

**Modelagem Matemática do Resfriamento de Grãos de Soja
em Silos com Aeração utilizando o Modelo do Reator Ideal
Homogêneo Modificado**

Por

Marsoé Cristina Dahlke

Dissertação de Mestrado

Ijuí, RS – Brasil
2006

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, ESTATÍSTICA E MATEMÁTICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA

**Modelagem Matemática do Resfriamento de Grãos de Soja em
Silos com Aeração utilizando o Modelo do Reator Ideal
Homogêneo Modificado**

por

MARSOÉ CRISTINA DAHLKE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUI), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Modelagem Matemática.

Ijuí, RS – Brasil

2006

UNIVERSIDADE REGIONAL DO NOROESTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL
DeFEM - DEPARTAMENTO DE FÍSICA, ESTATÍSTICA E MATEMÁTICA
DeTec - DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA

**Modelagem Matemática do Resfriamento de Grãos de Soja em Silos com
Aeração utilizando o Modelo do Reator Ideal Homogêneo Modificado**

Elaborada por

MARSOÉ CRISTINA DAHLKE

Como requisito para obtenção do grau de Mestre em Modelagem Matemática

Comissão Examinadora

Prof^a. Dr^a Fabiane Avena de Oliveira -DeFEM (Orientadora)

Prof. Dr.Oleg Khatchatourian –DeFEM(Co-Orientador)

Prof^a. Dr^a.Inês Farias Ferreira- UFSM

Prof. Dr. Pedro Augusto Pereira Borges- DeFEM

Ijuí, RS, 28 de Dezembro de 2006.

O coração do homem traça o seu caminho,
mas o Senhor lhe dirige os passos.

(Pv. 16,9)

AGRADECIMENTOS

A Deus, que nos orienta e nos protege em nossos projetos, está sempre nos iluminando para que sigamos o melhor caminho.

Obrigada, muito obrigada.

À minha família, principalmente aos meus avós Vivaldino e Maria (in memória), que sempre me apoiaram e me incentivaram para realização deste grande sonho, pelo carinho, compreensão e incentivo, vocês estão sempre comigo.

Aos meus colegas do mestrado, pelos momentos de alegria, pela ajuda e companheirismo que tive durante o curso.

Aos amigos em especial, Rubens, Joceliane, Veraci e Denise, pela atenção paciência e dedicação, VALEU!

Ao meu noivo Paulo Renato, que sempre compreendeu e ouviu as minhas preocupações, você é uma pessoa especial na minha vida, amo você.

A Prof^a.Dra^a Fabiane, minha orientadora, pela dedicação, disponibilidade e paciência com que sempre ouviu as minhas dúvidas, orientando-me para um melhor entendimento e realização deste trabalho de modo mais correto possível.

A Geni, que em todos os momentos que precisei de informações e esclarecimentos atendeu-me com muita paciência, atenção e carinho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
INTRODUÇÃO.....	15
1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
1.1 IMPORTÂNCIA DA SOJA.....	18
1.2 CUIDADOS COM A ARMAZENAGEM.....	18
1.2.1 Local de armazenamento.....	19
1.2.2 Processo respiratório.....	25
1.2.1 Principais objetivos da aeração.....	29
1.2.2 Componentes de um sistema de aeração.....	30
2 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	33
2.1 GEOMETRIA NA FORMA DE TRONCO DE PIRÂMIDE.....	36
2.2.1 Experimento 1.....	36
2.2.2 Experimento 2.....	39
3 MODELO MATEMÁTICO.....	41
3.1 MODELO REATOR IDEAL HOMOGÊNEO.....	41
3.2 EXPRESSÕES UTILIZADAS NA SIMULAÇÃO.....	43
3.2.1 Expressões para a área de cada seção do tubo.....	44
3.2.2 Expressões para o volume de cada camada do tubo.....	48
3.2.3 Expressões para a velocidade do ar em cada camada do tubo.....	49
3.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM OS DADOS EXPERIMENTAIS	51
4 MODELO REATOR IDEAL HOMOGÊNEO MODIFICADO.....	54

4.1	RESOLUÇÃO DO PROBLEMA INVERSO	54
4.2	GRÁFICO COM AS CURVAS $f(y)$ EM FUNÇÃO DE y	58
4.3	MÉTODO DA BISSECÇÃO	58
4.4	DADOS EXPERIMENTAIS X SIMULAÇÃO	59
	CONCLUSÕES	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Silo metálico da região Noroeste do Rio Grande do Sul	20
Figura 2: Esquema de um típico silo metálico de chapa ondulada e seus acessórios.....	21
Figura 3: Diferentes regiões formadas em um silo durante o processo de aeração.....	28
Figura 4: Equipamento utilizado para realização dos experimentos sobre o resfriamento da massa de grãos de soja (tronco de pirâmide).....	33
Figura 5: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes alturas da coluna de grãos e $v_I = 0,11m/s$ (tronco de pirâmide).....	37
Figura 6: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes alturas da coluna de grãos e $v_I = 0,13m/s$ (tronco de pirâmide).....	37
Figura 7: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes alturas da coluna de grãos e $v_I = 0,17m/s$ (tronco de pirâmide).....	38
Figura 8: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes alturas da coluna de grãos e $v_I = 0,19m/s$ (tronco de pirâmide).....	38
Figura 9: Temperatura adimensional do grão em função do tempo para altura de $x = 0,15m$ e velocidade $v = 0,15m/s$ e $v = 0,23m/s$	40
Figura 10: Tubo (tronco de pirâmide) utilizado para realização das simulações	44
Figura 11: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes secções do tubo e $v = 0,11m/s$. Simulação (linhas), dados experimentais (valores discretos)	51
Figura 12: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes secções do tubo e $v = 0,13m/s$. Simulação (linhas), dados experimentais (valores discretos).	52
Figura 13: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes secções do tubo e $v = 0,17m/s$. Simulação (linhas), dados experimentais (valores discretos).	52

- Figura 14: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes secções do tubo e $v = 0,19m/s$. Simulação (linhas), dados experimentais (valores discretos) 53
- Figura 15: Valores de $f(y)$ em função de y para diferentes velocidades do ar58
- Figura 16: Gráfico apresentando valores de y para as diferentes velocidades de aeração utilizadas neste trabalho e o ajuste dos dados por mínimos quadrados..... 59
- Figura 17: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes secções do tubo e $v = 0,11 m/s$. Simulação (linhas), dados experimentais (Valores discretos), com $y = 0,52$ 60
- Figura 18: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes secções do tubo e $v = 0,13 m/s$. Simulação (linhas), dados experimentais (Valores discretos), com $y = 0,62$ 60
- Figura 19: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes secções do tubo e $v = 0,17 m/s$. Simulação (linhas), dados experimentais (Valores discretos), com $y = 0,81$ 61
- Figura 20: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes secções do tubo e $v = 0,19 m/s$. Simulação (linhas), dados experimentais (Valores discretos), com $y = 0,89$ 61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Área plantada em hectares e quantidade colhida em toneladas, cultura da soja	18
Tabela 2:Mostra o teor de umidade e equilíbrio higroscópico da soja.....	23
Tabela 3:Vários teores de umidade e temperaturas usadas para armazenagem da soja no Brasil	25

LISTA DE SÍMBOLOS

ε , porosidade da massa de grãos $[0,39]$;

Q , vazão do ar que entra no tubo $[m^3 / s]$;

A , área superior do tubo (tronco de pirâmide) $[0,0396m^2]$;

A_0 , área inferior do tubo (tronco de pirâmide) $[0,0198m^2]$;

A_1 , área da primeira secção do tubo (tronco de pirâmide) $[m^2]$;

A' , área das laterais da primeira secção do tubo $[m^2]$;

A_2 , área da segunda secção do tubo (tronco de pirâmide) $[m^2]$;

A'' , área das laterais da segunda secção do tubo $[m^2]$;

A_{10} , área das laterais da n-ésima secção do tubo $[m^2]$;

A_n , área da n-ésima secção do tubo $[m^2]$;

A'_0 , área do orifício da placa $[0,001017m^2]$;

Δp_1 , variação de pressão mostrada no manômetro;

ρ , massa específica do fluído $[1,1614kg / m^3]$;

ρ_a , densidade do ar $[1,1614kg / m^3]$;

ρ_g , densidade do grão $[1350kg / m^3]$;

C , coeficiente da placa de orifício;

V_0 , volume de grãos no centro da primeira camada $[m^3]$;

V_1 , volume total de grãos da primeira camada $[m^3]$;

V_T , volume total de grãos correspondente a cada uma das camadas $[m^3]$;

V_n , volume total de grãos correspondente a n-ésima camada $[m^3]$;

v , velocidade de escoamento do fluído $[m / s]$;

v_0 , velocidade inicial de entrada de ar de aeração na base inferior do tubo $[m / s]$;

v_1 , velocidade do ar de aeração na primeira camada $[m / s]$;

v_n , velocidade do ar de aeração para a n-ésima camada $[m/s]$;

t , tempo considerado $[s]$;

T_a , temperatura ambiente $[^{\circ}C]$;

T_g , temperatura inicial do grão $[^{\circ}C]$;

T_m , temperatura média de equilíbrio do sistema ar-grão $[^{\circ}C]$;

Δx , altura de cada camada no tubo (tronco de pirâmide) $[m]$;

c_{pa} , calor específico do ar $[J/kg^{\circ}C]$;

c_g , calor específico do grão $[J/kg^{\circ}C]$;

$c_{p\varepsilon}$, calor específico do sistema grão-ar $[J/kg^{\circ}C]$;

m_a , massa do ar $[kg]$;

m_g , massa do grão $[kg]$;

I_a , entalpia do ar $[J/Kg]$;

I_g , entalpia do grão $[J/Kg]$;

I_m , entalpia do sistema ar-grão $[J/Kg]$;

H , altura do tubo (tronco de pirâmide) $[m]$;

a , razão entre área da base superior e área da base inferior do tubo;

α , ângulo do tubo $[^{\circ}]$;

x' , medida do segmento na primeira secção do tubo $[m]$;

x'' , medida do segmento na segunda secção do tubo $[m]$;

X , medida do segmento na n-ésima secção do tubo $[m]$;

y , parâmetro desconhecido;

F , soma dos erros quadrados ou função objetivo;

$T_{i\text{exp}}$, temperatura medida em tempos t_i $[^{\circ}C]$;

$T_i(y)$, temperatura em tempos t_i , simulada $[^{\circ}C]$;

M , número total de medidas desconhecidas;

d_1 , medida da largura da base inferior do tubo (tronco de pirâmide) $[m]$;

d_2 , medida do comprimento da base inferior do tubo (tronco de pirâmide) $[m]$;

RESUMO

A população humana do planeta aumenta significativamente a cada ano, sendo necessário que se aumente também a produção de alimentos para atender essa demanda. O Brasil é um dos países que tem grande participação na produção de grãos. Para que o grão não perca seu valor nutritivo e/ou comercial devem-se tomar alguns cuidados quanto ao modo e condições de armazenamento da produção. Fatores como umidade e as altas temperaturas causam prejuízos alterando as propriedades físicas e químicas dos grãos. Muitas pesquisas estão, constantemente, sendo realizadas para encontrar modelos matemáticos que descrevam satisfatoriamente o estado térmico dos grãos armazenados em silos sujeitos as aerações. Para obter maior eficiência nos resultados teóricos obtidos na descrição do processo de resfriamento da massa de grãos, o presente trabalho propõe-se a aprimorar o modelo matemático do Reator Ideal Homogêneo (modelo de camadas) , sendo que este modelo já apresentou resultados satisfatórios para o caso de silos com geometria constante (cilíndrico), mas não para o caso de geometria variável (tronco de pirâmide). As curvas de resfriamento de uma massa de grãos, obtidas experimentalmente, foram comparadas com os resultados da simulação numérica utilizando o modelo matemático. As curvas simuladas apresentam um comportamento mais lento em relação aos dados experimentais. A partir disto, aprimorou-se o modelo, apresentando uma nova expressão para a massa de grãos contida em cada camada, utilizando um fator que varia com a velocidade de aeração do ar. A dependência foi calculada pelo Problema Inverso. O modelo Reator Ideal Homogêneo Modificado apresenta resultados satisfatórios quando comparados com os dados experimentais para o caso geometria variável.

ABSTRACT

The human population has increasing each year significantly, due to it, it is necessary that the food production has been increased too, in order to attend to that demand. Brazil is one of the countries that has a great participation in the grain production. To the grain not to lose its nutritious and/or commercial value, it should be taken some cares in relation to the way and to the conditions of how the grain production is stored. Humidity and high temperatures are factors that cause damage to the grains and because of it change its physical and chemical process. Many researches are being carried out for the purpose of finding out mathematical models which describe satisfactorily the grain thermal state, which is stored in granaries in the aeration process. To obtain a great efficiency in theoretical results obtained in the description of the process of grain storage technique, the present work has the purpose of improving the mathematical model of the Homogeneous Ideal Reactor. This layer model has already presented satisfactory results to the case of granaries with constant geometry (cylindrical), but not to the case of variable geometry (pyramid trunk). The curves of grain storage technique, obtained experimentally, were compared to the results of the numerical simulation using the referred mathematical model. The simulated curves present a slower behavior regarding the experimental data. For that reason, the model is improved presenting a new expression for bulk grains contained in each layer, utilizing a factor that varies with the speed of the aeration process. The dependence was calculated by the Inverse Problem, and modifying the Homogeneous Ideal Reactor Model, it presents satisfactory results if compared with the experimental data for the variable geometry.

