



UM PROGRAMA COMPUTACIONAL INTERATIVO COM O USUÁRIO APLICADO AO ESTUDO DA SECAGEM

Maurício C. Mancini^(*) – e-mail: mancini@ufrj.br

Neuton S. Soares – e-mail: neuton@ufrj.br

Tobias C.C.M. Andrade – e-mail: tobiasandrade@bol.com.br

Marcelo C. Amaral – e-mail: marceloeqm@bol.com.br

Márcia P. Vega – vega@ufrj.br

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – Instituto de Tecnologia

Departamento de Engenharia Química – Laboratório de Sistemas Particulados

Caixa Postal: 74578 – Seropédica – RJ – 23851-970

(*) Autor para quem as correspondências devem ser enviadas.

Resumo: *No presente trabalho foi implementado um programa computacional para a simulação e estimação de parâmetros em sistemas de secagem de grãos. O sistema interage com o usuário através de uma série de janelas para entradas e saídas de dados, configuração dos sistemas de secagem considerados, seleção de equipamentos e materiais a secar. O programa opera com dois módulos integrados, um que possibilita a simulação de secadores de leito deslizante, com as configurações de fluxos concorrentes, contracorrentes e cruzados, a avaliação das curvas de secagem, teores finais de umidade do grão e do gás e respectivas temperaturas de saída, podendo ser utilizado também na determinação das condições ótimas de secagem. O segundo módulo possibilita a simulação computacional e a determinação dos parâmetros cinéticos de correlações para o coeficiente volumétrico global de transferência de massa em sistemas de secagem em camada delgada. Devido ao alto grau de interatividade entre sistema e usuário, o programa implementado pode ser direcionado para a aplicação em ensino de operações unitárias, possibilitando a rápida compreensão dos efeitos das variáveis operacionais sobre as condições de saída do produto desejado e as diferentes características dos secadores considerados.*

Palavras-chave: *Secadores de grãos, Leito deslizante, Leito fixo, Secagem de alimentos.*

1. INTRODUÇÃO

O estudo da secagem de grãos com secadores de leito deslizante e fluxos concorrentes, contracorrentes e cruzados, assim como em secadores de leito fixo e camada delgada, tem sido cada vez mais valorizado, tendo em vista a ampla utilização de equipamentos contínuos de secagem e a grande influência desta operação sobre a qualidade do produto.

No presente trabalho é feita uma complementação do programa computacional aplicado à simulação do secador de leito deslizante e fluxos concorrentes, apresentado no trabalho de PEREIRA e MANCINI (1998). Foram introduzidas modificações no programa original, de modo a viabilizar, também, a simulação de secadores de leito deslizante com fluxos contracorrentes e cruzados, como também, a implementação de um módulo relativo à simulação computacional e à estimação de parâmetros em secadores de leito fixo e camada delgada.

A característica fundamental desse trabalho é a implementação de um programa computacional direcionado ao estudo da secagem de material particulado, que possa ser utilizado

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

O modelo de coeficientes globais foi utilizado para descrever a operação de secagem em leito deslizante e em leito fixo e camada delgada. Este modelo atribui a cada ponto do sistema a existência de uma fase fluida, formada por gás seco e água vapor, e uma fase sólida, formada por sólido seco e água líquida. O programa oferece ainda a opção de simular e estimar parâmetros relativos à secagem em leito fixo e camada delgada usando o modelo de Overhults, um modelo empírico, baseado no primeiro termo da série que descreve a difusão de massa em uma partícula esférica.

O detalhamento das equações dos modelos, com as simplificações adotadas para cada caso de interesse, são apresentados nos trabalhos de CALADO (1993) e MANCINI (1996).

No caso de secadores de leito deslizante, pressupõe-se a operação contínua e em regime permanente, além de se admitir escoamento unidirecional e empistonado de cada fase dentro do secador. Para o secador de leito fixo e camada delgada, admite-se equilíbrio térmico instantâneo e que as propriedades físicas, a temperatura e a umidade absoluta do gás são constantes.

Na Tabela 1 é apresentado um resumo das equações utilizadas em cada configuração e também das condições de contorno e inicial aplicáveis a cada sistema.

