes, sem papel biológico e fortemente adsorvida (BROOKER, BAKKER-ARKEM e HALL, 1974).

Nos grãos encontra-se também água líquida sob tensão osmótica. Trata-se de água solvente, que retém diferentes substâncias nas células do material biológico; apresenta-se fracamente adsorvida, tem papel biológico e pode permitir as reações químicas (enzimáticas), bem como o desenvolvimento de fungos; é, em grande parte, retirada pela secagem. Uma determinada quantidade de água pode ser mantida livremente nos espaços correspondentes aos poros existentes nos grãos, isto é, mantida fracamente no sistema por forças capilares. Tal quantidade de água é denominada água de impregnação, que alguns pesquisadores denominam-na *água livre* ou *absorvida*. É mantida no grão, mecanicamente, pelas paredes celulares; as moléculas das substâncias adsorvedoras não são afetadas, apenas agem como estrutura de suporte (PEREIRA e QUEIROZ, 1987).

Essa classificação dos tipos de água presentes nos grãos é meramente uma colocação em categorias usuais. Deve-se ter em mente que em sistemas coloidais, tais como grãos, os quais são constituídos de várias substâncias e possuem uma estrutura organizada, ocorrem muitos tipos de água ligada, na faixa entre a água livre e aquela quimicamente ligada (PEREIRA e QUEIROZ, 1987).

No Brasil, o método oficial de determinação do grau de umidade dos grãos é o da estufa a $105\pm 3^{\circ}\text{C}$, com circulação natural de ar, durante 24 horas, utilizando-se grãos não triturados (BRASIL, 1992).

Na medida em que avança o processo de maturação dos grãos, diminui a sua resistência ao ataque das pragas e dos microrganismos. A colheita deve ser realizada no momento próprio e

de forma adequada, pois o retardamento e as danificações mecânicas podem determinar que sejam colhidos grãos com qualidade já comprometida ou com pré-disposição para grandes perdas durante o armazenamento e/ou a industrialização (PUZZI, 1986; ELIAS et al., 1996).

A umidade de colheita está diretamente associada com a qualidade e com o rendimento industrial dos grãos. Colheita em umidades inadequadas pode prejudicar essa qualidade, pela redução na conservabilidade e no rendimento do produto, bem como promover uma maior ocorrência de defeitos, os quais se intensificam durante o armazenamento, prejudicando a tipificação na classificação comercial dos grãos, reduzindo-lhes qualidade e valor (ELIAS et al., 2000).

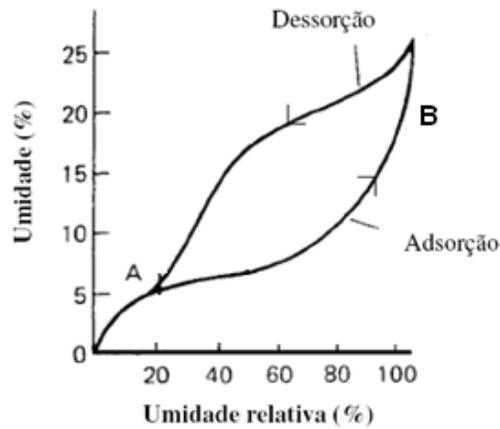
O rendimento de grãos inteiros e a frequência de aparecimento de defeitos de classificação são influenciados pela variedade, pela umidade de colheita e pelo método de beneficiamento do arroz (DIAS, 1993). Na maioria das variedades, os grãos devem ser colhidos quando sua umidade se situar entre 18 e 23% de umidade (ELIAS et al., 2000).

4.2.3. Isotermas de sorção

As isotermas de sorção representam a relação entre a atividade de água (ou a umidade relativa do meio) e a umidade do alimento em equilíbrio com o meio, a uma determinada temperatura. As isotermas podem representar a perda (desorção) ou o acréscimo (adsorção) de umidade do material em função da umidade relativa do meio em que este se encontra (PEZZUTI e CRAPISTE, 1997; FENNEMA, 1993).

Os gráficos das isotermas (Figura 2) fornecem informações úteis para processos de concentração, secagem e hidratação de alimentos, uma vez que a facilidade de retirar ou adicionar água está relacionada com a atividade de água do alimento e, ainda, para verificar e acompanhar a estabilidade de produtos alimentícios, principalmente durante o armazenamento (RIBEIRO e SERAVALLI, 2007).

Figura 2 - Isoterma de adsorção e de dessorção típica de alimentos.



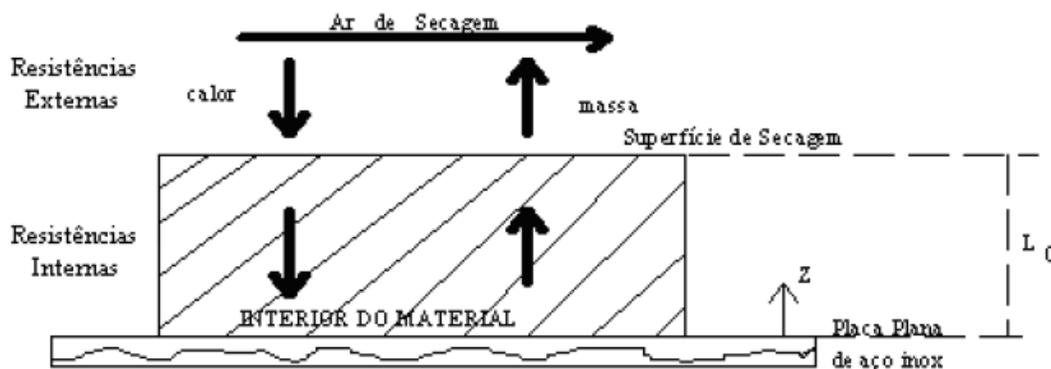
Fonte: FENNEMA, 1993.

Para otimizar as condições de secagem e/ou reidratação, e a qualidade final e estabilidade do produto durante a armazenagem, é importante conhecer as isotermas de sorção no produto, obtidas em condições experimentais adequadas. Numerosos modelos matemáticos são avaliados pela literatura para serem utilizados a fim de descrever o comportamento da umidade de sorção em alimentos. Muitos destes modelos são baseados em teorias de mecanismo de sorção, outros são empíricos ou semi-empíricos (KAYMAK e GEDIK, 2004).

4.3. Secagem

Segundo McComick et al. (1983) a secagem é normalmente considerada um processo de remoção de umidade de um sólido por evaporação. Quando o calor necessário para evaporar a água é fornecido ao material, ocorrem transferências simultâneas de calor e massa, conforme está esquematizado na Figura 3.

Figura 3 - Esquema do processo de secagem de um material sólido.



Fonte: PINTO, 1996.

A secagem demanda existência de gradientes de pressões parciais de vapor de água entre os grãos e o ar de secagem. De acordo com as propriedades higroscópicas, o fluxo de vapor de água ocorre no sentido da maior para a menor pressão parcial de vapor, assim, o aquecimento do ar de secagem determina a redução da umidade relativa e o consequente aumento do potencial de retenção de água. A secagem de grãos, mediante convecção forçada do ar aquecido, estabelece dois processos que ocorrem simultaneamente: transferência da água superficial dos grãos para o ar e movimento de água do interior para a superfície dos grãos, decorrente do gradiente hídrico entre essas duas regiões (VILLELA, 1991; MORAES, 2000).

Quando entram em contato com o ar, os grãos realizam trocas, até que pressões de vapor e temperatura de um e de outro sejam semelhantes, atingindo o equilíbrio energético, hídrico e térmico. Enquanto a pressão de vapor do ar for menor do que a dos grãos, haverá secagem e enquanto a temperatura do ar for maior do que a dos grãos, estes sofrerão aquecimento (LASSERAN, 1978; ELIAS et al., 1996). O aquecimento do ar de secagem, com as finalidades de diminuir sua umidade relativa e de aumentar sua entalpia e sua capacidade evaporativa, deve ser controlado dentro de limites determinados, em virtude dos danos físico-químicos e biológicos que pode causar aos grãos (ELIAS et al., 1996).

A secagem também pode ser entendida como um processo simultâneo de transferência de calor do ar para os grãos e de massa (água) dos grãos para o ar. Assim, em função da necessidade de energia térmica para a evaporação da água, ocorre um resfriamento do ar de secagem pela

perda de calor sensível. No entanto, o balanço energético é nulo porque o ar recupera, na forma de vapor de água (calor latente), o que perdeu na forma de calor sensível. Desse modo, a secagem é considerada um processo isoentálpico, em que ocorre redução da temperatura do ar e aumentos da razão de mistura, da umidade relativa, da pressão de vapor e da temperatura do ponto de orvalho, por outro lado à entalpia e a temperatura do bulbo úmido permanecem praticamente constantes (VILLELA e SILVA, 1992; CAVARIANI, 1996).

Na secagem de alimentos, os mecanismos mais importantes são: a difusão de vapor devido ao gradiente de concentração, a difusão de água líquida em termos do gradiente de umidade e o escoamento capilar (LEHN e PINTO, 2004).

O objetivo principal da secagem de alimentos é garantir sua conservação, que consiste na redução do teor de água até um determinado nível, no qual as concentrações de açúcares, sais, ácidos e outros componentes sejam suficientemente altos para reduzir a atividade de água, impedindo o crescimento de microrganismos responsáveis pela deterioração dos alimentos (TRAVAGLINI, NETO e BLEINROTH, 1993).