INTRODUÇÃO

O Brasil é atualmente considerado o segundo país maior produtor de grãos de soja e tem como previsão de colheita 124 milhões de toneladas, safra 2005/2006(CONAB). As estruturas de armazenamento, chamadas silos, devem ter um sistema seguro e de boa qualidade para que o produto não sofra danos e venha a perder seu valor nutritivo e /ou comercial.

A aeração é considerada o método mais eficiente utilizado na preservação dos grãos armazenados. Consiste na passagem forçada do ar ambiente por entre a massa de grãos, com objetivo de controlar a temperatura e o micro-clima, evitando o aparecimento de pragas e outros organismos. A aeração precisa ocorrer de maneira uniforme, uma vez que pode haver formação de gradientes de temperatura e/ou umidade e ainda a formação de focos de infestação de fungos causados pela resistência maior ou menor a passagem do ar criando regiões sub-aeradas ou super-aeradas.

Em pesquisas que estão sendo desenvolvidas pretende-se estudar o estado térmico de grãos armazenados, procurando com isto otimizar o processo de aeração, evitando altos investimentos e minimizando perdas.

Vários modelos matemáticos já foram desenvolvidos com o objetivo de descrever o estado térmico da massa de grãos sob resfriamento por aeração, entre eles destacam-se Menegol (2005) e Miranda (2005).

No trabalho desenvolvido em Menegol (2005), desenvolveu-se um modelo matemático que pretendeu descrever o estado térmico da massa de grãos. Realizou-se experimentos de resfriamento de grãos e se mostrou que, considerando que as transferências de calor na massa de grãos ocorram, predominantemente, por condução é necessário introduzir no processo dois coeficientes de difusividade térmica efetivo da massa de grãos que representam velocidades diferentes de resfriamento durante o processo.

Miranda (2005) realizou experimentos de resfriamento de grãos de soja com o objetivo de descrever a dinâmica de resfriamento para estes grãos, considerando diferentes temperaturas iniciais do grão e velocidades de aeração.

. Foi utilizado um tubo cilíndrico de diâmetro 150 mm (geometria com área constante) e um tubo no formato de tronco de pirâmide (geometria com área variável), para simular um silo real. Propôs um modelo matemático tipo Reator Ideal Homogêneo ou modelo de camadas, Khatchatourian (2006). Neste modelo matemático, divide-se a massa de grãos em camadas finas onde é modelado o resfriamento dos grãos sujeitos ao processo de aeração, durante certo intervalo de tempo. A hipótese de que existe equilíbrio térmico em toda massa armazenada é utilizada, e em cada camada a temperatura do grão e do ar é considerada a mesma. Os resultados obtidos pela simulação quando comparados com os dados experimentais para o tubo cilíndrico mostraram boa concordância, justificando a utilização deste modelo para a descrição da dinâmica de resfriamento de grãos de soja.

Notou-se um comportamento mais lento das curvas de resfriamento descritas através deste modelo (simulação), quando comparadas com os dados experimentais realizados para o caso do tronco de pirâmide (área variável) mostrando que para utilizar este modelo na descrição da dinâmica de resfriamento em tubos com esta geometria necessitava-se adaptar/modificar o modelo para este caso, ou seja, o modelo necessitava ser aprimorado para fornecer bons resultados.

O presente trabalho objetiva aprimorar este modelo, considerando a hipótese de que a massa de grãos que entra em equilíbrio com a massa de ar de aeração em cada camada é uma massa efetiva (menor) de grãos. Por esta hipótese considera-se que, dependendo da velocidade do fluxo de ar, nem toda a massa de grãos consegue entrar em equilíbrio com o ar. Através desta hipótese, a temperatura do interior do grão pode ser considerada diferente da temperatura da superfície, sendo que a temperatura da superfície é que efetivamente entra em equilíbrio com o ar.

Utiliza-se o Problema Inverso para encontrar essa massa efetiva para diferentes velocidades do ar de aeração para a geometria de área variável (tronco de pirâmide), em diferentes seções do tubo.

Este trabalho está dividido conforme os capítulos a seguir.

No Capítulo 1, apresenta-se uma revisão bibliográfica sobre a soja, mostrando a origem, importância econômica para a indústria, alimentação, etc. Explica-se o processo de aeração e seus principais objetivos, assim como as características dos grãos e os diferentes sistemas de armazenamento. É feita a colocação do problema e os objetivos deste trabalho de pesquisa.

No Capítulo 2, é feita a descrição dos equipamentos utilizados para realização dos experimentos de resfriamento de grãos e são apresentados os resultados experimentais obtidos através destes para diferentes velocidades de aeração.

No Capítulo 3, apresenta-se o Modelo do Reator Ideal Homogêneo, onde se deduz as relações para área, volume, velocidade e temperatura para cada camada de grãos do tubo tipo tronco de pirâmide.

No Capítulo 4, apresenta-se os resultados obtidos através da simulação utilizando o modelo teórico apresentado no capítulo 3, considerando que a massa total de grãos participa do resfriamento. Posteriormente, são mostrados os resultados das simulações e estes são comparados com os dados experimentais obtidos no Capítulo 2, utilizando-se os valores da variável y (relacionada à massa efetiva). São apresentados os resultados das simulações com a massa efetiva e comparados com os dados experimentais.

Finalmente no capítulo 5, são colocadas as conclusões pertinentes obtidas pelas comparações entre os dados experimentais e as simulações.

1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 IMPORTÂNCIA DA SOJA

Para nossa alimentação ser saudável devemos ingerir, entre outros alimentos, uma grande variedade de grãos, sendo um destes de grande valor nutritivo, a soja. Sendo uma cultura de verão ela viabiliza o agro negócio que, para ter um bom desenvolvimento, não pode apresentar lacunas em nenhum período do ano.

Cultivada no Brasil desde 1950, vinda da China, em pouco tempo, a soja ocupou o oeste catarinense e grande parte do Paraná chegando logo em seguida ao centro-oeste, e hoje atingindo a Bahia, Maranhão, Piauí, Rondônia e outras regiões do País.

Este avanço significativo levou o Brasil a se tornar o segundo maior produtor de soja do mundo, nas últimas décadas. O espírito empreendedor dos produtores do sul do País contribuiu para geração de lucros para exportação, aumentando a nossa economia. A soja em grãos registrou em 2006 o maior índice de crescimento, 124 milhões de toneladas serão colhidas no País, dados da CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). A tabela 1 apresenta a área plantada em hectares e a quantidade colhida em toneladas desse grão, no Estado do Rio Grande do Sul, nas safras 2003 a 2006.

Tabela 1: Área plantada em hectares e quantidade colhida em toneladas, cultura da soja

	2003	2004	2005	2006
Área plantada	3.591.970 ha.	3.984.337 ha.	4.179.272 ha.	3.868.501 ha.
Produção	9.579.297 t	5.541.714 t	2.446.600 t	7.559.288 t

Fonte: FEE (Fundação de Economia e Estatística) e EMATER-RS (2006)

1.2 CUIDADOS COM A ARMAZENAGEM

No momento da colheita o produtor deve ter a preocupação em como armazenar esses grãos. A colheita ocorre nos meses de março, abril e maio, período em que o clima pode prejudicar e interferir na qualidade dos grãos.

A umidade propicia o aparecimento de fungos e microorganismos que alteram a qualidade e conservação dos grãos. Sendo assim, uma rede armazenadora de grãos adequada torna-se garantia de conservação em perfeitas condições, Puzzi (1986).

A oleaginosa da qual estamos falando é composta por carboidratos, proteínas, gorduras, fibras, minerais e vitaminas. Se o produto não for armazenado corretamente, poderá ter prejuízos na hora da comercialização.

Para ter um armazenamento seguro deve-se ter em vista que o principal fator reside no baixo teor de umidade, Puzzi (1986).

Outro fator importante relacionado aos grãos armazenados é a temperatura que, junto com a umidade, influencia na intensidade do processo respiratório dos grãos, Toniazzo (1997).

1.2.1 Local de armazenamento

Desde os primeiros tempos da história da humanidade, a produção de alimentos sempre foi o que há de mais importante em qualquer sociedade. A produção, o transporte, o beneficiamento, a armazenagem, a comercialização e o consumo de alimentos é uma cadeia de atividades vitais às pessoas, às famílias e às nações, motivo pelo qual a armazenagem agrícola é uma das mais antigas e importantes atividades do produtor rural, Weber (2005).

Os sistemas de armazenagem evoluíram muito em tecnologia, capacidade e forma. Observando ao nosso redor em termos de armazenagem de grãos, constatamos uma diversidade de formas, materiais e volumes. Silos ou armazéns, de edificações de concreto ou de estrutura metálica, são os locais onde produtos agrícolas são depositados após a colheita, Weber (2005).

Alguns tipos de silos:

Silos verticais;

Silos horizontais;

Silos de telas;
Silos tipo paiol;
Silos tipo bolsa;

Alguns tipos de armazéns graneleiros:

Silos de fundo plano;
Silos de fundo “V”
Silos de fundo semi-“V”
Silos de fundo “W”

O armazenamento de grãos requer que a manutenção dos produtos se faça com excelência, mantendo-os sem perdas qualitativas nem quantitativas por períodos prolongados inclusive de mais de um ano de armazenagem, Weber (2005).



Figura 1: Silo metálico da região Noroeste do Rio Grande do Sul

Fonte: COTRIJUÍ-Ijuí, 2006.

Os silos mais utilizados são os metálicos, conforme figura 1, devido ao seu preço competitivo, durabilidades e qualidade na conservação dos grãos e foram importados para o Brasil na década de 50, vindos dos EUA.

As unidades de recebimento limpam, secam, armazenam e conservam os produtos até a época da comercialização, para o consumo interno ou exportação.

A armazenagem também acontece nas fazendas, pois, com linhas de financiamento variadas é possível à construção de tais estruturas para favorecer o produtor, Weber (2005).

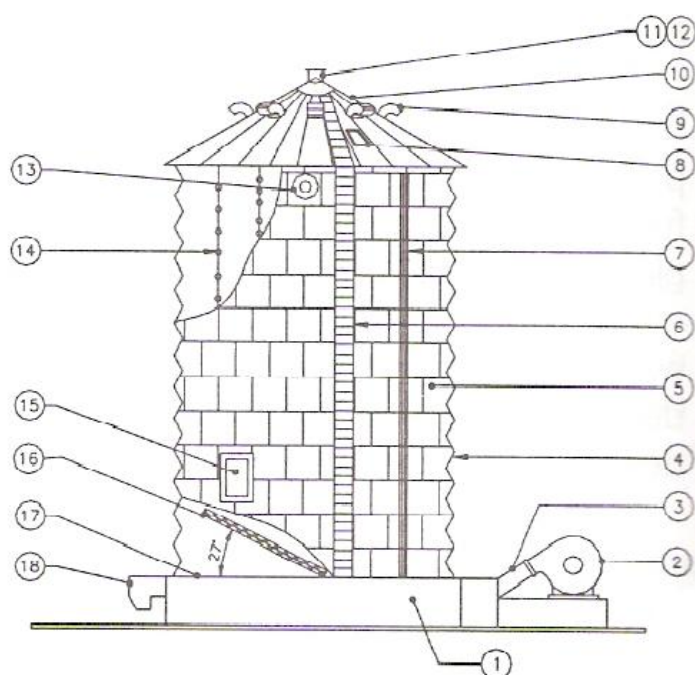


Figura 2:Esquema de um típico silo metálico de chapa ondulada e seus acessórios

Fonte: Weber (2005).

Na figura 2 ilustra-se um silo metálico e os acessórios existentes, os quais são:

- 1- Anel base de concreto sobre o qual é levantado o silo;
- 2- Ventilador da aeração;
- 3- Conduto de ligação do ventilador ao sistema de distribuição do ar;
- 4- Chapas que formam um anel que sobreposto forma o tubo;
- 5- Cilindro metálico galvanizado, também denominado de tubo;
- 6- Escada com guarda-corpo de acesso ao telhado e plataforma e sobre o telhado, escada para acesso a porta de inspeção e a boca de alimentação do silo;

- 7- Montantes internos ou preferencialmente externos estruturais do silo, existentes nos modelos maiores;
- 8- Porta superior de acesso à parte interna mesmo com o silo cheio;
- 9- Respiros em número adequado para a saída do ar quente e o ar da aeração;
- 10- Teto em painéis metálicos galvanizados, autoportantes com estrutura para proteção aos ventos e para sustentar a termometria;
- 11- Local de carga do silo;
- 12- Espalhador de grãos e impurezas, localizado internamente na entrada dos grãos;
- 13- Controle de nível de silo cheio;
- 14- Cabos da termometria;
- 15- Porta inferior de acesso interno, de uso exclusivo com apenas os grãos que não saíram por gravidade. Esta porta é dupla, a externa abre para fora, e a outra, de segurança, abre para dentro. Alguns fabricantes colocam ainda, uma porta de serviço ao nível do primeiro anel que somente abre quando o silo estiver descarregado;
- 16- Rosca varredora;
- 17- Piso do silo com canais de aeração;
- 18- Rosca extratora.

São necessários diversos processos para a armazenagem e o beneficiamento de grãos, sendo de fundamental importância para garantir a qualidade dos grãos, o conhecimento das características dos produtos a serem armazenados. É indispensável o perfeito beneficiamento, limpeza e secagem para uma boa conservação dos grãos armazenados em silos ou armazéns graneleiros, Savick (2001).

De acordo com Brooke (1982), as propriedades dos grãos, nos aspectos de sua armazenabilidade são influenciadas pelas condições climáticas ocorridas durante o crescimento e maturação, pelo método e pelo manuseio que o produto sofreu durante o pré-processamento.