Tabela 1 – Equações dos modelos utilizados

Coeficientes Globais – Fluxos Concorrentes			
Fase Sólida	$\frac{dY_s}{dz} = -\frac{f}{G_s}$	$G_s(Cp_s + Y_s Cp_l) \frac{dT_s}{dz} = ha(T_g - T_s) - f\lambda$	$Y_s(0) = Y_{so}$ $T_s(0) = T_{so}$
Fase Fluida	$\frac{dY_g}{dz} = \frac{f}{G_g}$	$G_g(Cp_g + Y_g Cp_v) \frac{dT_g}{dz} = -ha(T_g - T_s) + f\lambda$	$Y_g(0) = Y_{go}$ $T_g(0) = T_{go}$
Coeficientes Globais – Fluxos Contracorrentes			
Fase Sólida	$\frac{dY_s}{dz} = -\frac{f}{G_s}$	$G_s(Cp_s + Y_s Cp_l) \frac{dT_s}{dz} = ha(T_g - T_s) - f\lambda$	$Y_s(0) = Y_{so}$ $T_s(0) = T_{so}$
Fase Fluida	$\frac{dY_g}{dz} = -\frac{f}{G_g}$	$G_g(Cp_g + Y_g Cp_v) \frac{dT_g}{dz} = ha(T_g - T_s) - f\lambda$	$Y_g(L_z) = Y_{go}$ $T_g(L_z) = T_{go}$
Coeficientes Globais – Fluxos Cruzados			
Fase Sólida	$\frac{\partial Y_s}{\partial z} = -\frac{f}{G_s}$	$G_s(Cp_s + Y_s Cp_l) \frac{\partial T_s}{\partial z} = ha(T_g - T_s) - f\lambda$	$Y_s(x, 0) = Y_{so}$ $T_s(x, 0) = T_{so}$
Fase Fluida	$\frac{\partial Y_g}{\partial x} = \frac{f}{G_g}$	$G_g(Cp_g + Y_g Cp_v) \frac{\partial T_g}{\partial x} = -ha(T_g - T_s) + f\lambda$	$Y_g(0, z) = Y_{go}$ $T_g(0, z) = T_{go}$
Coeficientes Globais – Leito Fixo e Camada Delgada			
$Y_s(t) = Y_{se} + \frac{\left(\frac{\beta}{\alpha} - Y_{se}\right)}{[1 + (\omega - 1)\exp(-\omega\tau)]}$	$\omega = \frac{(\beta/\alpha - Y_{se})}{(Y_{so} - Y_{se})}$	$\tau = \frac{\alpha V_{sp}(Y_{so} - Y_{se})}{M_{ss}} t$	$Y_s(0) = Y_{so}$
Overhults			
$Y_s(t) = Y_{se} + (Y_{so} - Y_{se})\exp[-(kt)^n]$			$Y_s(0) = Y_{so}$
Equações Auxiliares			
$f = k_s a(Y_s - Y_{se})$	$k_s a = \alpha(T_g)Y_s - \beta(T_g)$	$ha = \left[p_1 \text{Re}^{p_2} \text{Pr}^{1/3} \right] (aK_g / D_p)$	$Y_{se} = \phi(T_s, UR)$



Nas equações acima tem-se: C_p - capacidade calorífica, D_p - diâmetro de partícula, f - taxa de secagem, ϕ - isoterma de secagem do grão, G - fluxo mássico em base seca, ha - coeficiente volumétrico de transferência de calor, λ - calor de vaporização da água, L_z - altura do secador, L_x - espessura do leito, $k_s a$ - coeficiente volumétrico de transferência de massa, Pr - número de Prandtl, Re - número de Reynolds baseado em D_p , T - temperatura, UR - umidade relativa do ar de secagem, V_{sp} - volume do sistema particulado, M_{ss} - massa de sólido seco, Y - umidade em base seca, z e x - variável independente espacial, t - variável independente temporal, K_g - condutividade térmica do gás, k e n - parâmetros do modelo de Overhults, α e β - parâmetros da correlação linear para o coeficiente global de transferência de massa.

Há ainda os subscritos, que representam: e - valor no equilíbrio, o - valor na alimentação, g - relativo ao gás seco ou à fase fluida, l - relativo à água líquida, s - relativo ao sólido seco ou à fase sólida, v - relativo ao vapor d'água.

3. O PROGRAMA COMPUTACIONAL

3.1 Estrutura do programa

O programa computacional foi elaborado em linguagem C e é composto de vários arquivos que realizam tarefas específicas tais como: seleção do tipo de secador, seleção da configuração do secador, seleção do tipo de grão a ser seco, seleção do modelo utilizado, seleção entre simulação computacional e estimação de parâmetros, entrada de dados, solução numérica de equações diferenciais ordinárias, solução de equações algébricas para o cálculo de propriedades do gás, no caso de secadores de fluxos cruzados ou da secagem em camada delgada, cálculo da umidade de equilíbrio do grão e saídas de resultados na forma gráfica, em arquivos de dados, impressos ou na tela.