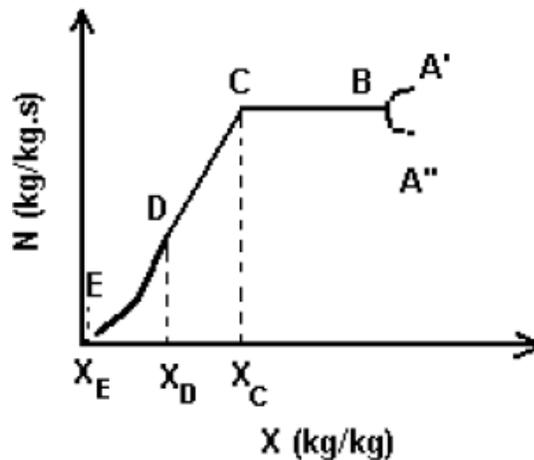
As razões para a secagem são tantas quantas são os materiais que podem ser secos, dentre as quais tem-se: estabilidade dos componentes aromáticos à temperatura ambiente por longos períodos de tempo; diminuição do peso, gerando economia no custo de transporte do produto, economia de energia por não necessitar de refrigeração e a disponibilidade do produto durante qualquer época do ano (BROD, ALONSO e PARK, 1999).

4.3.1. Curvas típicas de secagem

Os produtos biológicos são muito diferentes entre si, devido à sua composição, estrutura, e as suas dimensões. As condições de secagem são muito adversas, de acordo com as propriedades do ar de secagem e a forma como se faz o contato ar-produto. Entretanto, a transferência de calor e de massa entre o ar de secagem e o produto é fenômeno comum a qualquer condição de secagem (SILVA, 2007).

A evolução destas transferências simultâneas de calor e massa no decorrer da operação de secagem faz com que esta seja dividida esquematicamente como na Figura 4 (SILVA, 2007).

Figura 4 - Curva de taxa de secagem em função da umidade.



Fonte: FOUST et al., 1983.

A secagem pode ser dividida em período de taxa constante de secagem e período de taxa decrescente de secagem, de acordo com a Figura 4 (MCCORMICK et al., 1983).

Os segmentos A'' - B e A' - B , apresentados na Figura 4, representam os intervalos de aquecimento ou resfriamento do material, respectivamente, (estabilização entre a temperatura do sólido e a de bulbo úmido do ar de secagem). No ponto A'' da Figura 4, o sólido encontra-se a uma temperatura inferior ao do ar de secagem. Tal situação apresenta comportamento inverso para o ponto A' , no qual o sólido apresenta temperatura superior (FOUST et al., 1983).

Observando a Figura 4, verificam-se os dois períodos de secagem:

(a) Período de Taxa Constante de Secagem: é o representado pelo segmento B - C na Figura 4.

No período de taxa constante, a superfície do material é mantida num nível de umidade tal que a secagem ocorre como se fosse água pura evaporando. Se o sólido for poroso, a maioria da água evaporada no período de taxa constante é proveniente do interior do sólido. Este período só

continua desde que a água seja provida à superfície tão rápido quanto é evaporada (GEANKOPLIS, 1983).

Na secagem de alimentos, o período de taxa constante só tem relativa importância quando o teor de umidade inicial do sólido é muito alto ou quando o potencial de secagem do ar é muito baixo. Neste período o material está à temperatura de bulbo úmido do ar (CHIRIFE, 1983). As resistências à transferência de calor e massa são ocasionadas somente na corrente de ar, assim a taxa de evaporação de água não muda com o tempo. O fim da taxa constante ocorre quando a migração interna de água para superfície não consegue mais suprir a taxa de evaporação da água livre de superfície. O valor da umidade deste ponto é denominado umidade crítica (X_c). Os valores de umidade crítica não são somente característicos de cada material alimentício, mas também depende de outros fatores que controlam a migração (interno/externa) tais como espessura do material e condições do ar (v_{ar} , T_{bs} , %UR) (CHIRIFE, 1983).

b) Período de Taxa Decrescente de Secagem: este período compreende o intervalo C-E, sendo geralmente dividido em duas fases.

O período de taxa decrescente de secagem se caracteriza por apresentar ou não duas fases bem diferenciadas num determinado tempo. Surgindo uma ou mais quebras, ou mudanças na inclinação, chamadas de transição. Esta transição normalmente não ocorre em muitos processos industriais, os quais se limitam ao período de taxa constante e a primeira fase do período de taxa decrescente (PERRY e CHILTON, 1980). Este período ocorre quando a migração interna de água começa a controlar o processo de secagem, e pode ser constituído de duas etapas. Na primeira fase (intervalo C-D) do período de taxa decrescente da secagem de alimentos sólidos, os principais mecanismos de transporte sugeridos são: escoamento capilar, difusão de líquido e difusão de vapor, podendo acontecer transporte por diversos mecanismos simultaneamente. Na segunda fase deste período (intervalo D-E), a difusão de vapor é, provavelmente, o mecanismo predominante de transporte de umidade (TOBINAGA e PINTO, 1992). No ponto E da Figura 4, é alcançada a condição de equilíbrio entre a umidade do material e a umidade relativa do ar de secagem.

4.4. Métodos de secagem

Os métodos de secagem são classificados quanto ao uso de equipamentos (natural ou artificial), à periodicidade no fornecimento de calor (contínuo ou intermitente) e à movimentação da massa de grãos (estacionário ou contínuo) (CAMACHO et al., 2004).

4.4.1. Secagem natural

A secagem de alimentos é um processo de conservação que permite a obtenção de produtos de baixo valor de umidade de água. Essa tecnologia possibilita prolongar a vida útil do produto, além de requerer pouco investimento, sendo apropriada para pequenos e médios agroindustriais (CRUZ, 1990).

A secagem natural pode ser aplicada em regiões com temperatura média de 35 a 40°C, com boa taxa de radiação solar, baixa umidade relativa do ar e baixo índice de poluição (CELESTINO, 2010).

A secagem natural é um processo de baixo custo, sendo necessário apenas uso de bandejas para a desidratação e redes protetoras contra insetos. Alimentos de alta perecibilidade, como frutas, hortaliças, ervas e carnes, devem ter essa proteção, mas, no caso de café, milho e arroz, a secagem pode ser feita com os grãos espalhados no chão, estando esses apenas sobre uma cobertura plástica (CELESTINO, 2010).

Porém a secagem natural é limitada pelo clima, quando as condições de umidade relativa do ar e temperatura não permitem, ou quando se trata de maiores volumes de grãos. Apesar de apresentar baixo custo, é um método lento, e os grãos não devem ser expostos em camadas superiores a 4-6 cm, com revolvimento periódico (MAIA, 1995).

Apresenta desvantagens que decorrem do intensivo uso de mão-de-obra, uma vez que as operações geram baixo rendimento e o processo é totalmente dependente das condições climáticas disponíveis (CARVALHO, 1994).

4.4.2. Secagem artificial

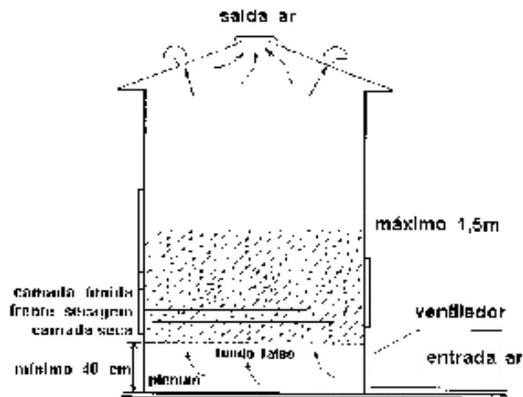
4.4.2.1. Secagem estacionária

A secagem estacionária consiste basicamente no insuflamento de ar continuamente, na maioria das situações, através de um volume de grãos que permanece estático. A secagem processa-se em camadas com a formação de zonas de secagem, a região onde mais efetivamente verifica-se a cedência de água das sementes para o ar é denominada frente de secagem (RANGEL, ZIMMER e VILLELA, 1997; CAVARIANI et al., 1999; PESKE e VILLELA, 2003; VILLELA e PERES, 2004).

Os secadores estacionários mais utilizados para secagem de sementes utilizando este método são os silos com distribuição axial ou radial do fluxo de ar (Figura 5) (MIRANDA, SILVA e CAVARIANI, 1999).

A secagem, nos silos estacionários de fundo falso perfurado, se processa da base para a superfície da massa de grãos e, nos de tubo central perfurado, do centro para a periferia. Ocorre em camadas, em função da formação de zonas de secagem correspondentes às regiões de intercâmbio de água entre o grão e o ar. McLean (1980) ponderou que em secadores com distribuição radial do ar, a reduzida espessura da massa de grãos, em associação com características aerodinâmicas favoráveis, faz com que a pressão estática seja baixa, o que possibilita a utilização de fluxos de ar próximos a 30 m³/minuto/t.

Figura 5 - Silo para secagem estacionária de sementes.



Fonte: www.ufsm.br/sementes/textos/secagem.

Neste método são importantes as precauções para evitar a super secagem da camada de sementes mais próxima à entrada de ar aquecido e, ao mesmo tempo, permitir a retirada de água na camada mais distante, para que não seja acelerada a deterioração das sementes (MIRANDA, SILVA e CAVARIANI, 1999).