1.3 PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DOS GRÃOS ARMAZENADOS

1.3.1. Condutibilidade Térmica

O calor se propaga de um ponto para outro por condução, convecção e irradiação sendo que por condução o calor em uma massa de grãos é propagado de grão para grão, e pode também ser propagado por micro-convecção em decorrência do fluxo de ar intergranular que se desloca, por irradiação, isto é, influência dos raios solares. A propagação do calor através da massa de grãos é um processo complexo, a transferência de calor de uma zona quente é influenciada por diversos fatores que variam conforme as condições de armazenamento. Alguns estudos realizados em vários países, entre eles Canadá, EUA evidenciam que a massa de grãos se apresenta como um material de baixa condutibilidade térmica, Puzzi (1977).

1.3.2 Característica higroscópica

Os grãos podem ceder água (distorção) ou absorver água (adsorção), a este processo dá-se o nome de higroscopia.

Para cada espécie de grãos existe um equilíbrio higroscópico, que depende da temperatura e do estado higrométrico do meio ambiente, seja no campo ou no interior do silo e do armazém.

Equilíbrio higroscópico significa o balanceamento entre a temperatura e a umidade do grão, com a temperatura e umidade relativa do ar. Para temperaturas iguais ocorrem uma igualdade de tensões entre a percentagem de umidade dos grãos e a umidade relativa do ar. No momento que houver equivalência no deslocamento da umidade, ocorrerá equilíbrio higroscópico, Savick (2001). A tabela 2 apresenta a umidade de equilíbrio higroscópico da soja em várias situações de umidade e temperatura do ar e do grão.

Tabela 2: Teor de umidade e equilíbrio higroscópico da soja

Teor de umidade e equilíbrio da SOJA													
T(°C)ar	Umidade relativa bu(%)												
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
16	5.8	6.6	7.5	8.3	9.2	10.0	10.9	11.9	12.9	14.1	15.4	17.0	19.1
18	5.7	6.5	7.4	8.2	9.1	9.9	10.8	11.8	12.8	14.0	15.3	16.9	19.0

20	5.6	6.4	7.3	8.1	9.0	9.8	10.7	11.7	12.8	13.9	15.2	16.9	19.0
22	5.4	6.3	7.2	8.0	8.9	9.7	10.7	11.6	12.7	13.8	15.2	16.8	18.9
24	5.3	6.2	7.1	7.9	8.8	9.6	10.6	11.5	12.6	13.7	15.1	16.7	18.8
26	5.2	6.1	7.0	7.8	8.7	9.6	10.5	11.4	12.5	13.7	15.0	16.6	18.7
28	5.1	6.0	6.9	7.7	8.6	9.5	10.4	11.3	12.4	13.6	14.9	16.5	18.6
30	5.0	5.9	6.8	7.6	8.5	9.4	10.3	11.3	12.3	13.5	14.8	16.5	18.6
32	4.9	5.8	6.7	7.5	8.4	9.3	10.2	11.2	12.2	13.4	14.8	16.4	18.5

Fonte: Weber (2005).

1.3.3 Pressão interna

A pressão do ar externo estando baixa, o aquecimento aumenta a pressão interna dos grãos, favorecendo a migração interna da umidade da pressão interna para fora, Miranda (2005).

1.3.4 Umidade dos grãos

O teor de umidade é o elemento que governa a qualidade do produto armazenado. Para se ter um armazenamento seguro deve-se ter em vista que o principal fator reside no baixo teor de umidade, Puzzi (1986).

O teor de umidade máximo para a soja, visando um longo período de estocagem é 11%. Para evitar as perdas no campo que ocorrem durante a colheita mecânica, os grãos devem ser colhidos em níveis de teor de umidade específicos. No caso da soja, o recomendado para a colheita é 18%, Puzzi (1986). Existe três formas de concentração de umidade, são elas:

- Água superficial: encontra-se no lado externo do grão;
- Água intersticial: de fácil remoção, existente nos espaços intersticiais;
- Água de constituição: quimicamente ligada aos componentes orgânicos dos grãos como proteínas, enzimas, gorduras, carboidratos, vitaminas. Esta água não é removida na secagem para fins de armazenagem.

1.3.5 A Porosidade na massa de grãos

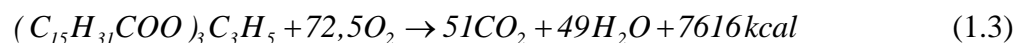
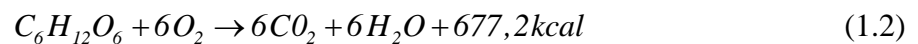
Os espaços vazios existentes entre os grãos armazenados a granel, representam a porosidade. É por estes que irá ocorrer o processo de aeração.

A porosidade para uma mesma espécie de grãos (no caso a soja), pode assumir diferentes valores dependendo da variedade do grão e do teor de umidade, Toniazzi(1997), é dada pela razão entre o volume de espaços vazios e o volume total.

$$\varepsilon = \frac{V_{vazio}}{V_{total}} \quad (1.1)$$

1.2.2 Processo respiratório

Outro fator importante relacionado à conservação de grãos armazenados é a intensidade do processo respiratório dos grãos. A respiração é um processo que produz calor, água e dióxido de carbono. As combustões de um típico carboidrato e de uma gordura são representadas pelas equações:



A atividade da água é um indicador da disponibilidade de água para a atividade biológica do grão e de microorganismos que o atacam. Para considerar a estabilidade de um produto no armazenamento e os riscos de sua deterioração deve-se analisar a atividade de água em conjunto com a temperatura, Pereira (1995).

A tabela 3 apresenta dados da atividade de água para a soja, para alguns teores de umidade (%) e temperatura T(°C), comumente usados no armazenamento destes grãos no Brasil.

Tabela 3: Teores de umidade e temperaturas usadas para armazenagem da soja no Brasil

Temperatura	Umidade			
T(°C)	11.0%	11.5%	12.0%	12.5%

4.0	0.53	0.615	0.637	0.657
6.0	0.598	0.620	0.642	0.663
8.0	0.603	0.626	0.647	0.668
10.0	0.608	0.631	0.652	0.673
12.0	0.613	0.636	0.657	0.678
14.0	0.618	0.641	0.662	0.683
16.0	0.623	0.646	0.667	0.688
18.0	0.628	0.651	0.672	0.693
20.0	0.633	0.655	0.677	0.697
22.0	0.638	0.660	0.682	0.702
24.0	0.642	0.665	0.686	0.707
26.0	0.647	0.669	0.691	0.711
28.0	0.652	0.674	0.695	0.716
30.0	0.656	0.678	0.700	0.720
32.0	0.661	0.683	0.704	0.724
34.0	0.665	0.687	0.708	0.729
36.0	0.669	0.691	0.713	0.733
38.0	0.673	0.696	0.717	0.737

Fonte: Pereira (1995).

1.3.7 Perdas no armazenamento

As principais fontes de perdas na qualidade e quantidade de grãos durante o armazenamento são fungos, insetos e grãos de baixa qualidade, Brooker (1982).

Quanto ao percentual de perdas de grãos pós-colheita, pode-se afirmar que fica na faixa de 15% a 25%. O termo “perda” se refere a qualquer prejuízo que o grão venha a sofrer, Miranda (2005), podemos citar algumas delas, tais como:

- a- Perda física;
- b- Perda de qualidade;
- c- Perda nutricional;
- d- Perda do valor comercial;

Sendo que as perdas podem ocorrer basicamente por:

- a- Aquecimento dos grãos;
- b- Infestação dos insetos;
- c- Proliferação de fungos;
- d- Perda de peso;
- e- Perdas do vigor na semente ou no grão destinado a indústria.

As maiores perdas causadas por fungos, segundo Chistensen e Kaufmann(1969), citado por Brooker (1982), são: redução do poder germinativo, descoloração das sementes, aquecimento e mofo, variações bioquímicas, possível produção de toxinas e perdas de matéria seca.

1.4 TEMPO DE PERMANÊNCIA DO PRODUTO ARMAZENADO

Tradicionalmente no Brasil, os grãos permanecem armazenados por mais de 6, 8 ou 10 meses nos silos. Esta realidade, entretanto, vai ser alterada tão logo tenhamos safras que passem dos 140 milhões de toneladas. E segundo afirma FAO (Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação-Food and Agriculture Organization of the United Nations), em 12 anos chegaremos à casa dos 300 ou 400 milhões de toneladas, Weber (2005).

1.5 PROCESSO DE AERAÇÃO DOS GRÃOS

A aeração é o método de controle mais difundido e utilizado na preservação da qualidade de grãos armazenados. Essa tecnologia é utilizada para modificar o microclima da massa de grãos, criando condições favoráveis para o armazenamento seguro. Esta técnica consiste na movimentação forçada de ar ambiente adequado, através da massa de grãos, com objetivo geral de diminuir e uniformizar a temperatura, Puzzi (1986). O ar é insuflado ou aspirado por meio de um ventilador e em seguida é distribuído pela massa de grãos por meio de dutos perfurados, Laceran (1981).

O processo de aeração deve acontecer para prevenir possíveis danos e não para corrigí-los. O primeiro objetivo da realização da aeração é a redução da temperatura, levando-

se em consideração dois fatores importantes: a umidade relativa do ar e a diferença entre a umidade do grão e do ar, Pereira (1995).

Os benefícios alcançados com a utilização da aeração convergem todos para garantia da qualidade dos produtos armazenados, sendo este um processo lento, em que as condições do ar e do produto vão variando continuamente até atingir o equilíbrio. Se for feita uma análise da temperatura e umidade do produto após um determinado número de horas de aeração, pode-se identificar três zonas distintas designadas por A, B e C e que são separadas por duas frentes: uma frente de umidade e uma frente de temperatura conforme mostra a figura 3.

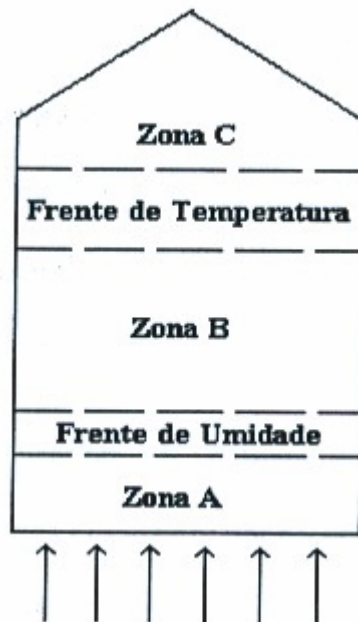


Figura 3: Diferentes regiões formadas em um silo durante o processo de aeração

Fonte: Queiroz e Valente (2004).

Essas frentes e zonas deslocam-se através da massa de grãos na direção do fluxo de ar.

Na zona A, o produto está em equilíbrio térmico e higroscópico com o ar que entra na massa de grãos. Na região C, o produto mantém a temperatura e umidade inicial uma vez que ainda não foi atingido por nenhuma das frentes. A frente de temperatura se desloca rapidamente, a uma velocidade de cerca de um milésimo da velocidade de deslocamento do ar através da massa de grãos. Já a frente de umidade se desloca a uma velocidade cerca de cem

vezes menor que a velocidade de deslocamento da temperatura. Ao final da aeração espera-se que a frente de temperatura tenha se movido por toda massa de grãos, e que a maior parte da massa de grãos esteja na zona B, e uma pequena porção na zona A. Ao final da aeração, a zona C deve ter sido toda removida da massa de grãos, Queiroz (2004), citado por Dal Toé (2005).

1.2.1 Principais objetivos da aeração

- a- Resfriamento da massa de grãos;
- b- Evitar a migração de umidade;
- c- Retirar bolsas de calor da massa de grãos;
- d- Conservação temporária de grãos úmidos;
- e- Secagem limitada;
- f- Aplicação de fumegantes.

A eficiência de um sistema de aeração está no controle do escoamento do ar e na manutenção da uniformidade deste em todas as regiões do silo, Khatchatourian(1999), citado por Savicki, (2001).

A classificação dos sistemas de aeração pode ser, segundo Weber (2005):

Aeração de manutenção: deve ser acionada sempre que a termometria indicar um aquecimento em algum ponto da massa de grãos. Utiliza ar natural nas temperaturas mais baixas do que a temperatura média dos grãos. Este tipo de aeração é utilizado em grãos armazenados secos.

Aeração corretiva: utilizada para controlar a temperatura quando esta estiver elevada acima do normal. Este fato ocorrerá nos seguintes casos:

- Elevada concentração de impurezas;
- Foco com desenvolvimento acentuado de microorganismos;
- Infiltração de umidade;
- Acúmulo de grãos finos e quebrados impedindo a passagem do ar.

Aeração de resfriamento: esta aeração finaliza a secagem reduzindo a temperatura e a umidade dos grãos dentro dos silos, tornando-os uma massa fria e homogênea.

Aeração secante: é usada para pequenos lotes de produtos úmidos, faz secagem lenta. O ar utilizado tem temperatura de 4°C a 8 °C acima da temperatura ambiente.

Segundo Weber (1995), um sistema de aeração deve ser acionado quando:

1-Sempre que forem constatados pontos na massa de grãos com diferenças de temperaturas iguais ou maiores de 6 °C.

2-Sempre que for constatada na massa de grãos uma temperatura média igual ou superior a 6°C em relação à temperatura ambiente.

1.2.2 Componentes de um sistema de aeração

As principais partes que compõe um sistema de aeração são:

- a- Um ventilador para movimentar o ar através da massa de grãos.
- b- Conduitos perfurados para conduzir e distribuir o ar através da massa de grãos.
- c- Tubos de conexão que ligam o ventilador com os conduitos.