É importante ressaltar que as entradas de dados do sistema, as saídas de resultados, a seleção de tipo de equipamentos e, também, do tipo de material a ser seco, bem como o fornecimento de dados específicos das rotinas numéricas, são feitos sempre através de menus ou janelas de entradas, o que possibilita um alto grau de interação com o usuário.

O pacote computacional implementado utiliza o método de Ruge-Kutta de quarta ordem para resolver o sistema de quatro equações diferenciais ordinárias que descrevem os secadores de leito deslizante e fluxos concorrentes ou contracorrentes, ou o sistema de $2 \cdot n$ equações diferenciais ordinárias, acoplado a $2 \cdot n$ equações algébricas, oriundo da discretização das equações diferenciais parciais que descrevem o secador de fluxos cruzados pelo método de diferenças finitas em n intervalos de discretização por zona de secagem.

Quando a configuração do secador é a de fluxos contracorrentes, as condições de contorno relativas à umidade e à temperatura do gás são dadas em $z = L_z$ (saída de grãos do secador). Deste modo, optou-se por resolver o sistema de 4 EDO's iterativamente, conforme foi feito com sucesso no trabalho de CALÇADA (1994) para simulação do secador de leito fixo. Neste caso é feita uma estimativa dos valores de $Y_g(0)$ e $T_g(0)$, o sistema resolve as equações diferenciais ordinárias e compara os valores de $Y_g(L_z)$ e $T_g(L_z)$ com os valores na entrada do gás, efetuando ajustes automáticos das estimativas de $Y_g(0)$ e $T_g(0)$ até convergência com precisão de 10^{-4} e 10^{-2} , respectivamente.

3.2 Fluxo de execução do programa

A versão 1.0 do programa, desenvolvida por PEREIRA e MANCINI (1998), disponibiliza apenas a simulação computacional do secador de leito deslizante e fluxos concorrentes. Este programa veio sofrendo modificações e atualizações ao longo do tempo, chegando à ver-

são apresentada neste trabalho.

O programa implementado encontra-se na sua versão 2.0, na qual foi efetuada a inserção do módulo de secagem em leito fixo e camada delgada, e complementado o módulo de simulação da secagem em leito deslizante, com a inserção das configurações de fluxos contracorrentes e cruzados. Além disso, foi ampliada a interação programa-usuário através de outras janelas para entrada e saída de dados e menus para seleção de atividades diversas.

A partir da versão 2.0 o programa passou a ser chamado **SIMSEC** e já está sendo amplamente utilizado pelos alunos dos cursos de graduação em Engenharia Química e Engenharia de Alimentos da UFRRJ em disciplinas e atividades de pesquisa.

Na Figura 1 são apresentadas as telas iniciais do programa. Estas telas correspondem a uma série de menus para a seleção dos módulos: (1) Simulação da secagem em leito deslizante e (2) Simulação e estimação de parâmetros na secagem em leito fixo e camada delgada.

Após a seleção do módulo de operação são apresentados outros menus para a seleção da configuração do escoamento e do material a secar, no caso da simulação da secagem em leito deslizante, ou da opção entre estimação de parâmetros ou simulação da secagem em leito fixo e camada delgada, bem como do modelo utilizado para descrever a secagem.