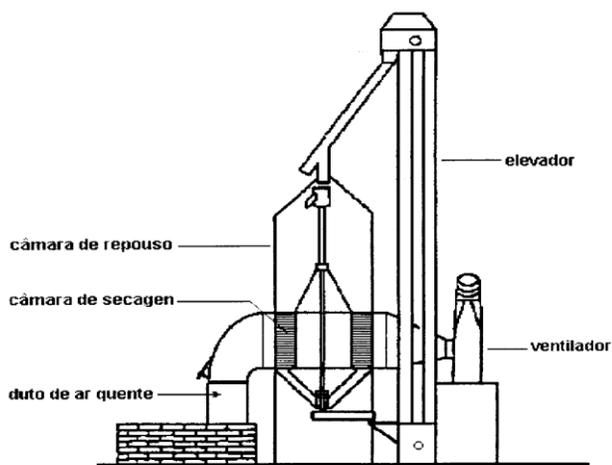
4.4.2.2. Secagem intermitente

Nesta secagem os grãos são submetidos à ação do ar aquecido durante intervalos regulares de tempo, intercalados por períodos sem aquecimento, denominados períodos de repouso. A intermitência permite que ocorra o transporte de água do interior para a superfície da semente durante o período de repouso (BROOKER, BAKKER-ARKEM e HALL, 1974; TOLEDO e FILHO, 1977).

Em secadores intermitentes (Figura 6) são empregados, em geral, elevados fluxos de ar e altas temperaturas do ar de secagem, possibilitando, desta forma, uma alta capacidade de secagem. Além disso, as sementes atingem temperaturas inferiores às do ar aquecido, o que vem a contribuir de forma considerável para o emprego destes secadores na indústria de grãos (VILLELA e SILVA, 1992).

Na secagem de grãos de arroz em secador intermitente à temperatura do ar de 70°C, variando o fluxo de ar, o teor de água inicial dos grãos e o tempo de exposição ao ar aquecido, Luz (1986) constatou que existe uma relação linear entre a redução do teor de água e o tempo de secagem e que as velocidades de secagem alcançam 1,6%/h a 2,0%/h.

Figura 6 - Secador intermitente.



Fonte: www.ufsm.br/sementes/textos/secagem.

Na secagem intermitente, o consumo de energia para aquecimento do ar e movimentação do ar e grãos é alto, comparativamente à secagem estacionária, em silos secadores armazenadores, porém a operação é mais rápida e o risco de deterioração do produto é menor (BARBOSA, FAGUNDES e ELIAS, 2002).

4.5. Cinética de secagem

A cinética de secagem deve ser completamente descrita usando propriedades do meio de secagem e do material, tal como as propriedades de transporte (condutividade térmica, difusividade térmica, difusividade mássica, coeficiente de transferência de calor e de massa). No

entanto, a simulação de modelos para descrever a cinética de secagem pode, também, ser usada para projetar ou para o controle e implementação dos sistemas já existentes (KARATHANOS e BELESSIOTIS, 1999).

Diferentes teorias procuram explicar a cinética de secagem de materiais porosos. O principal objetivo é descrever como a umidade é transferida do interior do sólido para evaporar na sua superfície e qual mecanismo de transferência controla o processo de secagem. Os modelos matemáticos tradicionalmente utilizados para representar a cinética de secagem são dois: os modelos puramente convectivos e os modelos difusivos. A formulação desses modelos, desenvolvida a partir da análise de comportamento de secagem de uma única partícula, geralmente considera todos os parâmetros de transporte constantes, possibilitando uma descrição similar da taxa de secagem (MAYTA, MASSARANI e PINTO, 1996).

Na operação de secagem o transporte de massa em um meio sólido é explicado através da 2ª Lei de Fick, expressa em termos do gradiente de umidade. Lewis (1921) foi um dos primeiros autores a interpretar o processo de secagem como um fenômeno difusivo com o controle interno. Sherwood (1929) também assumiu que a difusão interna de líquido predomina nos mecanismos internos de transferência de umidade.

Diversos modelos matemáticos podem ser usados para descrever o processo de secagem e ajudar na otimização e construção de secadores. A maioria destes modelos deriva do modelo difusional da 2ª Lei de Fick para diferentes geometrias (CRANK, 1975).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{ef} \cdot X \cdot \nabla^2 \quad (2)$$

onde: D_{ef} é a difusividade efetiva (m^2/s); X é o conteúdo de umidade ($kg_{\text{água}}/kg_{\text{sólido seco}}$); ∇ é o gradiente.

A Equação (2) pode ser resolvida para diversas geometrias (plana, cilíndrica e esférica) aplicando as devidas condições de contorno e estas soluções podem ser encontradas em Crank (1975). No caso das condições de contorno:

- No início do processo, todos os átomos do soluto estão uniformemente distribuídos, mantendo uma concentração " X_0 ";
- Na superfície para $t > 0$ a concentração é igual à concentração de equilíbrio;

- O coeficiente de difusão permanece constante.

As soluções analíticas para as três geometrias citadas podem ser obtidas por integração para mostrar a evolução temporal da concentração (CRANK, 1975):

Placa Plana

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[- \left(\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D_{ef} t}{L^2} \right) \right] \quad (3)$$

Cilindro infinito

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2} \exp \left[- \left(\frac{\mu_n^2 D_{ef} t}{R_p^2} \right) \right] \quad (4)$$

Esfera

$$\frac{X-X_e}{X_0-X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[- \left(\frac{n\pi^2 D_{ef} t}{R_p^2} \right) \right] \quad (5)$$

onde D_{ef} é o coeficiente de difusão efetivo do líquido (m^2/s); X é a umidade média do sólido no instante t , em base seca ($kg_{\text{água}}/kg_{\text{sólido seco}}$); X_0 é a umidade inicial do sólido, em base seca ($kg_{\text{água}}/kg_{\text{sólido seco}}$); X_e é a umidade de equilíbrio do sólido, em base seca ($kg_{\text{água}}/kg_{\text{sólido seco}}$); L é a espessura da camada (m); R_p é o raio da partícula esférica ou cilíndrica (m); μ e n são as raízes.

Na secagem, é importante conhecer o comportamento da difusão das moléculas. O valor do coeficiente de difusão efetiva, D_{ef} , permite um estudo quantitativo das características de secagem em relação às variáveis experimentais controladas tais como temperatura (CAVALCANTE, 2003).

Uma importante correlação na secagem de alimentos é a correlação exponencial (BALA e WOODS, 1992), esta lei estabelece que a taxa de secagem é proporcional ao teor de água livre do gênero alimentício na forma:

$$dX/dt = -K(\bar{X} - X_e) \quad (6)$$

onde o fator de proporcionalidade é denominado constante de secagem (K). Esta equação é uma expressão análoga à Lei de resfriamento de Newton, se for levado em conta que toda a resistência ao transporte de umidade concentra-se na camada limite, desconsiderando os efeitos no interior do material; é por isto chamada de modelo semi-empírico. A Equação 6 é normalmente utilizada na forma integrada, como,

$$(\bar{X} - X_e)/(X_0 - X_e) = \exp(-K.t) \quad (7)$$

Outras duas importantes modificações da lei exponencial, na forma integrada, a dois parâmetros que apresentam melhores ajustes experimentais são,

$$(\bar{X} - X_e)/(X_0 - X_e) = C. \exp(-K.t) \quad (8)$$

$$(\bar{X} - X_e)/(X_0 - X_e) = \exp(-K.t^n) \quad (9)$$

A Equação 8 é similar à solução do modelo de Fick para tempos de secagem longos, quando apenas o primeiro termo da solução série for significativo (McCOMICK et al., 1983). Esta correlação é utilizada por muitos pesquisadores da área de secagem para a determinação do parâmetro difusividade efetiva a partir da constante de secagem. A Equação 9 é conhecida como o modelo de Page, sendo esta correlação frequentemente utilizada nos estudos da secagem de produtos agrícolas, em particular para grãos e sementes, por apresentar excelentes resultados (PARTI e DUGMANICS, 1990).

De acordo com a literatura, verifica-se que as equações de secagem puramente empíricas são boas opções para a predição do processo de secagem, dentro das condições operacionais para

as quais foram estabelecidas. O problema maior está na determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa e das propriedades físicas dos produtos a serem secos. Para modelar o funcionamento de secadores, os fatores significativos que são considerados nos modelos podem ser classificados em:

(a) Propriedades físicas dos sólidos: tamanho da partícula, forma, densidade e teor de umidade;

(b) Condições de operação: fluxo e temperatura de alimentação, temperatura velocidade e umidade do gás de secagem.

É importante observar que os termos utilizados, no momento da realização de uma modelagem, são os fatores que interferem de forma direta ou indireta no processo de secagem (OLIVEIRA, 2010).

4.6. Armazenamento

A forma mais comum de armazenagem de cereais e leguminosas é a do grão vivo. Este contém uma alta concentração de substâncias nutritivas e é fácil de armazenar graças a seu baixo teor em água. Possuem baixa capacidade de condutibilidade calorífica e isto significa que as diferenças de temperatura no produto armazenado só são perceptíveis em distâncias curtas e períodos longos, o que leva a acumulações de calor na massa de grãos, com todas as conseqüências desvantajosas, como aumento da respiração, desenvolvimento microbiano, infestação com insetos e condensação (GWINNER, RÜDIGER e MÜCK, 1997).