O fluxo de ar necessário para a aeração pode variar de uma região para outra, o tamanho e a forma dos grãos afeta a resistência ao fluxo de ar. A seleção de um ventilador depende de um volume de ar requerido e da pressão estática contra a qual precisa operar para movimentar o ar através da massa de grãos. Os ventiladores podem ser centrífugos (são mais eficientes quando se precisa de maior pressão) e axiais, Puzzi (1977).

O ar, forçado a passar pela massa de grãos, encontra resistência para sair. Essa resistência é chamada de pressão estática, e é determinada por um aparelho denominado manômetro, que são tubos em forma de U de vidro ou plástico, parcialmente cheios de um líquido, com determinado peso específico. As extremidades são abertas, sendo que uma delas

se comunica com um conduto e outro fica livre para a atmosfera. O desnível do líquido entre os dois ramos determina a pressão estática.

1.6 COLOCAÇÃO DO PROBLEMA

De acordo com a literatura existente sobre o processo de aeração, verifica-se que existem vários trabalhos que estudam o escoamento do ar em silos, mas a grande parte destes foi realizada para o caso isotérmico, isto é, a temperatura é considerada constante durante o processo, Khatchatourian (2004).

A necessidade de otimizar esse processo faz com que, cada vez mais pesquisas sejam realizadas, com o propósito de assegurar uma armazenagem eficiente para essa grande produção de grãos .

Pesquisadores como Jofriet (1987), Manbeck and Britton (1988), Chang and Steele (1995), realizaram trabalhos com o objetivo de modelar a distribuição da temperatura da massa de grãos armazenados em silos durante longos períodos de tempo.

A Modelagem Matemática é um processo dinâmico utilizado para obtenção e validação de modelos matemáticos. Pretende-se, utilizando este processo dar continuidade ao trabalho desenvolvido por Miranda (2005), a qual propôs o modelo do Reator Ideal Homogêneo (modelo de camadas), para tratar a dinâmica de resfriamento da massa de grãos armazenados em silos. O modelo apresentou bons resultados para o caso geometria constante, isto é, quando a velocidade do ar de aeração ao longo das camadas é a mesma, mas não apresentou boa concordância para o caso de geometria variável, onde a velocidade do ar de aeração, ao longo das camadas, é variável. Portanto, o modelo Reator Ideal Homogêneo necessita ser aprimorado para o caso do tubo de geometria variável.

1.6.1. Objetivos do Trabalho.

Pretende-se realizar experimentos com tubo isolado de geometria variável e a partir dos dados experimentais obtidos e a simulação numérica do modelo Reator Ideal

Homogêneo , analisar a dinâmica de temperatura da massa de grãos para diferentes velocidades do ar de aeração.

A partir da comparação dos dados experimentais e da simulação numérica do modelo matemático, pretende-se modificar o Modelo do Reator Ideal Homogêneo Ideal, Miranda (2005), considerando um tubo no formato de tronco de pirâmide, com área de seção reta variando com a altura, introduzindo uma função y na expressão da massa de grãos para cada camada. Pretende-se calcular, através do Problema Inverso, a função y e a massa efetiva dos grãos para diferentes velocidades do ar de aeração e com a expressão matemática para a percentagem de massa de grãos que entra em equilíbrio com o ar (y) em cada camada. Além disso, pretende-se realizar simulação numérica, utilizando os valores de y para diferentes velocidades de aeração e comparar com os dados experimentais.

2 DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

O equipamento utilizado para representar a situação real de um silo, está localizado no Laboratório de Medidas Físicas e Modelagem Matemática da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, e tem a composição conforme a figura 4 abaixo.

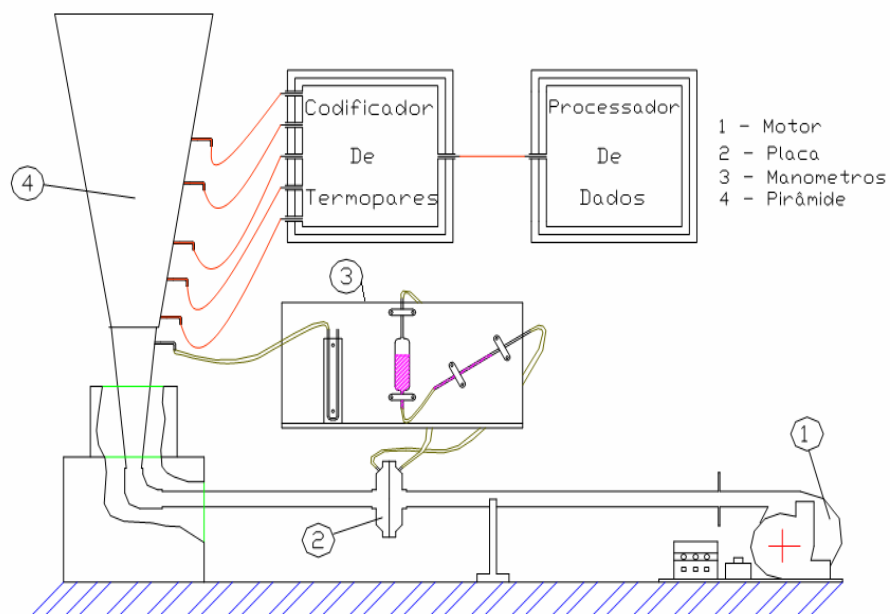


Figura 4: Equipamento utilizado para realização dos experimentos sobre o resfriamento da massa de grãos de soja (tronco de pirâmide).

Elementos que formam o equipamento:

- 1- Ventilador centrífugo - acionado por um motor elétrico, com $\frac{3}{4}$ Hp e rotação de 3450 rpm para impulsionar o ar pela tubulação (duto de PVC com 50 mm de diâmetro).
- 2- Inversor de frequência - controla a frequência de rotação do motor do sistema de ventilação, permitindo mudanças nos valores de velocidades de saída do ar ventilado;
- 3 - Placa de orifício - utilizada para medir a velocidade do ar que passa pela tubulação;
- 4 - A placa é acoplada a um monômetro do tipo U que utiliza água, inclinado a 30° em relação à base, que permite medir pressões até 100 mm ca. A medida da diferença de pressão exercida sobre a coluna de água Δp_1 , permite calcular a velocidade média do fluxo de ar.

5 - Tronco de pirâmide de madeira isolado termicamente, sendo distribuídos termopares em diferentes alturas do tubo.

6 - Placas de aquisição de dados e programa de gerenciamento de dados medidos, utilizados também para medir a temperatura. Os termopares são do modelo MTK-tipo K-universal, e os dados são arquivados eletronicamente com o auxílio de uma placa de aquisição de dados analógico/digital (placa A/D do tipo LR 7018, 16 bits, 8 pontos com conversor 485 para 232 placa LR7520, 8 canais de leitura de dados) que realiza até 10 leituras por segundos é ligada a um computador pessoal , Oliveira (2004).

A vazão do ar que entra no tubo é calculada através da equação

$$Q = CA_0 \sqrt{\frac{2\Delta p_1}{\rho}} \quad (2.1)$$

onde

A_0 , área do orifício da placa ($0,001017 \text{ m}^2$);

Δp_1 , variação de pressão mostrada no manômetro [Pa];

ρ , massa específica do fluido ($1,1614 \text{ kg} / \text{m}^3$);

C , coeficiente da placa de orifício, sendo que este valor foi determinado experimentalmente e varia com a velocidade, Toniazzo (1997). Neste trabalho considerou-se $C=0,72$.

A variação de pressão Δp_1 foi medida através da variação de rotação do motor, sendo possível determinar a vazão para cada valor de pressão medida.

A equação (2.1) determina a vazão de um fluido em escoamento num tubo. A vazão de fluido também pode ser escrita pela equação abaixo:

$$Q = v.A \quad (2.2)$$

Sendo:

v , velocidade de escoamento do fluido.

A , área de seção reta do tubo.

A vazão é a mesma em qualquer posição do tubo de diâmetro 50 mm por onde passa o ar de aeração e o tubo com formato de tronco de pirâmide, pois não há nenhum escapamento nem fonte de ar durante o percurso. Pode-se então considerar a relação abaixo:

$$Q_1 = Q_2 \quad (2.3)$$

onde Q_1 é a vazão na tubulação onde foi colocada a placa de orifício e Q_2 é a vazão no tubo que contém a massa de grãos, então:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (2.4)$$

Sendo:

v_1 , velocidade do ar na tubulação;

A_1 , área da seção reta da tubulação ($A_1 = 0,0018m^2$);

v_2 , velocidade do ar na entrada do tubo que contém a massa de grãos;

A_2 , área da base menor ($A_2 = 0,0198m^2$).

Assim tem-se a seguinte relação da velocidade de entrada do ar no tronco de pirâmide e a velocidade do ar na placa de orifício.

$$v_2 = \frac{v_1 A_1}{A_2} \quad (2.5)$$

Conhecidos os valores de A_1 e A_2 e considerando que v_1 é medido através da placa de orifício é possível calcular v_2 para diferentes valores de rotação do motor.

2.1 GEOMETRIA NA FORMA DE TRONCO DE PIRÂMIDE

Em silos reais, a velocidade de escoamento do ar não é constante pela massa de grãos. Para melhor aproximar os resultados experimentais com a situação real, utilizou-se o tubo completamente isolado, no formato tronco de pirâmide, pois a velocidade do ar dentro deste tubo diminui a medida que aumenta a sua altura. Os dados coletados a partir dos experimentos servirão para posterior comparação com os resultados calculados via simulação.

2.2 DESCRIÇÃO DOS EXPERIMENTOS

2.2.1 Experimento 1

Utilizou-se um tronco de pirâmide em madeira de altura 1m, cuja área da base inferior é metade da área da base superior, totalmente isolado termicamente, contendo grãos de soja até uma altura de 0,6 m, anteriormente aquecida por aproximadamente 3 horas dentro de uma estufa, a uma temperatura de 45 °C.

Após, ligou-se o sistema de aeração, repetindo-se os experimentos e coletando os dados experimentais para as seguintes velocidades do ar na entrada do tubo: $v_1 = 0,11m/s$, $v_2 = 0,13m/s$, $v_3 = 0,17m/s$ e $v_4 = 0,19m/s$.

Colocou-se termopares (sensores de temperatura), nas seguintes secções do tubo: $x = 0,15m$, $x = 0,27m$, $x = 0,40m$ e $x = 0,54m$, para obter as temperaturas referentes ao processo de resfriamento da massa de grãos.

Os dados do resfriamento foram coletados através do programa de gerenciamento de dados e podem ser vistos nas figuras abaixo.

$v_1 = 0,11m/s$; $T_a = 25,5^\circ C$; umidade relativa do ar 81%; pressão atmosférica 730mmHg.

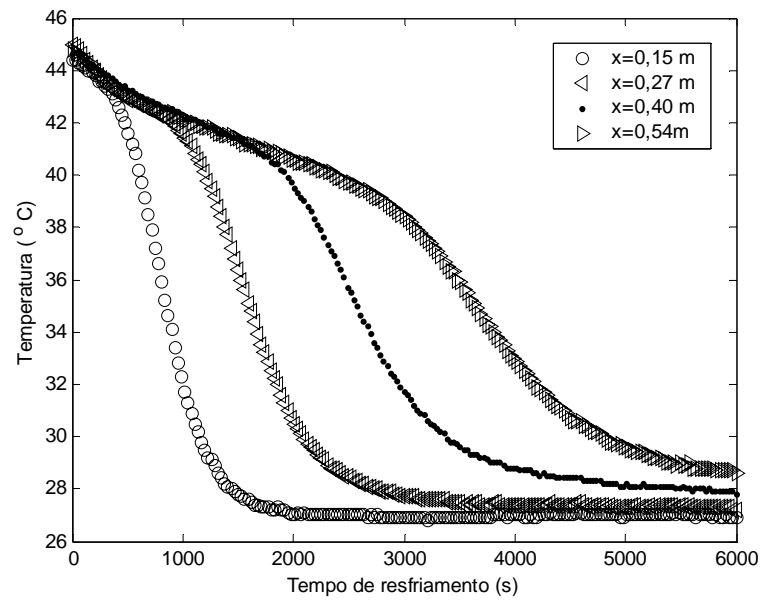


Figura 5: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes alturas da coluna de grãos e $v_1 = 0,11 \text{ m/s}$ (tronco de pirâmide)

$v = 0,13 \text{ m/s}$; $T_a = 25^\circ\text{C}$; umidade relativa do ar 80%; pressão atmosférica 729 mmHg.

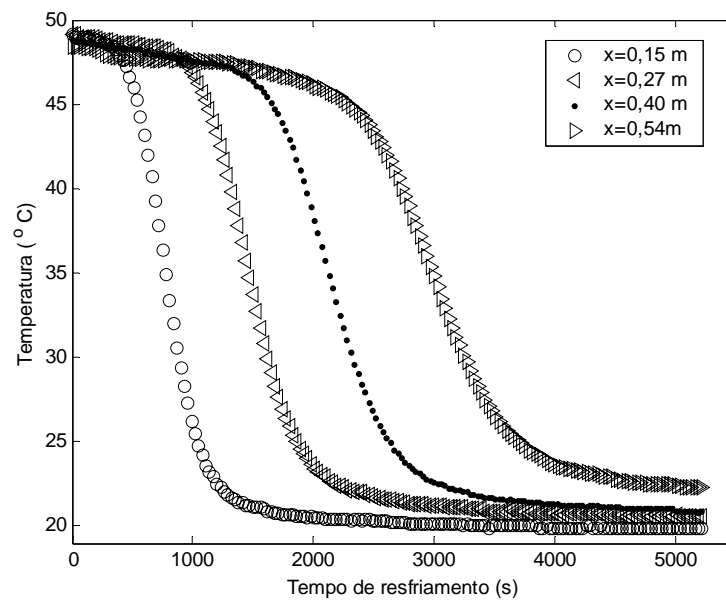


Figura 6: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes alturas da coluna de grãos e $v_1 = 0,13 \text{ m/s}$ (tronco de pirâmide)

$v = 0,17 \text{ m/s}$; $T_a = 24,9^\circ\text{C}$; umidade relativa do ar 79%; pressão atmosférica 729 mmHg.