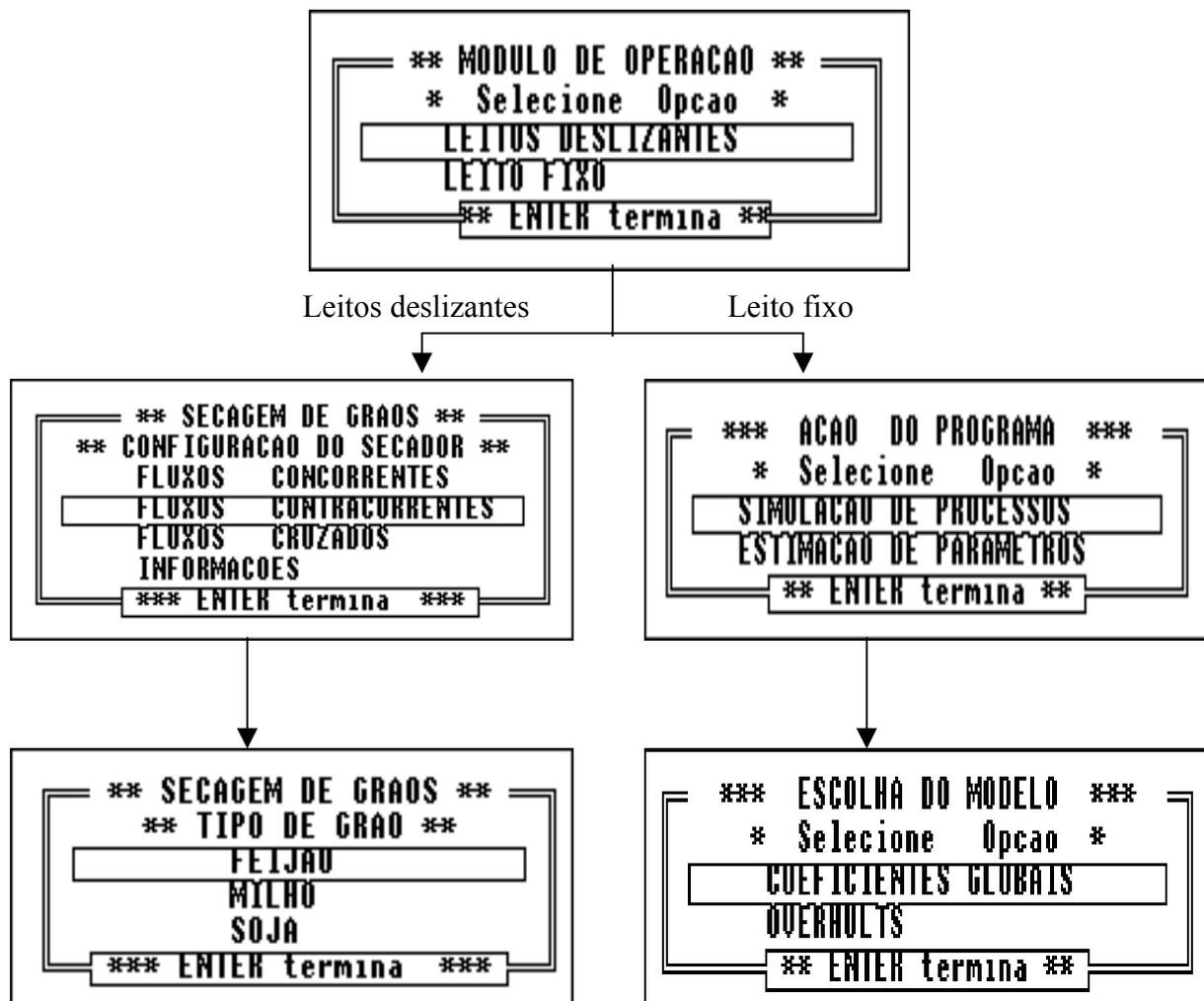


Figura 1 – Telas iniciais do programa: Menus de seleção do tipo de secador, das configurações de escoamento e do grão a secar, para a secagem em leito deslizante, ou da opção de ação na secagem em leito fixo e camada delgada e do modelo utilizado.

Após os menus de seleção, são apresentadas janelas para entradas de dados, de acordo com as opções selecionadas. Nas Figuras 2, 3 e 4 são apresentados os fluxos do programa para as opções de simulação da secagem em leito fixo (Figura 2), estimação de parâmetros na secagem em leito fixo (Figura 3) e simulação da secagem em leito deslizante (Figura 4).