O tipo de manutenção a aplicar, sua periodicidade e intensidade ficam na dependência de resultados observados ao longo do período de armazenamento, das medidas de controle de qualidade obtidas em testes, onde fatores como variação de umidade relativa e temperatura do ar, umidade e temperatura do grão, bem como a avaliação do grau de desenvolvimento de microrganismos, de insetos e de ácaros, presença de roedores e variação de acidez do óleo, entre outros, devem ser considerados (ELIAS et al., 1996).

O peso seco dos grãos com casca, caracterizando sua massa específica aparente, apresenta variações significativas durante o armazenamento, as quais são influenciadas pelas características varietais, pelas condições de secagem, pelo sistema e pelas condições ambientais de armazenamento (ROMBALDI, 1988).

O teor de água do grão depende da umidade relativa do ar que o circunda. No momento em que as pressões parciais do vapor da água contida na superfície do grão e do vapor d'água do ar circundante se igualam, não há mais secagem, mas o equilíbrio higroscópico. Alguns outros fatores influem nesta relação, como a temperatura do ar, efeito da histerese e a composição química do grão; ou seja, diferentes espécies não mantêm o mesmo grau de umidade de equilíbrio sob as mesmas umidades relativas do ar (HARRINGTON, 1973; LASSERAN, 1978; CARVALHO, 1994; ELIAS, 1998).

Mesmo não tendo boa condutibilidade térmica, mas por serem organismos vivos, com estruturas intra e intergranular porosa e composição química que lhes confere higroscopicidade, os grãos de arroz estão em constantes trocas de calor e de umidade com o ar ambiente. Assim, pelo sistema convencional de armazenamento, os grãos são expostos aos efeitos das variações das características psicrométricas do ar ambiente. O comportamento higroscópico dos grãos de arroz, sorvendo e perdendo água para entrarem em equilíbrio com a umidade do ar ambiente, é um dos fatores mais importantes na formação de fissuras. A entrada de água nos grãos ocorre quando sua pressão de vapor for menor do que a do ambiente a que estão submetidos. O nível de umidade a que o grão pode ser seco, sem desenvolver fissuras quando da ocorrência de uma sorção rápida, é denominado de umidade crítica (ELIAS, 1998).

A umidade de um grão se mantém em equilíbrio com o ar que o rodeia (HOSENEY, 1991). Temperatura do ar, umidade relativa e teor em água do produto armazenado estão estreitamente ligados por uma relação de interdependência. O teor em água do produto armazenado e a umidade relativa do ar ambiente no armazém tentam encontrar um estado de equilíbrio. Dependendo da umidade relativa prevalecente, o produto armazenado libera umidade à atmosfera (secagem) ou absorve umidade da atmosfera (umedecimento) até alcançar um estado de equilíbrio (GWINNER, RÜDIGER e MÜCK, 1997).

No armazenamento, além do metabolismo do próprio grão, há o de organismos associados, principalmente fungos, cujos principais danos causados são mudanças de coloração, desgaste de reservas nutritivas, alterações na estrutura dos carboidratos, lipídeos, proteínas e vitaminas, produção de toxinas, aquecimento, exalação de odores desagradáveis e presença dos próprios microrganismos, com redução da capacidade germinativa e de vigor (GWINNER, RÜDIGER e MÜCK, 1997).

Os principais contaminantes fúngicos, com ocorrência em ecossistemas de armazenamento de grãos, tendo em vista os potenciais de contaminação, deterioração e desenvolvimento de toxinas, pertencem aos gêneros *Aspergillus*, *Fusarium* e *Penicillium* (HOSENEY, 1991; GWINNER, RÜDIGER e MÜCK, 1997; ELIAS, 1998).

Os danos ocasionados por fungos são muitas vezes desconsiderados até que alcancem proporções alarmantes. Os fungos não ocasionam só perdas diretas, senão que podem ameaçar também a saúde do homem e dos animais produzindo venenos, as chamadas micotoxinas, as quais contaminam os alimentos e as forragens (HOSENEY, 1991; GWINNER, RÜDIGER e MÜCK, 1997).

A maioria das espécies de fungos se desenvolve com umidade relativa acima de 70%. Algumas espécies de *Aspergillus*, que são os mais resistentes dentre os fungos de armazenamento, se desenvolvem com umidade relativa de 65% ou até menos. A 27°C e conteúdo de umidade entre 12,5 e 13,5%, o arroz está altamente suscetível a ter infestações com fungos (ELIAS et al., 1996).

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Matéria-prima

A matéria-prima utilizada foi arroz em casca (*Oryza sativa L.*), da variedade Olimar (safra 2011), proveniente da indústria de arroz Ceolin & Cia Ltda, localizada no município de Bagé – RS.

5.2. Equipamentos

Para realizar a caracterização da secagem do arroz e a secagem para posterior beneficiamento do mesmo, simulando assim, as condições utilizadas no engenho foi utilizado um secador industrial descontínuo (Figura 7) de bandejas, com escoamento de ar perpendicular ao leito de sólidos.

Figura 7- Secador industrial descontínuo.



Fonte: www.intecnial.com.br/?im=descProd&produto=2&item=10&ln=pt-BR.

A determinação da produção do arroz em casca, após a secagem, foi realizada em uma unidade de beneficiamento em escala piloto (Figura 8).

Figura 8 - Unidade de beneficiamento em escala piloto.



Fonte: www.zaccaria.com.br/site/?end=arroz&c=5&l=por.

5.3. Procedimento experimental de secagem

Os experimentos de secagem foram realizados na indústria de arroz Ceolin & Cia Ltda situada no município de Bagé – RS.

5.3.1. Secagem em secador descontínuo para caracterização da secagem

Foi utilizado arroz em casca proveniente dos silos (14%, base úmida), no qual foram colocados em bandejas de tela perfurada de aço inox com capacidade mínima por bandejas de 400 g, sendo as amostras posteriormente inseridas no secador. Foi utilizado um secador descontínuo com fluxo de ar perpendicular a amostra. As temperaturas do ar de secagem utilizadas foram de 50, 60 e 70°C. A umidade de equilíbrio das amostras foi obtida pelo método dinâmico, até as amostras obterem peso constante, cujos valores (umidades finais) obtidos foram utilizados para os ajustes dos dados experimentais

A monitoração dos ensaios experimentais foi efetuada através da determinação da variação de massa das amostras com o tempo, inicialmente em intervalos de 3 min até que a variação de peso fosse menor que 1 g, atingida esta condição, o tempo passa para 5 min, em seguida para 10 min e assim sucessivamente até a obtenção de peso constante. Sendo a reprodutibilidade dos dados verificado por meio de réplicas.

A caracterização da secagem foi realizada através da análise das curvas de secagem que foram obtidas com os dados experimentais da massa do material.

5.3.2. Secagem em secador descontínuo

Foram utilizadas amostras de grãos inteiros, íntegros e com casca, no qual estavam estocadas nos silos e que já passaram por uma pré-secagem até atingirem uma umidade na faixa de 14%, no qual foram colocadas nas bandejas de aço inox, sendo posteriormente as amostras inseridas no secador. Foi utilizado um secador industrial descontínuo de bandejas, com

escoamento de ar perpendicular ao leito de sólidos. As temperaturas do ar de secagem foram de 50, 60 e 70°C e a carga de sólidos na bandeja foram de 400 g. As amostras foram retiradas do secador em intervalos de tempo, para controle da umidade, até chegarem a uma umidade na faixa de 11% (faixa de umidade ideal para a estocagem segura das sementes).

5.3.3. Determinação de grão inteiro (rendimento)

Após a secagem do arroz, são pesadas 100 g da amostra que posteriormente são colocadas na unidade de beneficiamento (escala piloto). Ali o arroz é descascado, brunido e polido. Então, retira-se o produto que é pesado novamente. Feito isso, o arroz volta para a unidade de beneficiamento de grãos, onde é colocado no trieur (acessório deste equipamento que por finalidade separar o grão inteiro do grão quebrado) e permanece por 30 s, sendo posteriormente pesada, dando a percentagem de grão inteiro da amostra.

O resultado obtido neste equipamento retrata fielmente o rendimento que o arroz vai proporcionar ao ser beneficiado.

5.4. Metodologia de cálculos

As equações semi-empíricas foram utilizadas na análise da secagem, buscando uma forma de representar a cinética de secagem de grãos que melhor se ajuste aos dados experimentais.

A Tabela 5 apresenta as equações de secagem semi-empíricas que foram utilizadas.

Tabela 5 - Equações semi-empíricas para secagem de grãos.

Nome	Equação
Lewis	$(X-X_e)/(X_0-X_e) = \exp (-Kt)$
Henderson e Pabis	$(X-X_e)/(X_0-X_e) = C.\exp (-Kt)$
Page	$(X-X_e)/(X_0-X_e) = \exp (-Kt^n)$
Overhults	$(X-X_e)/(X_0-X_e) = \exp [(-Kt)^n]$

Fonte:BARROZO et al., (1998).

onde $[(X-X_e)/(X_0-X_e)]$ é o adimensional de água livre do material, X é a umidade do material ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$), X_e é a umidade de equilíbrio ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$), X_0 é a umidade inicial ($\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$), o parâmetro K é conhecido como constante de secagem (s^{-1}), t é o tempo (s), n é o parâmetro de ajuste e o C constante do modelo.

Os valores da constante de secagem (K) para os experimentos realizados foram obtidos a partir das curvas do adimensional de água livre $[(X-X_e)/(X_0-X_e)]$ em função do tempo pelo uso das Equações que melhor ajustaram os dados experimentais (Tabela 5).