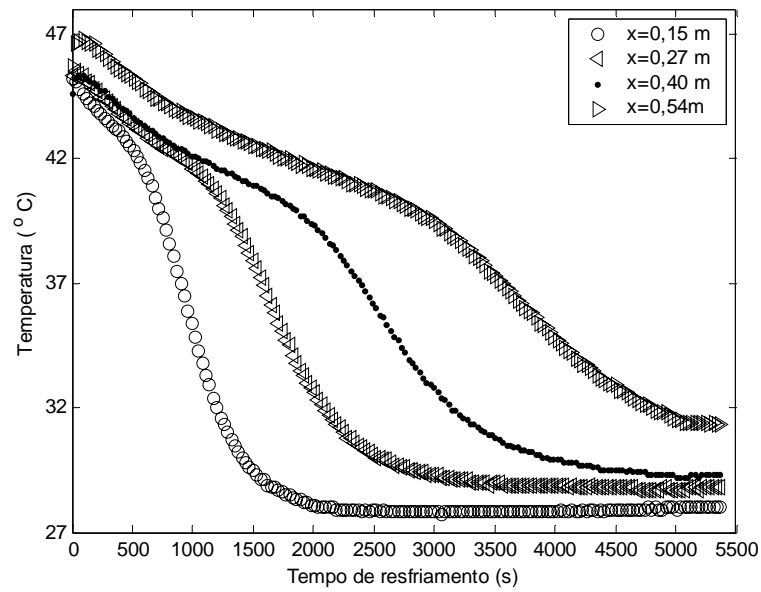


Figura 7: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes alturas da coluna de grãos e $v_1 = 0,17 \text{ m/s}$ (tronco de pirâmide)

$v = 0,19 \text{ m/s}$; $T_a = 24,8^\circ \text{C}$; umidade relativa do ar 80%; pressão atmosférica 729 mmHg.

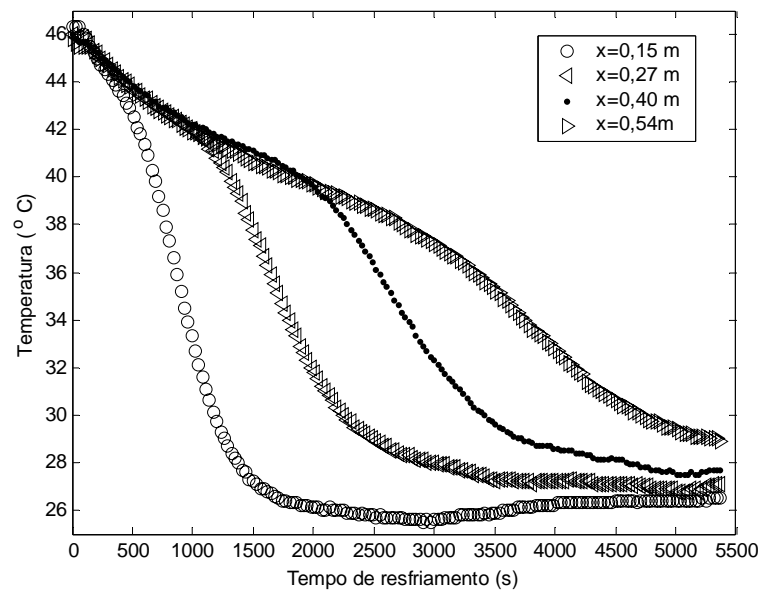


Figura 8: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes alturas da coluna de grãos e $v_1 = 0,19 \text{ m/s}$ (tronco de pirâmide)

Analisando os dados experimentais para esta geometria, observou-se que na primeira camada, a temperatura do grão diminui rapidamente. Isto acontece devido à diferença de temperatura entre o grão e o ar ser bastante significativa. Nas outras camadas, a diferença de temperatura vai diminuindo com isto o ar impulsionado pelo sistema de aeração vai resfriando as camadas posteriores lentamente, pois este sofre uma variação de sua temperatura inicial, aquecendo-se.

2.2.2 Experimento 2

Colocou-se no interior de um grão de soja um termopar, em seguida este grão foi posto dentro da estufa, juntamente com toda a massa de grãos, para ser aquecido a uma temperatura de aproximadamente 45°C . Após atingida esta temperatura, este grão foi colocado em uma altura de $x = 0,15\text{m}$, dentro do tubo, juntamente com toda a massa de grãos para ser resfriado. Repetiu-se o processo para duas velocidades do ar de aeração $v = 0,15\text{m/s}$ e $v = 0,23\text{m/s}$. A figura 9 mostra o resultado, onde T, temperatura adimensional é calculada com a expressão abaixo:

$$T = \frac{T(t) - T_a}{T_i - T_a}$$

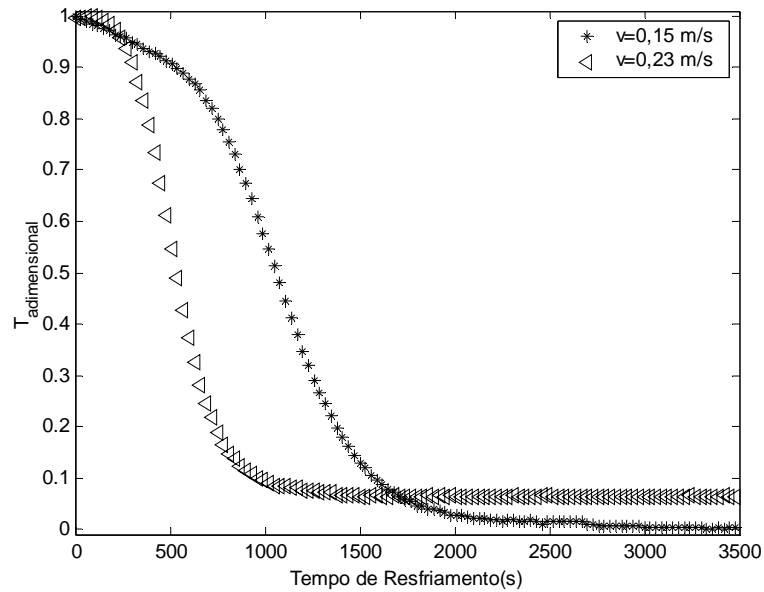


Figura 9: Temperatura adimensional do grão em função do tempo para altura de $x = 0,15m$ e velocidade $v = 0,15m/s$ e $v = 0,23m/s$

Com os dados experimentais, pode-se observar que, quando a velocidade do ar de aeração é $v = 0,23m/s$, as trocas de calor entre o ar e o grão são mais significativas, do que quando a velocidade do ar de aeração é $v = 0,15m/s$.

Os resultados experimentais mostram que, por hipótese, quando a velocidade da aeração aumenta a transferência de calor do grão para o ar aumenta também e a temperatura do grão diminui rapidamente.

Isto ocorre, pois aumenta a transferência de calor na superfície do grão e pode-se considerar que todo o grão participa das trocas de calor com o ar.

À medida que a velocidade do ar diminui, as transferências de calor na superfície do grão diminuem e uma parte do interior do grão ainda permanece aquecida. Com isto, só uma parte da massa de grãos (massa efetiva) participa das trocas de calor (equilíbrio térmico) com o ar.

3 MODELO MATEMÁTICO

Para realização do objetivo proposto neste trabalho, que é descrever a dinâmica de resfriamento de uma massa de grãos sob aeração, utilizaremos o modelo do Reator Ideal Homogêneo resolvendo o problema direto. Considerando que toda massa de grãos, em cada camada, entra em equilíbrio térmico com o ar que atravessa esta camada em um determinado intervalo de tempo.

3.1 MODELO REATOR IDEAL HOMOGENEO

Para resolução do Problema Direto, utilizamos o Modelo do Reator Ideal Homogêneo proposto por Khatchatourian, (2005), que considera haver conservação de energia entre os grãos de soja e o ar em qualquer instante de tempo, em uma determinada camada.

A expressão para a Entalpia (energia) do ar (I_a) para uma dada camada é:

$$I_a = c_{pa} T_a m_a \quad (3.1)$$

onde,

c_{pa} - calor específico do ar a pressão constante;

m_a - massa do ar que entra em contato com a camada de grãos;

T_a - temperatura inicial do ar que entra na camada.

A expressão para a Entalpia do grão (I_g) em uma determinada camada é dada por:

$$I_g = c_g T_g m_g \quad (3.2)$$

onde,

c_g - calor específico do grão;

m_g - massa do grão contida na camada;

T_g - temperatura inicial do grão na camada.

Somando-se as expressões (3.1) e (3.2), temos:

$$I_a + I_g = I_m \quad (3.3)$$

onde, I_m , corresponde a entalpia da mistura na camada considerada.

Substituindo-se as expressões (3.1) e (3.2) em (3.3), temos:

$$c_{pa} T_a m_a + c_g T_g m_g = c_{p\varepsilon} T_m (m_g + m_a) \quad (3.4)$$

onde,

T_m - temperatura média de equilíbrio do sistema ar-grão;

$c_{p\varepsilon}$ - calor específico deste sistema.

O calor específico deste sistema, por hipótese, foi considerado como:

$$c_{p\varepsilon} = \frac{m_g}{m_a + m_g} c_g + \frac{m_a}{m_a + m_g} c_{pa} \quad (3.5)$$

A partir das expressões (3.4) e (3.5), obtém-se a temperatura de equilíbrio para cada camada após um determinado intervalo de tempo, dada por:

$$T_m = \frac{c_g m_g T_g + c_{pa} m_a T_a}{m_g c_g + m_a c_{pa}} \quad (3.6)$$

A massa do grão contida na camada, neste caso é dada por:

$$m_g = \rho_g (1 - \varepsilon) V \quad (3.7)$$

A massa do ar que atravessa uma camada num determinado tempo t , é:

$$m_a = \rho_a v \varepsilon A t \quad (3.8)$$

onde,

$\varepsilon = 0,39$, porosidade dos grãos de soja;

$\rho_a = 1,1614 \text{ kg} / \text{m}^3$, densidade do ar;

$\rho_g = 1350 \text{ kg} / \text{m}^3$, densidade do grão.

Consideram-se neste trabalho, camadas de grãos de 1 cm de altura e a partir disso é possível calcular os valores para o volume V ocupado pelos grãos e a área A da seção reta da camada considerada. A velocidade do ar, v , que entra na primeira camada, foi considerada igual à velocidade de aeração (velocidade de entrada no tubo v_o). Para este modelo a velocidade muda de camada para camada, pois a área é variável conforme a altura. O tempo t , considerado nas simulações foi de 30 segundos.

Com as expressões a seguir calculou-se área, volume e velocidade para cada camada do tubo, utilizadas para realizar as simulações do modelo.

3.2 EXPRESSÕES UTILIZADAS NA SIMULAÇÃO

O tubo com geometria variável apresenta áreas, volumes e velocidades diferentes para cada camada, em função de sua altura, conforme figura abaixo.

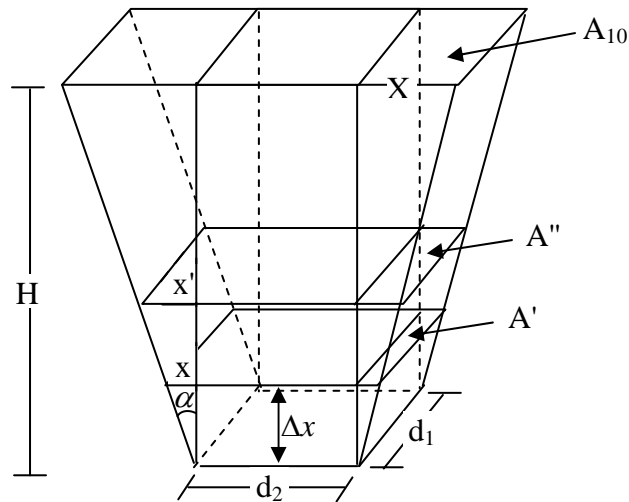


Figura 10: Tubo (tronco de pirâmide) utilizado para realização das simulações

3.2.1 Expressões para a área de cada seção do tubo.

A área de cada seção foi calculada com as seguintes expressões:

$$A_0 = d_1 \cdot d_2 \quad (3.9)$$

A_0 é a área da base inferior do tubo.

A área superior do tubo, (A) é dada por:

$$A = aA_0 \quad (3.10)$$

Neste trabalho, o tubo utilizado possui a área superior como o dobro da área inferior, então $a = 2$.

Pela figura 10, pode-se encontrar a seguinte expressão:

$$A = 2A_{10} + A_0 \quad (3.11)$$

onde A_{10} é a área pequena, do topo do tubo conforme figura 10.

Igualando as expressões (3.10) e (3.11), tem-se:

$$A_{10} = \frac{A - A_0}{2} = \frac{aA_0 - A_0}{2} = \frac{A_0}{2}. \quad (3.12)$$

Com as relações da tangente de α tem-se:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{X}{H} \quad (3.13)$$

onde H é altura do tubo.

Pela figura 10, pode-se encontrar outras relações para a $\operatorname{tg} \alpha$.