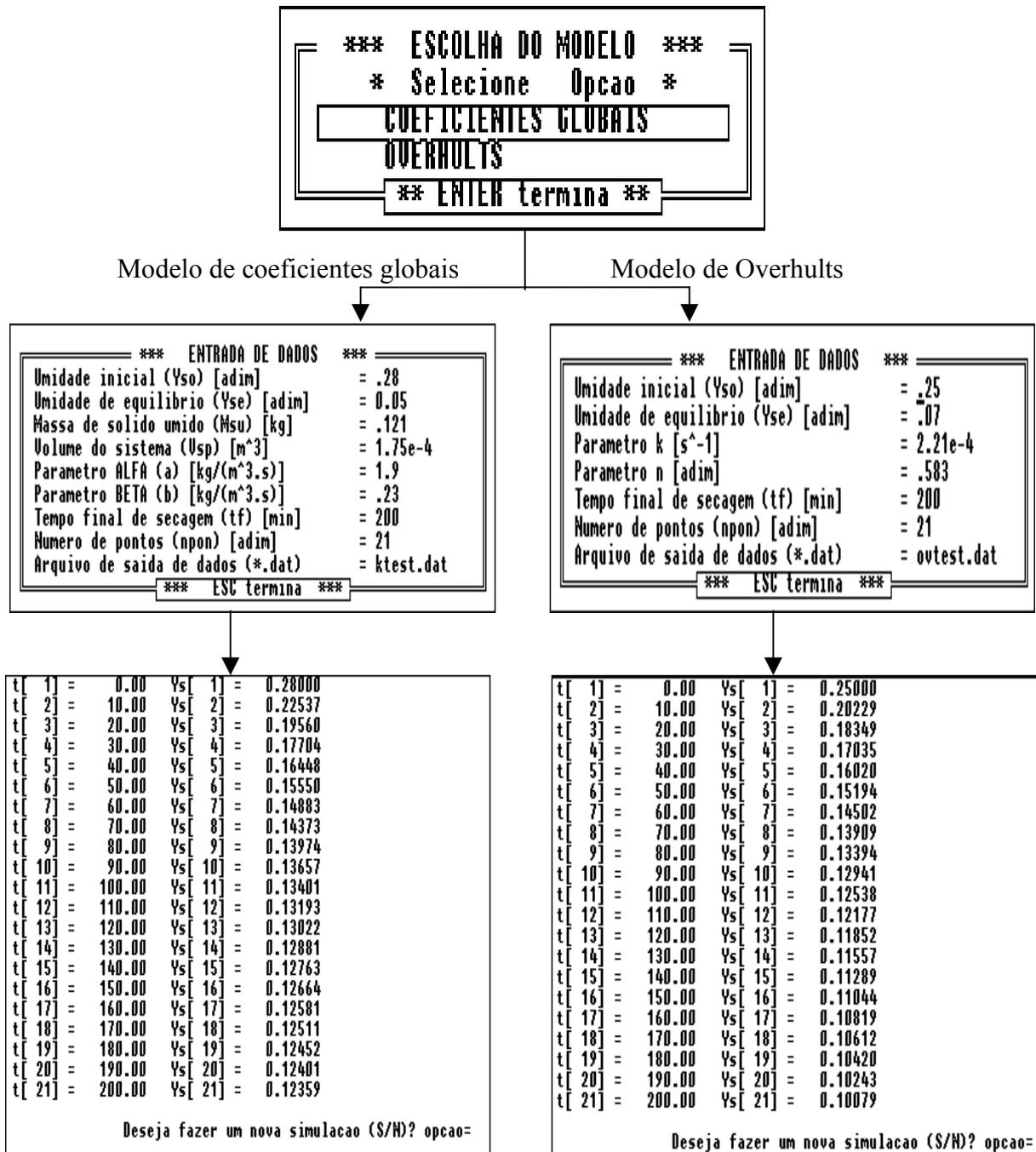


Figura 2 – Fluxo do programa para simulação da secagem em leito fixo e camada delgada.

Ao fornecer os dados necessários à simulação, o programa apresenta os resultados na tela e permite ao usuário escolher se deseja fazer nova simulação ou encerrar. Se a opção for encerrar o módulo de simulação, o programa gera um arquivo de dados (ASCII) com a curva de secagem gerada na última simulação.

Se a opção selecionada for a estimação de parâmetros, o programa exibe um menu para seleção da origem dos dados experimentais, as janelas de entradas de dados relativos à secagem e, também, uma janela para que o usuário forneça as faixas de valores dos parâmetros dos modelos, conforme pode ser visto na Figura 3.