Para o ajuste dos dados experimentais de secagem foram feitas regressões não-lineares, usando o método Quasi-Newton do software *Statistica for Windows 6.0* (Statsoft, EUA).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todas as amostras utilizadas estavam estocadas em silo, no qual já haviam passado por uma pré-secagem partindo de uma unidade inicial de 14%.

Os experimentos de secagem de arroz foram realizados em diferentes dias.

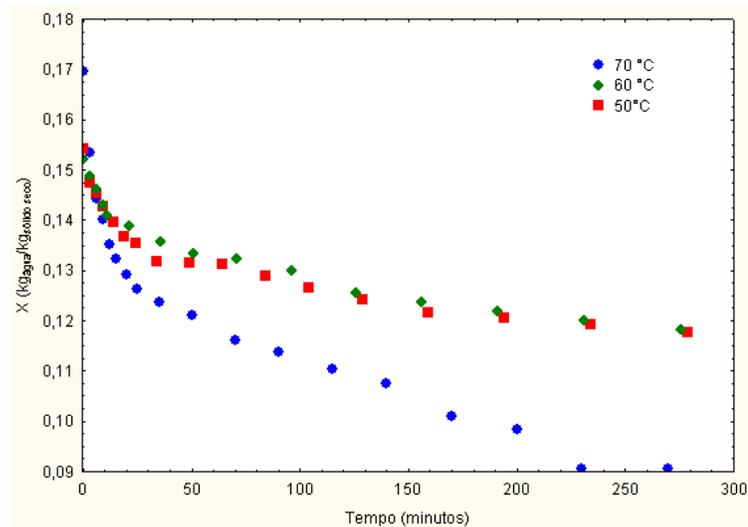
6.1. Caracterização da secagem

Os resultados da caracterização da secagem de arroz em no secador descontínuo de bandejas estão apresentados abaixo.

As Figuras 9, 10, 11 e 12 apresentam os dados da caracterização da secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70°C. Observa-se nestas Figuras que a secagem de arroz ocorreu no período de taxa decrescente apresentando transição. Os valores de umidade de transição foram de 0,135, 0,140 e 0,123 $\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{sólido seco}}$, e os tempo de secagem foram de 329, 276 e 270 min, para as temperaturas de 50, 60 e 70°C, respectivamente. Observa-se que não ocorreu o período de taxa

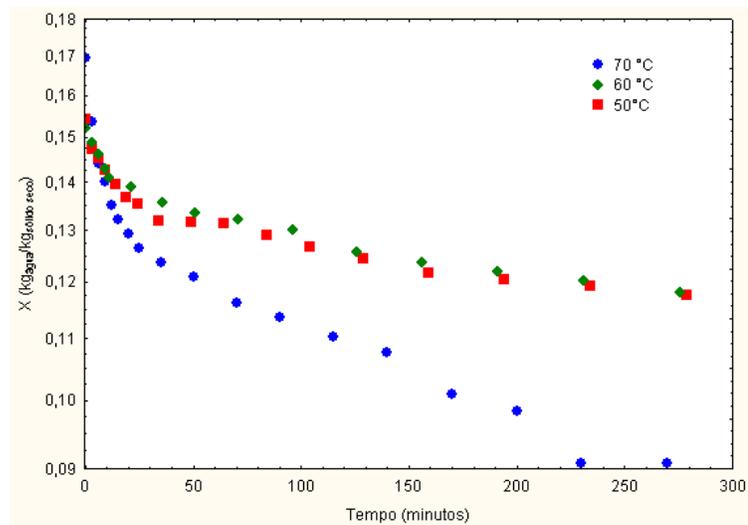
constante de secagem, devido ao material em estudo, apresentou baixa umidade inicial (aproximadamente 14% em base úmida).

Figura 9 - Umidade em função do tempo.



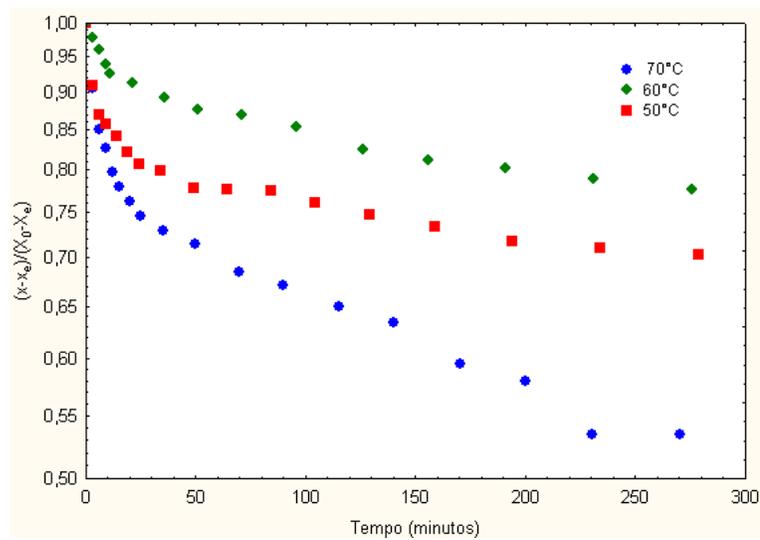
Fonte: Dados experimentais.

Figura 10 - Umidade em função do tempo, em escala semi-log.



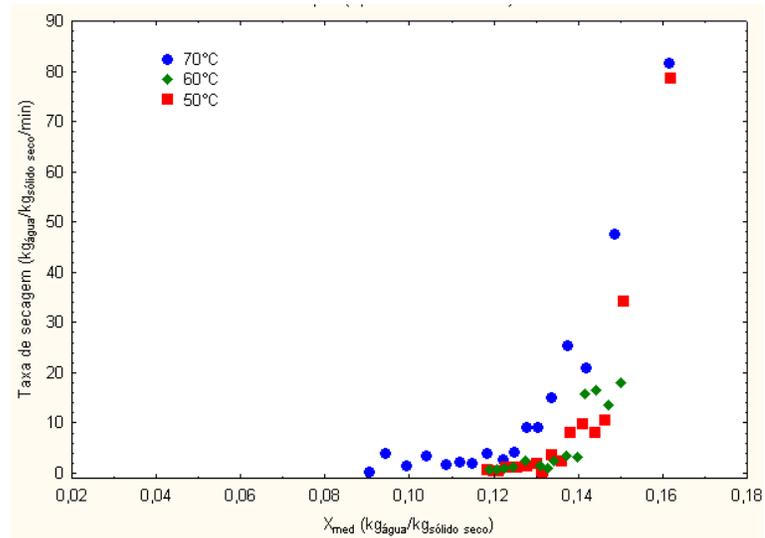
Fonte: Dados experimentais.

Figura 11 - Adimensional de umidade em função do tempo.



Fonte: Dados experimentais.

Figura 12 - Taxa de secagem em função da umidade média.



Fonte: Dados experimentais.

Após o segundo período de taxa decrescente, a umidade do material alcança as condições de equilíbrio. As curvas obtidas estão de acordo com o descrito na literatura (PARK, 1992), na qual relata que o período de taxa decrescente é quase sempre o único observado para a secagem de produtos agrícolas e alimentícios.

Na primeira fase do período de taxa decrescente, os principais mecanismos de transporte que ocorrem são escoamento capilar, difusão de líquido e difusão de vapor, podendo acontecer transporte por diversos mecanismos simultaneamente. Na segunda fase deste período a difusão de vapor é o mecanismo predominante de transporte de umidade (TOBINAGA e PINTO, 1992).

Conforme foi verificado neste trabalho pelas curvas a taxa de secagem acentua-se com o aumento da temperatura, concordando com a literatura referente a este tema de investigação (RESENDE, FERREIRA e ALMEIDA, 2010).

As umidades de equilíbrio alcançadas pelo método dinâmico, até atingir peso constante, foram os valores 0,12, 0,11 e 0,09 $kg_{água}/kg_{sólido\ seco}$ (b.s.) nas temperaturas de 50, 60 e 70°C, respectivamente.

Verificou-se que a maior temperatura de secagem (70°C), foi a que apresentou menor tempo de secagem.

Devido os experimentos terem sido realizados em dias distintos, no qual as condições climáticas como (T e UR) eram diferentes, influenciando o comportamento das curvas de secagem.

Em determinadas épocas, as condições do ar proporcionam umedecimento do arroz o que explica as flutuações da umidade no material durante todo o experimento conforme se pode verificar nas Figuras 9, 10, 11 e 12 (LEHN e PINTO, 2004).

6.1.1. Modelos empíricos

A Tabela 6 mostra os resultados do ajuste dos dados experimentais da secagem de arroz aos modelos semi-empíricos (Tabela 5).

Conhecidas as condições do ar, pode-se determinar os valores de umidade de equilíbrio correspondentes, utilizando-se das equações apresentadas abaixo. Com estes, são calculados os valores de adimensional de água livre $[(X-X_e)/(X_0-X_e)]$, conforme apresentado na Figura 11 para sementes. Estes valores foram utilizados para ajuste das equações semi-empíricas mostrada na Tabela 5, por análise de regressão.

Tabela 6 - Resultados estatísticos obtidos dos modelos de secagem de arroz.