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x}{\Delta x} \quad (3.14)$$

e

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x'}{2\Delta x} \quad (3.15)$$

Igualando as expressões (3.14) e (3.15) tem-se a seguinte relação:

$$x' = 2x \quad (3.16)$$

Das expressões (3.13) e (3.14) tem-se:

$$x = \frac{X \Delta x}{H} \quad (3.17)$$

A área A_{10} pode ser escrita conforme a expressão abaixo:

$$A_{10} = Xd_1 \quad (3.18)$$

então X é

$$X = \frac{A_{10}}{d_1} \quad (3.19)$$

Substituindo (3.19) em (3.17), tem-se:

$$x = \frac{A_{10}\Delta x}{Hd_1} \quad (3.20)$$

Substituindo (3.12) em (3.20) tem-se:

$$x = \frac{A_0\Delta x}{2Hd_1} \quad (3.21)$$

A área superior da primeira camada pode ser calculada pela expressão abaixo

$$A_1 = 2A' + A_0 \quad (3.22)$$

onde,

$$A' = xd_1 \quad (3.23)$$

Substituindo-se (3.23) na equação (3.22) tem-se:

$$A_1 = 2xd_1 + A_0 \quad (3.24)$$

Substituindo (3.21) em (3.24) tem-se a expressão final para a área da primeira camada:

$$A_1 = A_0 \left(\frac{\Delta x}{H} + 1 \right) \quad (3.25)$$

Repetindo os cálculos para a próxima área da secção tem-se:

$$A_2 = 2A'' + A_0 \quad (3.26)$$

onde,

$$A'' = x' d_1 \quad (3.27)$$

Substituindo-se (3.27) em (3.26) tem-se:

$$A_2 = 2x' d_1 + A_0 \quad (3.28)$$

Substituindo-se (3.16) em (3.28) tem-se:

$$A_2 = 2(2x d_1) + A_0 = 4x d_1 + A_0 \quad (3.29)$$

Substituindo-se (3.21) em (3.29) tem-se a expressão final para área da segunda camada.

$$A_2 = A_0 \left(\frac{2\Delta x}{H} + 1 \right) \quad (3.30)$$

A expressão de recorrência para área de cada seção em função de A_0 (área da base inferior) é dada por:

$$A_n = A_0 \left(\frac{n\Delta x}{H} + 1 \right) \quad (3.31)$$

Para este trabalho, $H = 1m$ e n é o número da camada considerada.

3.2.2 Expressões para o volume de cada camada do tubo.

O tubo com geometria variável apresenta diferentes valores para o volume de grãos de cada camada, conforme as expressões a seguir:

Para a primeira camada:

$$V_1 = V_0 + V_1' \quad (3.32)$$

onde

$$V_0 = A_0 \Delta x \quad (3.33)$$

e

$$V_1' = x d_1 \Delta x \quad (3.34)$$

Substituindo a expressão para x (3.21) em (3.34) tem-se:

$$V_1' = \frac{A_0 \Delta x^2}{2H} \quad (3.35)$$

Substituindo-se (3.33) e (3.35) em (3.32) tem-se:

$$V_1 = A_0 \Delta x + \frac{A_0 \Delta x^2}{2H} = A_0 \Delta x \left(1 + \frac{\Delta x}{2H} \right) \quad (3.36)$$

Para a segunda camada, considera-se os seguintes volumes:

$$V_2 = V_0 + V_2' - V_1' \quad (3.37)$$

onde

$$V_2' = x' d_1 2\Delta x \quad (3.38)$$

Substituindo-se (3.16) e (3.21) na equação (3.38) tem-se:

$$V_2' = \frac{2A_0\Delta x^2}{H} \quad (3.39)$$

Substituindo-se as expressões (3.35), (3.39) em (3.37), tem-se:

$$V_2 = A_0\Delta x + \frac{2A_0\Delta x^2}{H} - \frac{A_0\Delta x^2}{2H} = A_0\Delta x \left(1 + \frac{3\Delta x}{2H} \right) \quad (3.40)$$

Esta é a expressão correspondente para o V_2 , volume total da segunda camada.

A expressão de recorrência para o cálculo do volume de cada camada é dada por:

$$V_n = A_0\Delta x \left(1 + \frac{(2n-1)\Delta x}{2} \right) \quad (3.41)$$

3.2.3 Expressões para a velocidade do ar em cada camada do tubo.

O tubo com geometria variável apresenta diferentes valores para a velocidade do ar em cada camada.

Para o cálculo de v_0 (velocidade de entrada na base inferior no tronco de pirâmide), tem-se:

$$Q = v_0 A_0 \quad (3.42)$$

$$v_0 = \frac{Q}{A_0} \quad (3.43)$$

Para o cálculo de v_1 , velocidade do ar na entrada da primeira camada do tubo:

$$v_1 A_1 = v_0 A_0 \quad (3.44)$$

$$v_1 = \frac{v_0 A_0}{A_1} = \frac{v_0 A_0}{A_0(\Delta x + 1)} = \frac{v_0}{(\Delta x + 1)} \quad (3.45)$$

onde, substituiu-se A_1 pela expressão (3.25) na equação (3.45).

Para encontrar a velocidade do ar que entra na n-ésima camada tem-se:

$$v_n A_n = v_0 A_0 \quad (3.46)$$

$$v_n = \frac{v_0 A_0}{A_n} \quad (3.47)$$

Substituindo-se (3.31) em (3.47) tem-se:

$$v_n = \frac{v_0}{(n\Delta x + 1)} \quad (3.48)$$

A expressão dada em (3.48), fornece a velocidade do ar na entrada da n-ésima camada do tubo.

Com as novas expressões para área, equação (3.31), volume equação (3.41) e velocidade do ar equação (3.48) nas camadas de grãos, substituiu-se essas expressões nas equações dadas pelo modelo, para a temperatura (3.6), a massa de grãos (3.7) e a massa de ar (3.8) de cada camada do tubo. Realizou-se as simulações numéricas e comparou-se com os dados experimentais que são apresentados nas figuras da próxima seção.

3.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM OS DADOS EXPERIMENTAIS

Nas figuras 11 a 14 temos as temperaturas da massa de grãos em função do tempo para diferentes seções do tubo e diferentes velocidades, tanto em termos dos dados obtidos experimentalmente quanto das simulações numéricas.

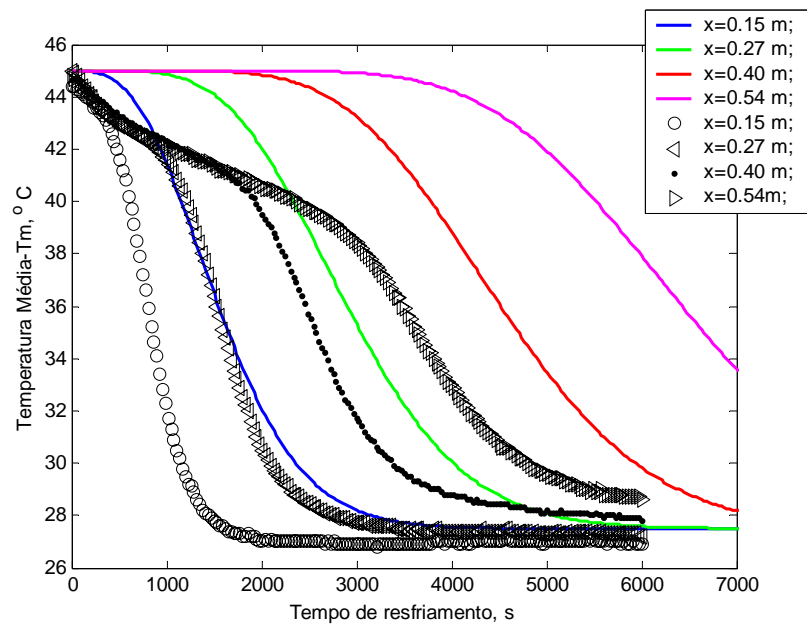


Figura 11: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes seções do tubo e $v = 0,11$ m/s. Simulação (linhas), dados experimentais (valores discretos)

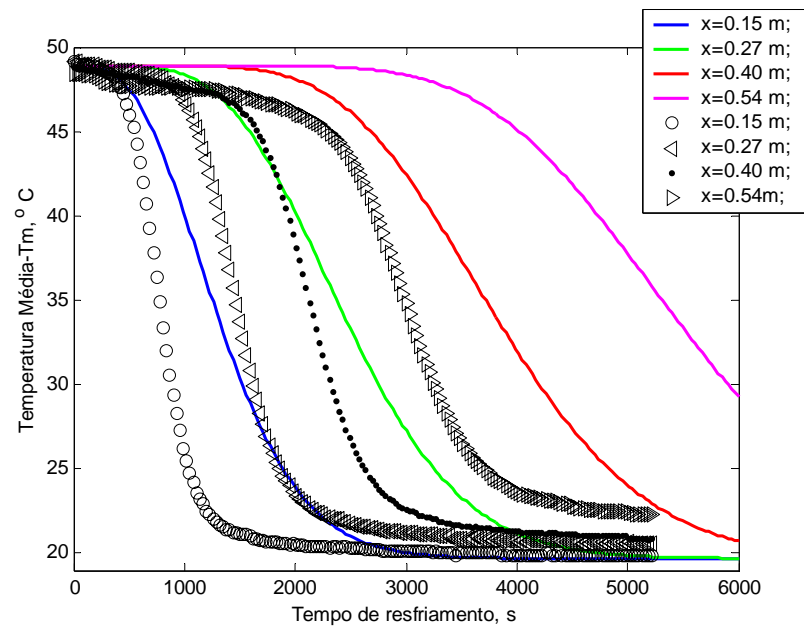


Figura 12: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes seções do tubo e $v = 0,13$ m/s. Simulação (linhas), dados experimentais (valores discretos)

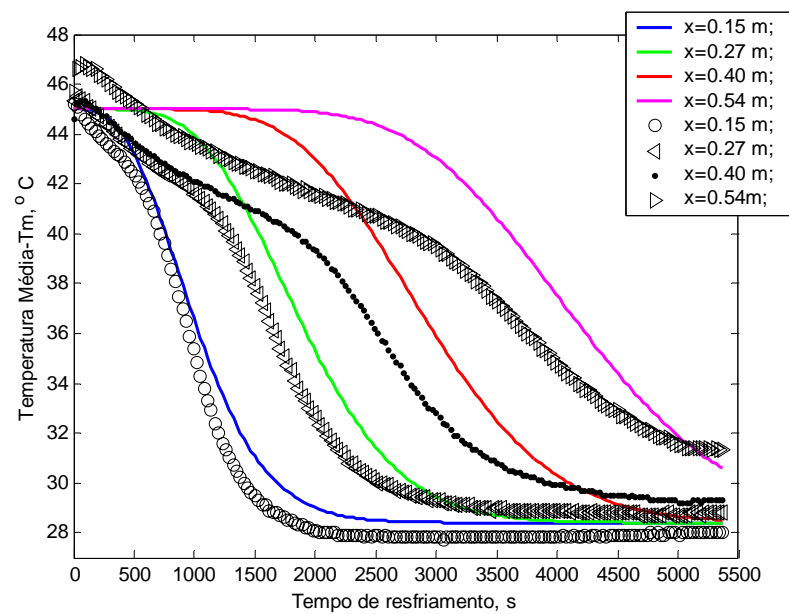


Figura 13: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes seções do tubo e $v = 0,17$ m/s. Simulação (linhas), dados experimentais (valores discretos)

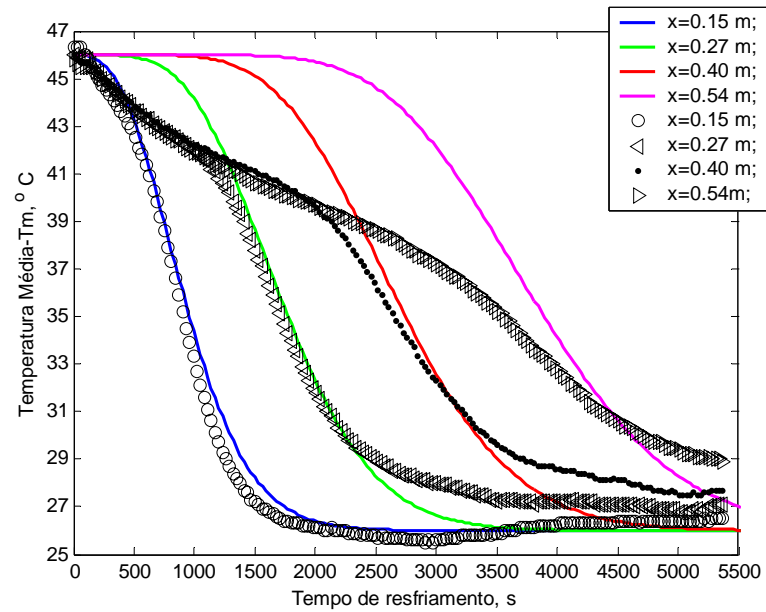


Figura 14: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes seções do tubo e $v = 0,19\text{m/s}$. Simulação (linhas), dados experimentais (valores discretos)

Observamos que as curvas obtidas com a simulação utilizando o modelo do Reator Ideal Homogêneo, não se aproximam satisfatoriamente dos dados experimentais. A simulação do resfriamento da massa de grãos ocorre de maneira mais lenta. Pela hipótese utilizada neste trabalho isto ocorre, porque existe equilíbrio térmico entre a superfície do grão e o ar que atravessa a camada, pois é apenas uma percentagem da massa de grãos em cada camada participa das trocas de calor com o ar. Com isto, a massa de grãos m_g deveria ser corrigida de um fator γ (massa efetiva).

No próximo capítulo, utilizando-se o Problema Inverso, pretende-se calcular este fator para as diferentes velocidades do ar de aeração, utilizadas neste trabalho.