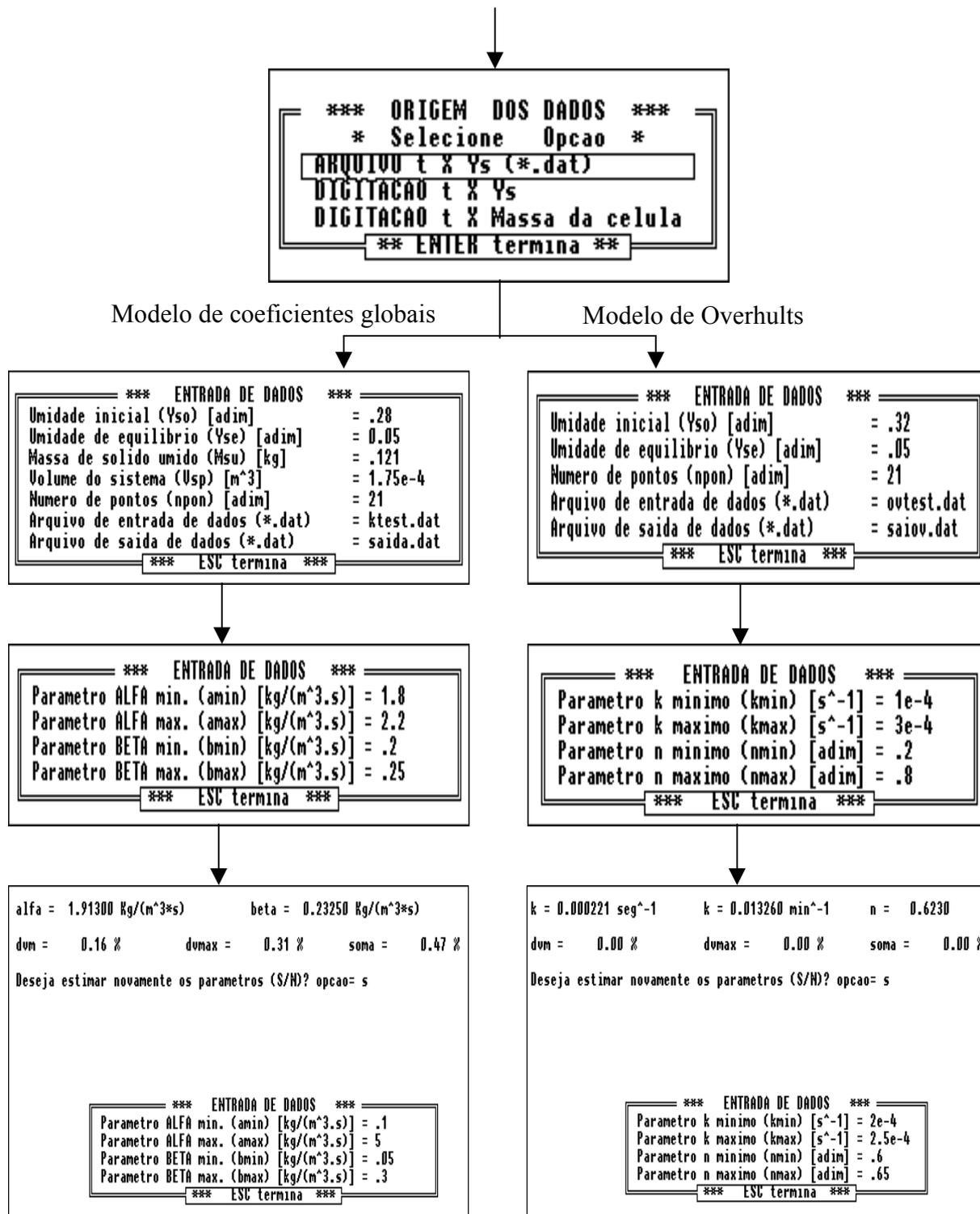


Figura 3 – Fluxo do programa para estimação de parâmetros em leito fixo e camada delgada.



O programa executa a determinação dos parâmetros que apresentam os menores desvios médio e máximo entre os valores experimentais e simulados da curva de secagem e apresenta os resultados, possibilitando ao usuário refinar a busca, com faixas mais estreitas de parâmetros, ou encerrar a estimação.

Quando o usuário opta por encerrar a estimação de parâmetros, o programa gera um arquivo de dados (ASCII), no qual são apresentadas as curvas de secagem experimental e simulada com o conjunto de parâmetros selecionado.

Na estimação de parâmetros em leito fixo e camada delgada o usuário deve dispor dos dados relativos à curva de secagem experimental. Caso estes dados não estejam formatados em arquivos de dados, o usuário poderá optar por fornecer os valores do tempo e da umidade do sólido ou do tempo e da massa do sistema utilizado para obter as curvas de secagem.

Quando o módulo de simulação da secagem em leito deslizante é selecionado, o fluxo do programa estabelece a seleção de um tipo de grão para simular a secagem. Esta seleção se faz necessária, uma vez que a umidade de equilíbrio e o coeficiente de transferência de massa são calculados para cada ponto do sistema, o que requer que as correlações específicas do material estejam, também, implementadas em funções.

Na versão 2.0 do **SIMSEC**, estão disponíveis os dados relativos ao feijão preto, soja e milho, apresentados nos trabalhos de MANCINI (1996) e MARTINS (2000). À medida que informações sobre a isoterma de equilíbrio e o coeficiente de transferência de massa forem disponibilizadas, novos materiais poderão ser inseridos no módulo de simulação da secagem em leito deslizante.