Equação	Temperatura (°C)	Parâmetros			
		K (min ⁻¹)	N	C	R ²
Page	50	0,2435±0,0081	0,4286±0,0007	-	0,9956
	60	0,1150±0,0729	0,5562±0,1440	-	0,9857
	70	0,1787±0,0393	0,4933±0,0100	-	0,9905
Lewis	50	0,0413±0,0021	-	-	0,8540
	60	0,0170±0,0029	-	-	0,8811

	70	0,0352±0,0127	-	-	0,8832
	50	0,0371±0,0031	0,4286±0,0007	-	0,9956
Overhults	60	0,0172±0,0030	0,5562±0,1440	-	0,9857
	70	0,0309±0,0114	0,4933±0,0100	-	0,9905
	50	0,0180±0,0023	-	0,7126±0,0089	0,9301
Henderson	60	0,0110±0,0011	-	0,8053±0,0932	0,9636
Pabis	70	0,0196±0,0095	-	0,7626±0,0170	0,9428

Fonte: Dados experimentais.

*Valores médios ± erro padrão (N=2)

Através dos resultados obtidos após o ajuste dos dados experimentais, podemos dizer que a equação de Page e Overhults foram as que apresentaram melhor ajuste ($R^2 > 0,98$) aos dados experimentais de secagem, estando de acordo com os resultados encontrados por diversos autores para diferentes produtos agrícolas (IGUAZ et al., 2003; CORRÊA et al., 2007). Estes valores também estão de acordo com os resultados apresentados por Madamba, Driscoli e Buckle (1996), na secagem de cereais indicando uma representação satisfatória da operação de secagem.

Baseado nos resultados dos ensaios experimentais de secagem pode-se observar que a umidade relativa do ar também exerceu um efeito sobre a constante de secagem (K), sendo isso um dos fatores da variação dos resultados.

6.2. Rendimento

Na Tabela 7 estão representados os dados obtidos após o beneficiamento, onde o arroz foi descascado, brunido, polido e classificado.

Tabela 7 - Valores obtidos após o beneficiamento do arroz.

Temperatura	Arroz Descascado	Arroz Inteiro	Arroz Quebrado	Tempo de Secagem
--------------------	-------------------------	----------------------	-----------------------	-------------------------

	(°C)	(%)	(%)	(%)	(min)
50		68,9	58,6	10,3	70
60		68,9	62,3	6,7	42
70		71,3	62,3	9,0	35

Fonte: Dados experimentais.

Após a passagem do arroz pela unidade de beneficiamento verifica-se que o peso do arroz que inicialmente era de 100 g, é reduzido para a faixa de 68 a 70 g, pois das 100 g colocadas anteriormente, em torno de 22 g são cascas e 8 g são farelo.

De acordo com a tabela acima, podemos observar que em todas as temperaturas obtiveram um bom resultado de rendimento, sendo que a temperatura de 60°C foi a que apresentou o melhor rendimento, devido ao menor número de grãos quebrados. De acordo com Belladonna (2008) o arroz é considerado bom a partir de 57% de grão inteiro.

Pode-se observar que com o aumento da temperatura do ar de secagem faz com que haja uma maior taxa de remoção de água do grão devido a um maior gradiente de umidade entre o grão e o ar, decrescendo o tempo necessário para reduzir o teor de água até o valor desejado.

Pode-se observar também que uma temperatura elevada de secagem, se tem um maior número de grãos quebrados, pois o aumento da temperatura produz fissuras nos grãos, sendo a extensão desses danos dependentes da interação entre temperatura, tempo de exposição e grau de umidade inicial das sementes.

Também pode-se observar um maior numero de grãos quebrados na menor temperatura, isto ocorre devido a longa exposição do grão com o ar de secagem (temperatura com maior tempo de secagem).

7. CONCLUSÃO

A secagem de arroz em um secador descontínuo de bandejas ocorreu no primeiro e segundo período de taxa decrescente com umidade de transição de 0,135, 0,140 e 0,123 kg_{água}/kg_{sólido seco}.

As umidades de equilíbrio obtidas pelo método dinâmico foram de 0,12, 0,11, 0,09 kg_{água}/kg_{sólido seco} (b.s.) , nas temperaturas 50, 60 e 70°C, respectivamente.

Através do ajuste experimental dos dados, os modelos de Page e Overhults foram os que apresentaram um melhor ajuste aos dados ($R^2 > 0,98$).

Após o beneficiamento pode-se observar que a temperatura de 60°C foi a que apresentou melhor rendimento, devido a maior porcentagem de grãos inteiros.

Conclui-se que na secagem do arroz em um secador descontínuo, com posterior beneficiamento dos grãos, os melhores valores obtidos, conforme os resultados mostraram, foi na temperatura de 60°C.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar o tempo de operação, consumo energético, e rendimento de inteiros em grãos de arroz secados pelo método intermitente em silo secador;
- Realizar análise de distribuição granulométrica do material particulado proveniente dos procedimentos do beneficiamento de arroz;
- Estudar a secagem de arroz na colheita, avaliando diferentes variedades com diferentes teores de umidades;
- Realizar o estudo das isotermas de dessorção e adsorção, para avaliar o comportamento do grão na secagem e armazenagem;
- Avaliar o controle de qualidade desde a colheita até o beneficiamento;
- Avaliar as alterações físicas que ocorrem no arroz durante o processo de secagem;
- Estudar o desenvolvimento de micotoxinas no arroz armazenado nos silos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALA, B.K.; WOODS, J.L. Thin layer drying models for malts. **Journal Food Engineering**, 16, 239-149, 1992.

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

BARBOSA, F.F.; FAGUNDES, C.A.A.; ELIAS, M.C. **Secagem estacionária e intermitente de grãos de arroz**. Disponível em: <<http://www.milweb.com.br/sistemas/arquivos/Arroz1.pdf>>. Acesso em: 09 agosto 2011.

BARROZO, M. A. de S.; SARTORI, D. J. M.; FREIRE, J. T. Transferência de calor e massa em leito deslizante e escoamentos cruzados. Secagem de sementes de soja. In: FREIRE, J. T.; SILVEIRA, A. M. **Tópicos especiais em sistemas particulados**. São Carlos: UFSCar 1998, cap. 4, p. 119-159.

BELLADONA, J.A.A. **Assistência Técnica, Recebimento, Secagem, Armazenamento e Beneficiamento de Arroz Irrigado (*Oryza sativa*)**. Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Uruguaiana, 2008.

BOBBIO, F.O.; BOBBIO, P.A. **Introdução à química de alimentos**. São Paulo: Varela, 2001.

BOEMEKE, S.L. **Desempenho energético e qualidade de grãos nas secagens estacionária e intermitente de arroz**. Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Pelotas. 76p, 2000.

BRASIL. Ministério da Agricultura, do Abastecimento e da Reforma Agrária. Secretaria Nacional da Defesa Agropecuária. **Regras para análise de sementes**. Brasília, DF, 1992. 365p.

BROD, F. P. R., ALONSO, L. F. T. e PARK, K. J., 1999, “**Secagem de Produtos Agrícolas**”. XI SEMEAGRI - *Semana de Engenharia Agrícola da UNICAMP*. Campinas: Agrológica–Empresa Júnior de Engenharia Agrícola. a. 122 p.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARTEM, A.; F.W.; HALL, C.W. **Drying cereal grains**. Westport, AVI Publishing, 1974. 265p.

CAMACHO, D.G.; BARROS, A.C.S.A.; PESKE, S.T.; MENEZES, N.L. A secagem de sementes. **Ciência Rural**, v.34, n.2. Santa Maria, 2004.

CARVALHO, N.M. **A secagem de sementes**. Jaboticabal: FUNEP, 1994. 165 p.

CAVALCANTE, J.A. **Análise experimental da cinética de secagem da alga marinha *Sargassum sp.*** Campinas: Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, 169 P. 2003. Tese de Doutorado.

CAVARIANI, C. **Secagem estacionária de sementes de milho com distribuição radial do fluxo de ar**. 1996. 85f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Esalq – USP.

CAVARIANI, C.; SILVA, W.R.; MIRANDA, L.C.; NACAGAWA, J.; BELGIORNO, D.C. Secagem estacionária de sementes de milho com distribuição radial do fluxo do ar. II – Andamento físico. **Revista Brasileira de Sementes**. Brasília, v.21, nº 1, p. 7-17, 1999.

CELESTINO, S.M.C. **Princípios de secagem de alimentos**. Embrapa Cerrados. Planaltina, 2010. Disponível em: <www.cpac.embrapa.br/download/1735/t>. Acesso em: 09 agosto 2011.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Conab). Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/>>. Acesso em: 10 julho 2011.

CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A. P.; GONELI, A. L. D.; BOTELHO, F. M. **Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, 27(2), p. 501-510, 2007.

CHIRIFE, J. Fundamentals of the drying mechanism during air dehydration of foods. In: MUJUMDAR, A. **Advances in drying**. Washington/ New York/ London. Ed. Hemisphere Publishing Corporation, v.3, p.73-102, 1983.

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. Inglaterra, 2ed. Claredon Press, Oxford, 1975. 414p.

CRUZ, A.C. **Desidratação de alimentos**. 2 ed. São Paulo: Globo, 1990. 207 p.

DIAS, A. R. G. **Efeitos dos teores de umidade de colheita e de beneficiamento no desempenho industrial de cinco variedades de arroz (*Oryza sativa L.*)**. Pelotas, 1992. 86 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial) - Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”, Universidade Federal de Pelotas, 1993.