4 MODELO REATOR IDEAL HOMOGENEO MODIFICADO

4.1 RESOLUÇÃO DO PROBLEMA INVERSO

Para resolução do Problema Inverso, utilizamos o Método de Levenberg-Marquardt Özisik, (2000). Neste método a solução para a estimação dos parâmetros desconhecidos y , com $0 \leq y \leq 1$, para cada valor diferente de velocidade, é baseada na minimização da norma dos mínimos quadrados dada por:

$$F(y) = \sum_{i=1}^M [T_{i\text{exp}} - T_i(y)]^2 \quad (4.1)$$

onde,

F - soma de erros quadrados ou função objetivo;

$T_{i\text{exp}}$ - temperatura medida experimentalmente nos tempos t_i ;

$T_i(y)$ - temperatura estimada nos tempos t_i , simulada;

M - número total de medidas desconhecidos;

y - vetor de parâmetros desconhecidos.

As temperaturas estimadas $T_i(y)$ foram obtidas da solução do problema direto, utilizadas para a correta estimativa dos parâmetros desconhecidos y .

Para minimizar a norma dos mínimos quadrados dada pela equação (4.1), é necessário igualar a zero as derivadas de $F(y)$ com respeito à y , conforme a expressão a seguir:

$$f(y) = \frac{dF}{dy} = 2 \sum_{i=1}^M [T_{i\text{exp}} - T_i(y)] \left(-\frac{dT_i(y)}{dy} \right) = 0 \quad (4.2)$$

A expressão acima torna-se

$$f(y) = \sum_{i=1}^M \left[T_i(y) \frac{dT_i(y)}{dy} - T_{i\text{exp}} \frac{dT_i(y)}{dy} \right] = 0 \quad (4.3)$$

As expressões a seguir mostram o cálculo da derivada $\frac{dT_i(y)}{dy}$.

Para realizar o cálculo da derivada acima utilizou-se a expressão (3.6), calculada a partir do modelo do Reator Ideal Homogêneo.

Onde,

$$T_i = \frac{c_g m_g T_g + c_{pa} m_a T_a}{m_g c_g + m_a c_{pa}} \quad (4.4)$$

As expressões para massa do grão corrigida e para massa do ar são apresentadas abaixo:

$$m_g = \rho_g V(1 - \varepsilon)y \quad (4.5)$$

Onde y varia $0 \leq y \leq 1$, caracterizando a percentagem de massa do grão que será utilizada para o equilíbrio térmico com o ar (massa efetiva).

$$m_a = \rho_a v \varepsilon A t \quad (4.6)$$

Substituindo a expressão (4.5) em (4.4), tem-se:

$$T_i = \frac{c_g \rho_g V(1 - \varepsilon)y T_g + c_{pa} T_a m_a}{\rho_g V(1 - \varepsilon)y c_g + m_a c_{pa}} \quad (4.7)$$

Para calcularmos a derivada $\frac{dT_i(y)}{dy}$, utilizando-se a regra da cadeia resulta na expressão abaixo.

$$\frac{dT_i}{dy} = \frac{dm_g}{dy} \frac{dT_i}{dm_g} \quad (4.8)$$

A derivada da massa de grãos com relação à y é dada por:

$$\frac{dm_g}{dy} = \rho_g V (1 - \varepsilon) \quad (4.9)$$

A derivada da temperatura em relação à massa de grãos foi calculada e a expressão é mostrada abaixo:

$$\frac{dT_i}{dm_g} = \frac{c_g m_a c_{pa} [T_g - T_a]}{(m_g c_g + m_a c_{pa})^2} \quad (4.10)$$

Substituindo-se os resultados obtidos em (4.9) e (4.10) em (4.8) tem-se:

$$\frac{dT_i(y)}{dy} = \frac{\rho_g V (1 - \varepsilon) c_g m_a c_{pa} (T_g - T_a)}{(m_g c_g + m_a c_{pa})^2} \quad (4.11)$$

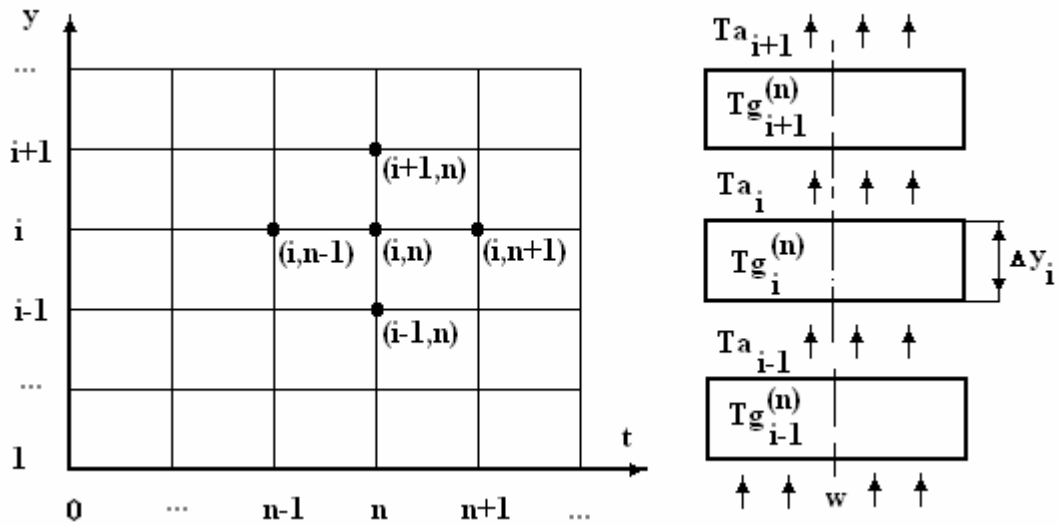
Substituindo-se na equação (4.11) as expressões para a massa do grão e do ar, equações (4.5) e (4.6) a expressão final para a derivada $\frac{dT_i}{dy}$ é dada por

$$\frac{dT_i}{dy} = \frac{\rho_g (1 - \varepsilon) V c_g \rho_a v \varepsilon A t c_{pa} (T_g - T_a)}{(c_g \rho_g (1 - \varepsilon) V y + \rho_a v \varepsilon A t c_{pa})^2} \quad (4.12)$$

Assim a função $f(y)$ é dada pela expressão a seguir:

$$f(y) = \sum_{i=1}^M \left[T_i(y) \left(\frac{\rho_g (1 - \varepsilon) V c_g m_a c_{pa} (T_g - T_a)}{(c_g \rho_g (1 - \varepsilon) V y + m_a c_{pa})^2} \right) - T_{i \text{exp}} \left(\frac{\rho_g (1 - \varepsilon) V c_g m_a c_{pa} (T_g - T_a)}{(c_g \rho_g (1 - \varepsilon) V y + m_a c_{pa})^2} \right) \right] = 0 \quad (4.13)$$

Para realizar os cálculos, todo o domínio de integração $\Omega = \{(y,t) | 0 < y < L; 0 < t < t_{max}\}$ foi dividido em elementos retangulares com nodos em pontos $(y_i, t^{(n)}) \in \Omega; i = 1, 2, \dots, M; n = 0, 1, \dots, N$. A função continua desconhecida $T = T(y,t)$ foi substituída por conjunto dos pontos isolados $T_i^{(n)} \cong T(y_i, t^{(n)})$.



Discretização do domínio e esquema simplificado do processo de resfriamento utilizado no modelo 2.

Admitindo que o equilíbrio térmico entre o ar e o grão estabelece-se instantaneamente, isto é, o ar e os grãos em cada camada considerada sempre têm as temperaturas idênticas, a energia cedida pela massa de grãos em uma camada Δy_i por um tempo Δt seria igual à energia recebida pelo ar:

$$C_g \rho_g \Delta y_i A (1 - \varepsilon) (Tg_i^{(n)} - Tg_i^{(n+1)}) = C_{pa} \rho_a w A \varepsilon \Delta t \left(Tg_i^{(n+1)} - \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} Ta_{i-1}(\tau) d\tau \right). \quad (4.14)$$

Aplicando a regra de trapézios para cálculo da integral:

$$\frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} Ta_{i-1}(\tau) d\tau = \frac{Ta_{i-1}^{(n)} + Ta_{i-1}^{(n+1)}}{2} \quad (4.15)$$

que representa a temperatura média temporal do ar na entrada de camada “ i ” no intervalo $t \in [t^{(n)}, t^{(n+1)}]$ e considerando $Ta_{i-1}^{(n)} = Tg_{i-1}^{(n)}$; $Ta_{i-1}^{(n+1)} = Tg_{i-1}^{(n+1)}$, foi obtida a fórmula de recorrência para cálculo da temperatura das camadas de grãos em correspondentes momentos de tempo:

$$Tg_i^{(n+1)} = \frac{C_g \rho_g \Delta y_i (1 - \varepsilon) Tg_i^{(n)} + C_{pa} \rho_a w \varepsilon \Delta t (Tg_{i-1}^{(n)} + Tg_{i-1}^{(n+1)}) / 2}{C_g \rho_g \Delta y_i (1 - \varepsilon) + C_{pa} \rho_a w \varepsilon \Delta t}, \quad (4.16)$$

para $i = 1, 2, \dots, M$; $n = 0, 1, 2, \dots, N$.

Por analogia com o cálculo de parâmetros de reatores homogêneos, as camadas obtidas pela divisão espacial foram chamadas de “reatores homogêneos”.

4.2 GRÁFICO COM AS CURVAS $f(y)$ EM FUNÇÃO DE y

O gráfico abaixo apresenta os valores de $f(y)$ para diferentes valores de y , $0 \leq y \leq 1$ obtidos para as velocidades do ar de aeração utilizadas neste trabalho utilizando os valores experimentais para as quatro diferentes secções do tubo. Para as simulações numéricas foi utilizado o Software MATLAB, para construção dos programas.

??????????????

Figura 15: Valores de $f(y)$ em função de y para diferentes velocidades do ar

Pode-se observar pelo gráfico mostrado na figura 15 que, para cada valor da velocidade, apenas para um valor de y a função $f(y)$ apresenta o valor minimizado, com uma tolerância desejada de 1×10^{-4} .

4.3 MÉTODO DA BISSECÇÃO

Para calcularmos as raízes da função $f(y)$ equação (4.13), foi utilizado o método da Bissecção, Ruggiero (1996), porque o intervalo dos valores possíveis para y , $0 \leq y \leq 1$ era pequeno, e pela figura 15 notou-se que para cada uma das velocidades do ar de aeração

consideradas nesse trabalho era possível encontrar uma raiz para $f(y)$. O resultado calculado é apresentado na figura abaixo.

??????????

Figura 16: Gráfico apresentando valores de y para as diferentes velocidades de aeração utilizadas neste trabalho e o ajuste dos dados por mínimos quadrados.

A expressão encontrada para y , através do ajuste de curvas por mínimos quadrados, em função da velocidade do ar de aeração é dada por:

$$y = -0,0271 + 4,975v \quad (4.17)$$

Com a equação (4.14) tem-se a nova expressão para a massa de grãos.

$$m_g = \rho_g (1 - \varepsilon) V (-0,0271 + 4,975v) \quad (4.18)$$

Pode-se notar pela análise do gráfico mostrado na figura 16 que, à medida que a velocidade de aeração aumenta, os valores de y aproximam-se de 1, caso ideal (Modelo do Reator Ideal Homogêneo). Por hipótese isso ocorre uma vez que, com o aumento da velocidade do ar, a transferência de calor do grão para o ar aumenta, conseqüentemente toda a massa do grão participa do equilíbrio térmico com o ar (efeito de superfície são desprezíveis neste caso).

Pode-se observar também que há um intervalo de velocidades em que este modelo de Reator Ideal Homogêneo modificado pode ser utilizado, sendo que neste intervalo estão às velocidades tipicamente utilizadas para realizar a aeração.