Na Figura 4 é apresentado o fluxo de execução do programa para a simulação da secagem em leito deslizante e fluxos contracorrentes. A seqüência de janelas de entrada de dados e as saídas de resultados são semelhantes nas outras duas configurações.

A única janela de entradas, que só é exibida na simulação da secagem em leito deslizante e fluxos contracorrentes, é a que permite ao usuário fornecer os valores de pesos, para o ajuste da estimativa das propriedades do gás de secagem na região de entrada de sólidos, evitando variações bruscas na correção dos valores destas propriedades.

Após a seleção do tipo de configuração e de grão a secar, o programa apresenta uma janela para que o usuário forneça os dados relativos às características do sólido, tais como: diâmetro de partícula, propriedades térmicas, características fluidodinâmicas da partícula e do leito, temperatura e umidade do sólido na entrada.

Em seguida, o programa apresenta uma janela para o fornecimento dos dados relativos ao gás de secagem e à estrutura do secador, tais como: propriedades físicas e térmicas da fase fluida, vazão volumétrica, temperatura e umidade absoluta do gás na entrada do secador, dimensões, número de zonas de secagem e de pontos para armazenamento de resultados.

Uma vez fornecidos os dados necessários à simulação da secagem, o programa efetua o cálculo da umidade e da temperatura de cada uma das fases, em cada uma das zonas de secagem consideradas (no caso do secador de fluxos cruzados) e apresenta uma janela para que o usuário escolha as opções de saída que poderão ser exibidas na tela, na forma gráfica, em arquivo de dados ou impressas, conforme apresentado na Figura 4.

Nas saídas de resultados na forma gráfica são apresentados os perfis de umidade e temperatura das fases sólida e fluida e um quinto gráfico que reúne os perfis de temperatura do sólido e do gás ao longo do secador.

Na versão 2.0 do **SIMSEC** só estão disponíveis saídas na forma gráfica para a simulação da secagem em leito deslizante, nas três configurações adotadas. A apresentação de gráficos nos módulos de simulação e estimação de parâmetros será implementada em versões futuras do programa, porém, os arquivos de dados gerados possibilitam a construção de gráficos por qualquer outro *software* gráfico.