ELIAS, M.C. **Efeitos da espera para secagem e do tempo de armazenamento na qualidade das sementes e grãos do arroz irrigado**. 1998. 164 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Sementes) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Pelotas, 1998.

ELIAS, M. C.; BARBOSA, F. F.; LOECK, A. E.; GRUTZMACHER, D. D. **Recomendações técnicas para colheita, secagem, armazenamento e industrialização de arroz para o sul do Brasil**. Ed. UFPel, Pelotas, RS. 1-18. 2000.

ELIAS, M.C.; ROMBALDI, V.C.; SILVA, J.A.; NORA, L.; DIAS, A.R.G. **Secagem e armazenamento de grãos: Sistemas, métodos e processos**. Pelotas, 1996. Pólo de Modernização Tecnológica em Alimentos da Região Sul. Departamento de Ciência e Tecnologia Agroindustrial, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 1996. 41p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIO (EMBRAPA). **Agência de Informação Embrapa**. Disponível em: www.agencia.cnptia.embrapa.br. Acesso em: 13 dezembro 2011.

FENNEMA, O.R. **Química de los alimentos**, 2ª ed. Editorial Acribia, 1993. 549p.

FOUST, A.S.; WENZEL, L.A.; CLUMP, C.W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L.B. **Princípios das Operações Unitárias**. Rio de Janeiro: LTC, 1983. 2ª ed.

GAVA, A.J.; SILVA, C.A.B.; FRIAS, J.R.G. **Tecnologia de Alimentos: princípios e aplicações**. Ed. Nobel. 2009. 509p.

GEANKOPLIS, C. **Transport and Unit Operations**. 2nd Ed. Prentice-Hall International Inc. New Jersey, USA, 1983. 921p.

GWINNER, J.; RÜDIGER, H.; MÜCK, O. **Manual sobre prevenção das perdas de grãos no pós-colheita**. Projeto de proteção dos produtos armazenados do Ministério Federal da Cooperação Econômica e de Desenvolvimento (BMZ) da República Federal da Alemanha. Deutsche Gesellschaft für, 1997.

HARRINGTON, J.F. Seed storage and longevity. **Seed Science & Technologie**, v.1, n.2, p. 453-61, 1973.

HOSENEY, R.C. **Princípios de ciencia y tecnología de los cereales**. Editoria Acribia, S.A.. Zaragoza. España, 1991. 320p.

HOUSTON, D.F. **Rice chemistry and technology**. Saint Paul, Minnesota, A.A.C.C., 1972. 517p.

IGUAZ, A.; SAN MARTIN, M.B.; MATÉ, J.I.; FERNANDEZ, T.; VÍRSEDA, P. **Modeling effective moisture diffusivity of rough rice (Lido cultivar) at low drying temperatus**. *Jornal of Food Engineering*, v.59, n. 2, p. 253-258, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Levantamento sistemático da produção agrícola**. 2011. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1798&id_pagina=1>. Acesso em: 08 agosto 2011.

INSTITUTO RIOGRANDENSE DO ARROZ (IRGA). **Campanha de Incentivo ao Consumo de Arroz**. 2011. Disponível em: <<http://200.96.107.174/coma-arroz/paginas/acampanha.php>>. Acesso em: 06 dezembro 2011.

INTECNIAL S/A. Secadores. Disponível em: <<http://www.intecnial.com.br/?im=descProd&produto=2&item=10&ln=pt-BR>>. Acesso em: 08.12.2011

JULIANO, B.O.; BECHTEL, D.B. The rice grain and its gross composition. In: JULIANO, B.O. (Ed.). **Rice: chemistry and technology**. Minnesota, USA: American Association of Cereal Chemists, 1985. Cap.2, p.17-57.

KARATHANOS, V. T.; BELESSIOTIS, V. G. Application of thin-layer equation to drying data of fresh and semi-dried fruits. **Journal Agriculture Engineering Research**, 74, 355-361, 1999.

KAYMAK, F.E.; GEDIK, A. **Sorption isotherms and isosteric heat of sorption for grapes, apricots, apples and potatoes**. LWT – Food Science and Technology, 37(4), 429-438, 2004.

LASSERAN, J.S. Princípios gerais de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem – CETREINAR, n.3, p.17-46, 1978.

LEHN, D.N.; PINTO, L.A. Isotermas de equilíbrio e curvas de secagem para arroz em casca em silos de armazenagem. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.12, n.3, 177-191, Jul./Set., 2004. Fundação Universidade Federal do Rio Grande.

LEWIS, W.K. **The rate of Drying of Solid Material**. Ind. Eng. Chem., v.13, p.427, 1921.

LUZ, C.A.S. **Secagem de sementes de arroz em secador intermitente lento**. Pelotas, RS. 1986.103p. Dissertação de Mestrado.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The Thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v. 29, n. 01, p. 75-97, 1996.

MAIA, M. **Secagem de sementes de azevém anual (*Lolium multiflorum Lam.*) com ar ambiente forçado**. 1995. 108 f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Sementes) – Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 1995.

MAYTA, S.M.A.; MASSARANI, G.; PINTO, J.C. Modeling of grain drying in continuous crossflow sliding bed dryers. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v.74, 1996.

MIRANDA, L.C.; SILVA, W.R.; CAVARIANI, C. Secagem de sementes de soja em silo com distribuição radial do fluxo de ar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, n.11, p.2097-2108. Brasília, 1999.

MORAES, M.L.B de. **Comportamento da pressão estática e da frente de secagem em uma coluna de sementes de arroz**. 2000. 50f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Sementes) – UFPel.

MÜLLER, M.M. **Comportamento hidrotérmico do arroz na operação de encharcamento para parboilização**. Pelotas: Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, UFPEL, 1999. 31p. (Dissertação, Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial).

MCCOMICK, P.Y.; PORTER, H.F.; LUCAS, R.L.; WELLS, D.F. Solids drying fundamentals. In: PERRY, R.H. And CHILTON, C.H. **Chemical engineer's handbook**. McGraw Hill Book Company, 5.ed., section 20:1-16, 1983.

MCLEAN, K.A. **Drying and combinable crops**. Ipswich: Farming, 1980. 280p.

MHIMID, A.; NASRALLAH, S.; FOHR, J.P. Heat and mass transfer during drying of granular products-simulation with convective and conductive boundary conditions. **International Journal of Heat and Mass Transfer** 43, p. 2779-2791, 2000.

NESS, A.R.R. **Qualidade do arroz em casca, seco e armazenado em silos metálicos com aeração controlada**. 1998. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 1998.

OLIVEIRA, E.G. **Secagem convectiva da microalga *Spirulina platensis*: avaliação das propriedades físicas e bioquímicas**. p.28-29. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Fundação Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2010.

ORDÓÑEZ, J. A.; RODRÍGUES, M.I.C; ALVAREZ, L.F.; SANZ, M.L.G.; MIGUIGUILLÓN, G.D.G.F.; PERALES, L.I.H. **Tecnologia de alimentos: componentes dos alimentos e processos**. Porto Alegre: Artmed, V.1, 2005.

PARTI, M.; DUGMANICS, I. **Diffusion coefficient for corn drying**. Transactions of the ASAE, 31(1), 279-283, 1990.

PARK, K.J., NOGUEIRA, R.I. Modelos de ajuste de isotermas de sorção de alimentos. In: **Engenharia Rural**, Piracicaba: ESALQ/USP, 1992. v. 3, n. 1, p.81-86.

PEDROSO, B.A. **Arroz irrigado**: obtenção e manejo de cultivares. Porto Alegre: Sagra, 1982. 175p.

PEREIRA, J. A. M.; QUEIROZ, D. M. **Higroscopia**. Apostila – CENTREINAR, Viçosa – MG, 1987.

PERRY, R.H., CHILTON, G.H. **Manual de Engenharia Química**. 5ª Ed. Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980.

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

PEZZUTI, A.; CRAPISTE, G.H. Sorptional equilibrium and drying characteristic of garlic. **Journal of Food Engineering**, 29, 75-79, 1997.

PINTO, L. A. A. **Cinética de secagem de filés de peixe: uso de um modelo difusivo com variação de volume**. UFSCar, São Carlos, SP, 1996. 154p. Tese de Doutorado.

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

RANGEL, M.A.S.; ZIMMER, G.J.; VILLELA, F.A. Secagem estacionária de sementes de arroz com ar ambiente. **Revista Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.32, nº 10, p. 1081- 1090, 1997.

RESENDE, O.; FERREIRA, L.U.; ALMEIDA, D.P. **Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*)**. Revista Brasileira de produtos Agroindustriais, Campinas Grande, v.12,n.2, p 174, 2010.

RIBEIRO, E.P.; SERAVALLI, E.A.G. **Química de Alimentos**. 2ª Edição. Ed. Edgard Blücher LTDA, 2007. 184p.

ROMBALDI, C.V. **Condições de secagem e tempo de armazenamento na qualidade industrial do arroz (*Oryza sativa L.*)**. 1988. 124f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial) - Faculdade de Agronomia "Eliseu Maciel", Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

RUIZ, A.W.; NESS, A.R. Qualidade do arroz em casca seco e armazenado em mini silos metálicos em aeração controlada. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.9, n.1, p.35-54, 2001.

SARAVIA, C.T.; PERES, W.B.; RISSO, J. Manejo da temperatura do ar na secagem intermitente de sementes de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Sementes**, v.29, n.2, 2007.