Os valores de y que melhor aproximam os resultados obtidos com a simulação dos resultados obtidos com os dados experimentais são mostrados nas figuras abaixo:

4.4 DADOS EXPERIMENTAIS X SIMULAÇÃO

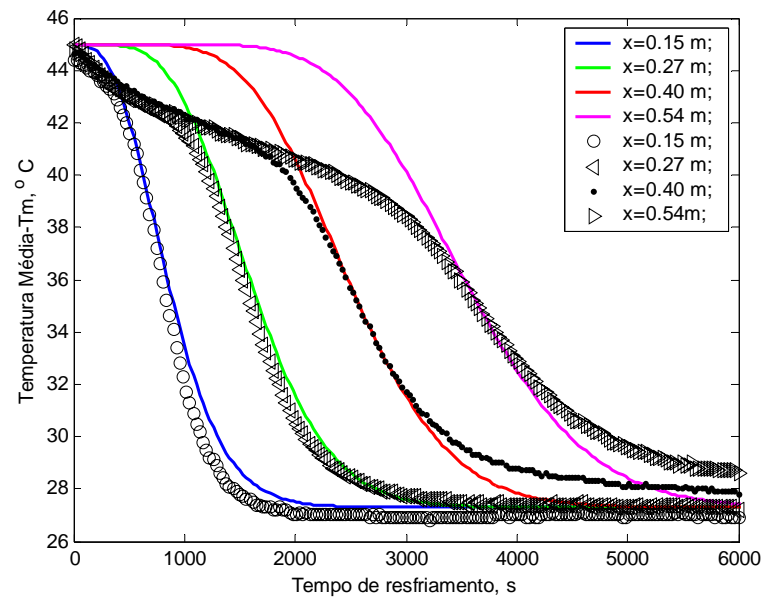


Figura 17: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes seções do tubo e $v = 0,11$ m/s. Simulação (linhas), dados experimentais (Valores discretos), com $y = 0,52$

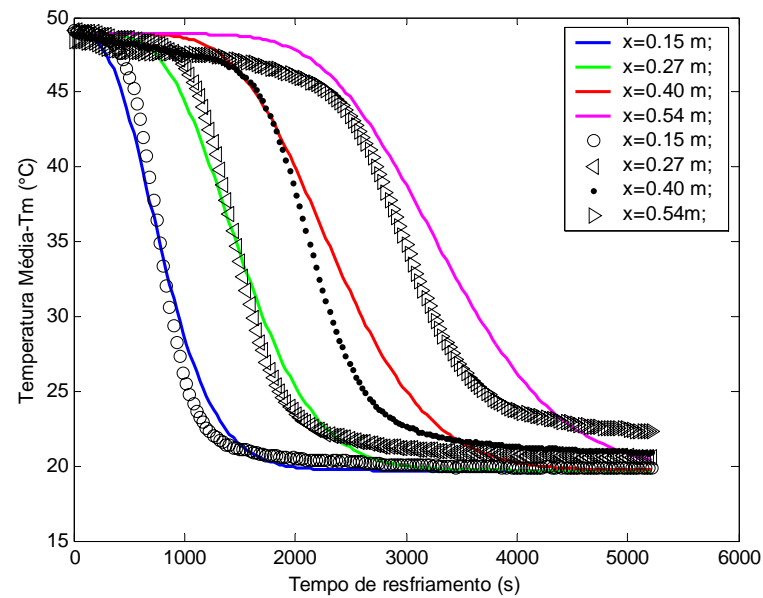


Figura 18: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes seções do tubo e $v = 0,13$ m/s. Simulação (linhas), dados experimentais (Valores discretos), com $y = 0,62$

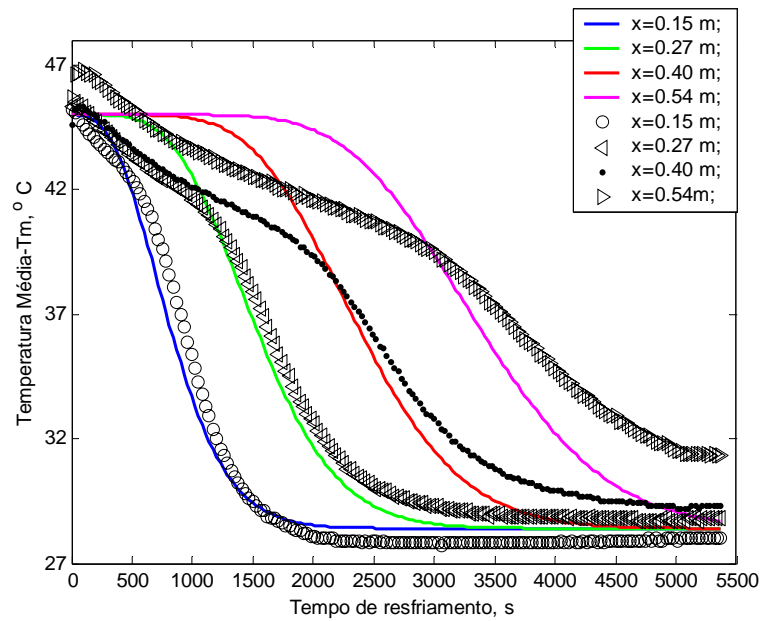


Figura 19: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes seções do tubo e $v = 0,17$ m/s. Simulação (linhas), dados experimentais (Valores discretos), com $y = 0,81$.

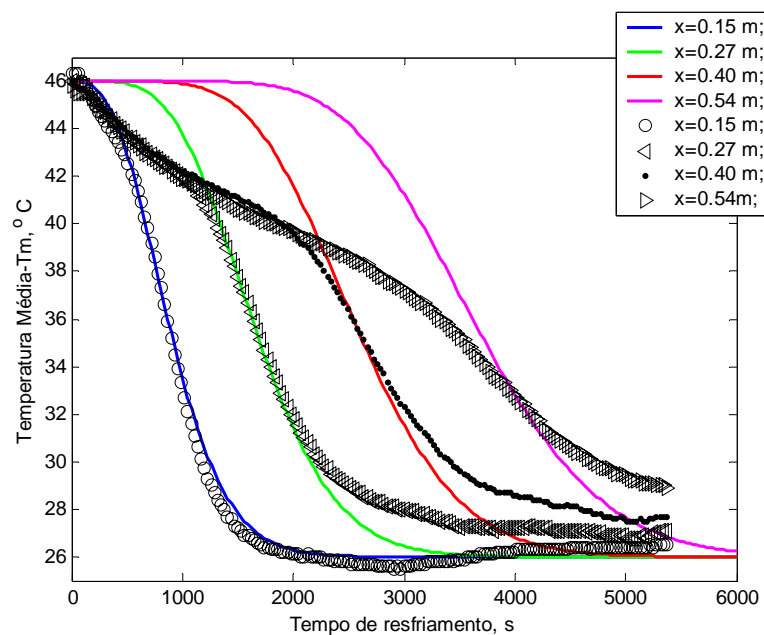


Figura 20: Temperatura da massa de grãos em função do tempo para diferentes seções do tubo e $v = 0,19$ m/s. Simulação (linhas), dados experimentais (Valores discretos), com $y = 0,89$

Pelos gráficos apresentados nas figuras acima, pode-se notar que os valores para as temperaturas simuladas pelo modelo, utilizando a massa efetiva de grãos, apresentam boa concordância com os dados experimentais. Nota-se que no início do resfriamento, os dados

experimentais diferem significativamente dos valores simulados, não apresentam o platô que ocorre nas simulações. Esta discrepância está associada com as perdas de calor que ocorrem nas laterais do tubo, apesar do isolamento térmico.

CONCLUSÕES

O modelo do Reator Ideal Homogêneo (modelo de camadas), proposto por Miranda, (2005) para tratar a distribuição de temperatura da massa de grãos em silos com aeração, apresentou bons resultados quando utilizado para geometria constante (tubo cilíndrico), mas quando comparado com o caso de geometria variável (tubo tronco de pirâmide), os resultados não foram satisfatórios.

Foi proposto, neste trabalho, modificar o modelo matemático, considerando que a massa do grão que entra em equilíbrio com o ar de aeração é uma massa menor (efetiva) em cada camada. O interior do grão permanece com temperatura alta e não entra em equilíbrio com a temperatura do ar que atravessa a camada de grãos.

Neste trabalho, realizou-se experimentos com o tubo (tronco de pirâmide) que possui geometria variável, isolado termicamente. As expressões matemáticas para área da secção, volume e velocidade do ar de aeração variando em função de sua altura em cada camada foram deduzidas neste trabalho e utilizadas nas simulações numéricas.

Neste trabalho, foram comparados os dados experimentais com os resultados obtidos via simulação, realizada com o modelo do Reator Ideal Homogêneo, Miranda (2005). Notou-se que as curvas de resfriamento dos grãos obtidas com a simulação apresentaram um comportamento mais lento quando comparadas com os dados experimentais.

Pela hipótese do trabalho, introduziu-se um fator (função) y , na expressão para a massa de grãos contida em cada camada do tubo.

Resolvendo-se primeiramente pelo Problema Inverso, baseado na minimização da norma dos mínimos quadrados, encontrou-se uma expressão que relaciona a função y (percentagem da massa de grãos que entra em equilíbrio térmico com o ar em cada camada) com a velocidade de aeração.

Foi utilizado o método da Bisseção para calcular os possíveis valores de y para as velocidades do ar de aeração utilizadas nos experimentos. Através do ajuste de curvas por

mínimos quadrados encontrou-se a função y , a qual foi introduzida na expressão da massa de grãos, modificando o modelo do Reator Ideal Homogêneo.

Realizou-se simulações numéricas com o modelo modificado, observando-se que as curvas do resfriamento da massa de grãos obtidas com a simulação apresentaram boa concordância quando comparadas com os dados experimentais, concluindo-se que o modelo do Reator Ideal Homogêneo pode ser utilizado para o caso de resfriamento de grãos em tubos de geometria variável, corrigindo-se a massa de grãos pelo fator y .

Em continuidade a esse trabalho propõe-se o estudo do Modelo do reator Ideal Homogêneo considerando o caso bidimensional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAGUSUNDARAM, K., JAYAS, D.S.WHITE, N.D.G. & MUIR, W.E. **Three-dimensional, finite element, heat model of temperature distribution in grain storage bins.** Transactions of the ASAE, vol.33, n.2, pp.577-584, 1990.

ANDRADE, E.T.; MOLIN, L. COUTO S. M. CARDOSO. E.G. **Distribuição de Temperatura em Grãos Armazenados em Silos: Modelagem por Elementos Finitos.** Revista Brasileira de Armazenamento. Viçosa-MG (26), pg.28-35. 2001.

BORGES, P.A.P. **Modelagem Matemática dos Processos envolvidos nos Sistemas de Secagem Armazenamentos de Grãos.** Tese de Doutorado. Porto Alegre-RS, 2002.

BROOKER, D.B., BAKKER-ARKEMA, F.W., AND HALL, C.W. **Drying Cereal Grains.** AVI Publishing Co.Inc., Westport, CT. 5 ed., 1982.

CHANG, C. S., CONVERSE, H. H. & STEELE, J. L., 1993. **Modeling of Temperature of Grain During Storage With Aeration.** Transactions of the ASAE, vol. 37, n. 6, pp. 1891 – 1898.

CHANG, C. S., CONVERSE, H. H. & STEELE, J. L. **Development and Evaluation of Aeration Control Strategies for Maintaining Stored Grain.** Applied Engineering in Agriculture, vol.11, n.4, pp. 577-582, 1995.

DAL TOÉ, M.C. **Resolução Numérica do Problema Inverso para Escoamento do Ar em Silos.** Dissertação de Mestrado. Ijuí-RS, 2005.

JIANG, S. AND JOFRIED, J. C. **Finite Element Prediction of Silage Temperatures in Tower Silos.** Transactions of the ASAE, pp. 1744 – 1750, 1987.

KHATCHATOURIAN, O.A.; OLIVEIRA, F.A. AND TONIAZZO, N.A, **Mathematical Modelling of Thermal State in Large Aerated Grain Storage.** Proceedings of COBEN 2005-18th International Congress of Mechanical Engineering. Ouro preto-MG, Brasil.

KHATCHATOURIAN, O.A. AND OLIVEIRA, F.A., “**Mathematical Modelling of air flow and thermal state in large aerated grain storage.**” Biosystems Engineering. 95, 2(2006), 159-169.

KHATCHATOURIAN, O.A.; SAVICKI, D.L. **Mathematical Modelling of Airflow in an Aerated Soya Bean Store under Non-uniform Conditions.** Biosystems Engineering, (2004) 88 (2), 201-211.

LASSERAN, J.C. **Aeração de Grãos.** Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, Série Centreinar, n.2, Viçosa-MG, 1981.

LOPES, V.L.R. E RUGGIERO, M.A.G. **Cálculo Numérico Aspectos Computacionais.** Markron Books. São Paulo-SP, 1996.

MANBECK, H. B. AND BRITTON, M.G. **Prediction of bin wall declines.** Transaction of the ASAE, vol.31, n.6, pp.1767-1773, 1988.

MENEGOL, A. P. **Modelagem Matemática do Resfriamento da massa de Grãos de Soja.** Dissertação de Mestrado. Ijuí.-RS, 2005.

MIRANDA, A.A., **Modelagem Matemática do Resfriamento de Grãos de Soja em Silos com Aeração utilizando o Modelo de Reator Ideal Homogêneo.** Dissertação de Mestrado. Ijuí-RS, 2005.

ÖZISIK, M.N. AND ORLANDE, H.R.B., **Inverse Heat Transfer: Fundamentals and Applications.** Taylor Francis, New York, 2000.

PEREIRA, J.A.M. **Aeração de Grãos – Fundamentos e Manejo.** Centreinar, Viçosa – MG. Notas de aula mimeografada, 1995.

PUZZI, D. **Conservação dos Grãos Armazenados.** São Paulo. Ed. Agronômica Ceres Ltda.

PUZZI, D. **Manual de Armazenamento de grãos**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda.1977.

PUZZI, D. **Abastecimento e Armazenamento de grãos**. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, Campinas-SP, 1986.

QUEIROZ, D. M., VALENTE, D. S. M., 2004. **Determinação da Temperatura e Umidade dos Grãos durante o Processo de Aeração**. Jornal da armazenagem. Disponível em < www.centrear.org.br> Acesso em 28/06/05.

SAVICKI, D. L., **Modelagem Matemática do Processo de Aeração em Condições Não-Homogêneas da Massa de Grãos de Soja**. Dissertação de Mestrado, Ijuí-RS, 2001.

SILVA, J. S., **Estado da Arte da Secagem e Armazenagem de Grãos no Brasil**. Engenharia na Agricultura- Série Armazenamento, vol.3, n. 6, pp. 1-17.1993.

VELHO, H.F.C. **Problemas Inversos: Conceitos Básicos e Aplicações Mini-Curso.IV Encontro de Modelagem Computacional**. Nova Friburgo-RJ.

TONIAZZO, N., **Modelagem Matemática do Escoamento do Ar em Sistemas de Armazenamento de Grãos**. Dissertação de Mestrado. Ijuí-RS, 1997.

WEBER, É. A. **Excelência em Beneficiamento e Armazenagem de Grãos**.Panambi-RS 2005.

WEBER, É. A., 1995. **Armazenagem Agrícola**. Porto Alegre. Ed. LA SALLE.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)