SILVA, C.K.F. **Aplicação da análise inversa ao modelo difusional de transferência de massa**. 2007. 102f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - Paraíba.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DO ARROZ NO ESTADO DE SANTA CATARINA (SindArroz). Disponível em: <<http://www.sindarroz.sc.com.br/arrozparboilizado.htm>>. Acesso em: 08 julho 2011.

SHERWOOD, T.K. **The drying of solids (I)**. Industrial and Engineering Chemistry, v.21, n.1, p.12-16, 1929.

TAVARES, A.F.S.; ELIAS, M.C.; ROMBALDI, C.V.; NORA, L. **Grau de polimento e propriedades funcionais do arroz**. Revista da Sociedade Brasileira de Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 8, n.16, 1998. p.1871-4.

TOBINAGA, S.; PINTO, L.A.A. Secagem de matérias fibrosos: músculos de peixes. IN: FREIRE & SARTORI: **Tópicos especiais em secagem**, vol.1. Ed. São Carlos - Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, p.211-251. 1992.

TOLEDO, F.F.; FILHO, J.M. **Manual das sementes**: tecnologia da produção. São Paulo, Agronômica Ceres, 1977. 224p

TRAVAGLINI, D. A., NETO, M. P., BLEINROTH, E. W., et al., 1993, “**Banana-Passa**: Princípios de Secagem, Conservação e Produção Industrial”, Campinas: ITAL, 73p.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL (UFRGS). **Terra de arroz**. Disponível em: <www.ufrgs.br/alimentus/terradearroz/grao/gr_divisao.htm>. Acesso em: 10 agosto 2011.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA (UFSM). **Secagem de sementes**. Disponível em: <<http://www.ufsm.br/sementes/textos/secagem>>. Acesso em: 10 agosto 2011.

VILLELA, F.A. **Efeitos da secagem intermitente sobre a qualidade de sementes de milho**. 1991. 104f. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Esalq –USP.

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

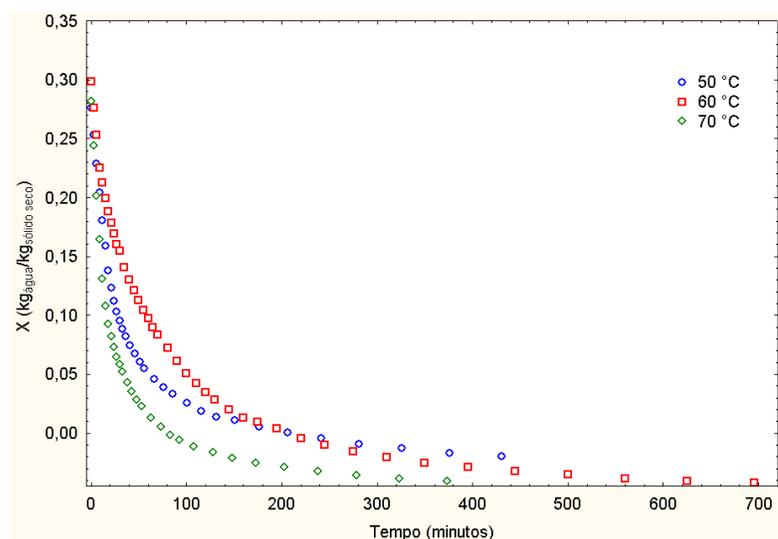
VILLELA, F.A.; SILVA, W.R. Curvas de secagem de sementes de milho utilizando o método intermitente. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.49, n.1, p.145-153, 1992.

ZACCARIA. Máquinas para Beneficiamento de Arroz, Milho e Outros Cereais. Disponível em: <<http://www.zaccaria.com.br/site/?end=arroz&c=5&l=por>>. Acesso em: 08.12.2011

APÊNDICE

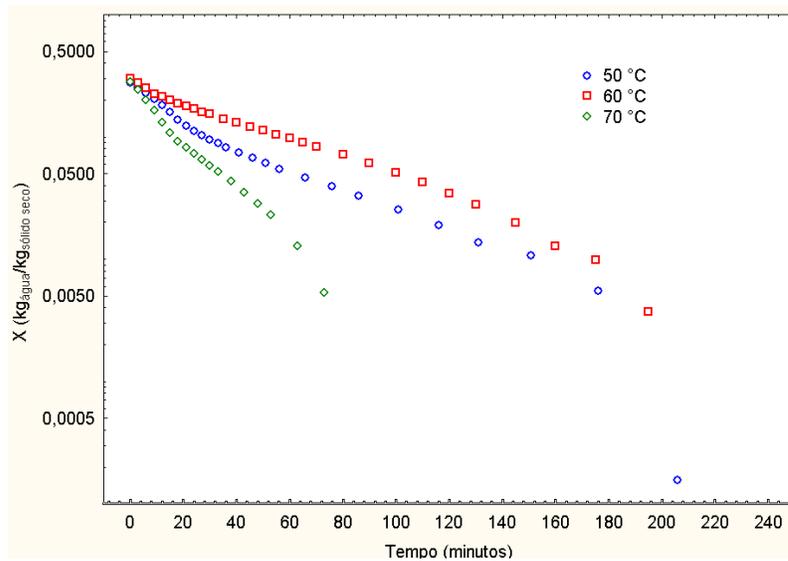
APÊNDICE A - Resultados dos ensaios da secagem de arroz reumidificado, em estufa com ar de secagem paralelo a amostra, nas temperaturas de 50, 60, 70°C.

Figura A1 - Umidade em função do tempo.



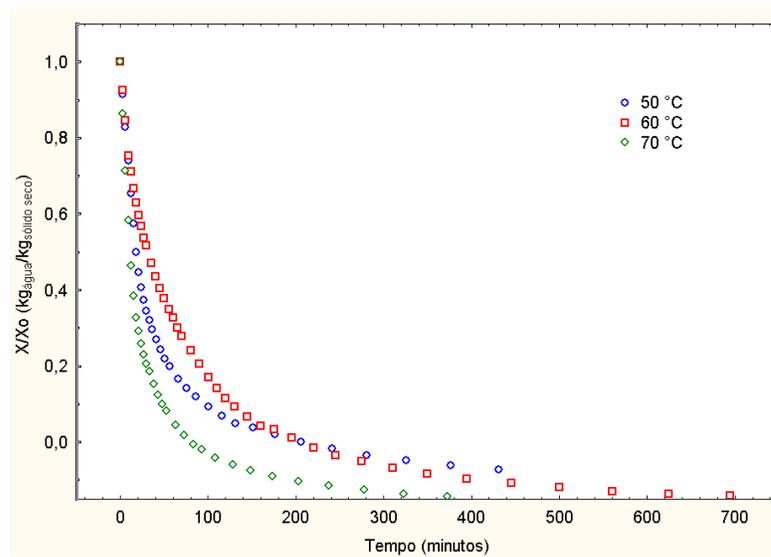
Fonte: Dados experimentais.

Figura A2 - Umidade em função do tempo, em escala semi-log.



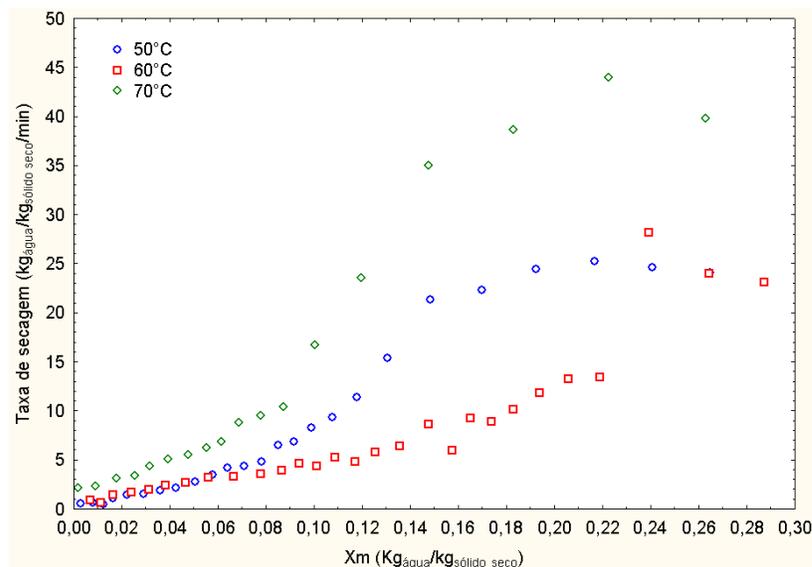
Fonte: Dados experimentais.

Figura A3 - Adimensional de umidade em função do tempo.



Fonte: Dados experimentais.

Figura A4 - Taxa de secagem em função da umidade média.



Fonte: Dados experimentais.

Tabela A1 - Valores obtidos de testes preliminares, da secagem do arroz reumidificado em secador industrial descontínuo, nas temperaturas de 50, 60 e 70°C, com posterior beneficiamento, para análise do rendimento.

	Temperatura (°C)	Arroz Total (g)	Arroz Descascado (%)	Arroz Inteiro (%)	Arroz Quebrado (%)	Tempo de Secagem (min)
Amostra 1	50	100	66,8	32,6	34,2	150
	60	100	68,6	45,4	23,2	110
	70	100	68,6	44,9	23,7	50
Amostra 2	50	100	69,2	46,3	22,9	138
	60	100	68,5	42,1	26,4	80
	70	100	51,9	37,8	14,1	62

Fonte: Dados experimentais.