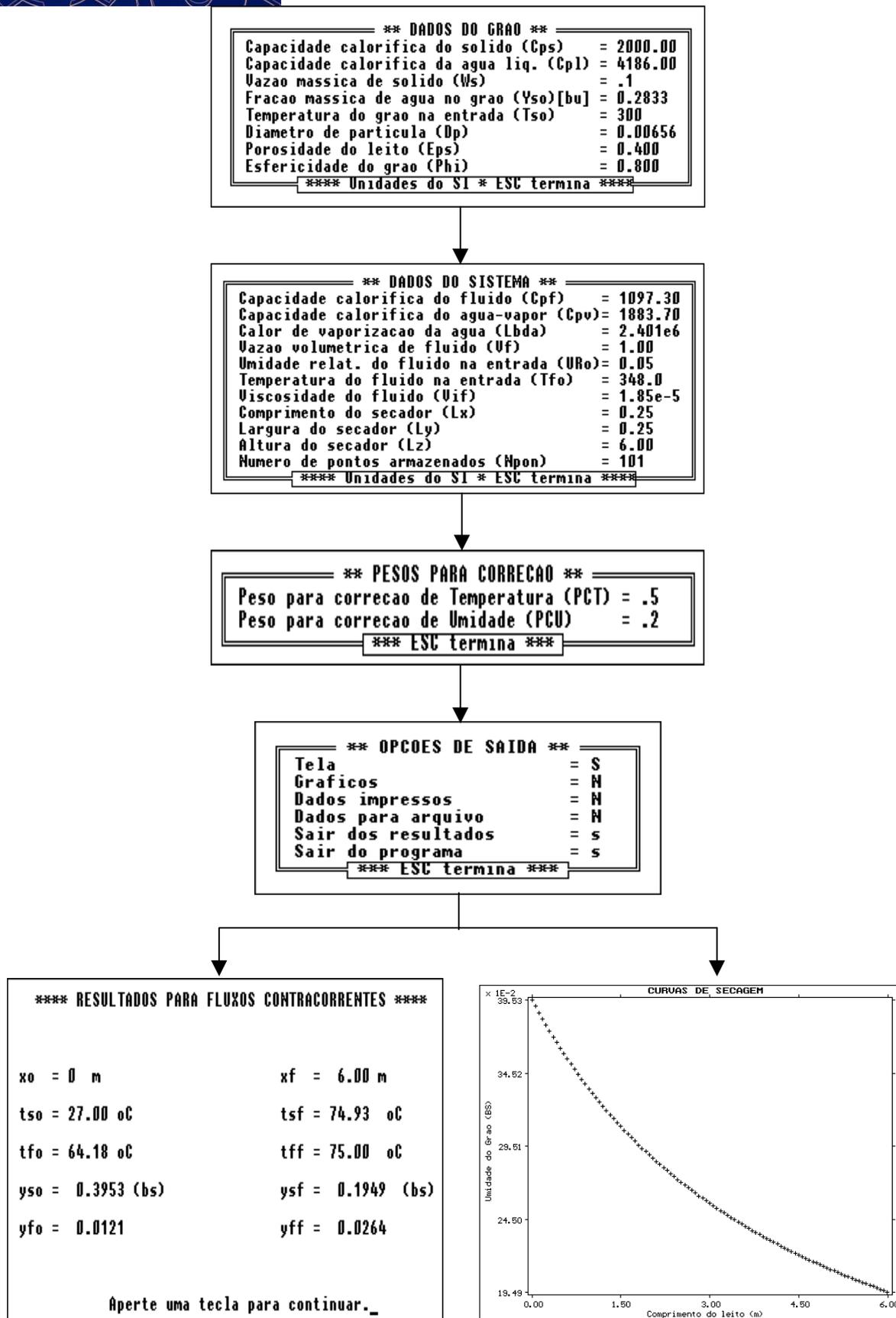


Figura 4 - Fluxo do programa relativo à simulação da secagem em leito deslizante e fluxos contracorrentes.



4. RESULTADOS

O principal resultado deste trabalho é o próprio programa computacional, que já está sendo utilizado pelos alunos de graduação e pós-graduação da UFRRJ.

Cabe destacar que o programa pode ser utilizado como uma ferramenta didática para ilustrar as aulas teóricas e práticas de operações unitárias e fenômenos de transporte, possibilitando aos alunos uma rápida familiarização com os mecanismos envolvidos na secagem de materiais particulados, assim com avaliar os efeitos das variações nas condições de operação sobre as características do produto final.

5. CONCLUSÃO

Com base na avaliação do programa, por meio da execução de diversos estudos de casos, foi possível concluir que o programa computacional implementado possibilita o estudo da secagem de grãos em secadores de leito deslizante e fluxos concorrentes, contracorrentes e cruzados, como também, da simulação computacional e estimação de parâmetros em secadores de leito fixo e camada delgada, de forma simples e de fácil assimilação por parte dos usuários, uma vez que, com o auxílio das janelas de entrada e saída de dados, pode-se avaliar uma ampla faixa de condições de operação, comparar as configurações dos secadores, determinar o conjunto ótimo de condições operacionais para cada tipo de grão e de configuração, determinar os parâmetros cinéticos relacionados à secagem em camada delgada e avaliar a utilização das correlações obtidas em secadores de camada espessa.

A aplicação do programa como ferramenta didática é facilitada pela elevada interação usuário-programa, possibilitando o seu uso por operadores que não disponham de grandes conhecimentos de computação e programação.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPERJ, processo E-26/171.370/2001, pelo auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- CALADO, V.M.A. **Modelagem e simulação de secadores em leitos fixo e deslizante**. 1993. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – PEQ/COPPE/UFRRJ, Rio de Janeiro.
- CALÇADA, L.A. **Modelagem e simulação de secadores em leito fixo**. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – PEQ/COPPE/UFRRJ, Rio de Janeiro.
- MANCINI, M.C. **Transferência de massa em secadores de grãos**. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – PEQ/COPPE/UFRRJ, Rio de Janeiro.
- MARTINS, M.G. **Adaptação de um equipamento de secagem em camada delgada para a determinação de isotermas de equilíbrio de grãos**. 2000. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – PPGCTA/IT/UFRRJ, Seropédica.
- PEREIRA, A.M. e MANCINI, M.C. Desenvolvimento de um Programa Computacional Interativo com o Usuário para Simulação de Secadores. In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 1997, Uberlândia. **Anais**. Uberlândia: UFU, 1998, p.211-214.



A COMPUTER-USER INTERACTIVE PROGRAM APPLIED TO DRYING STUDIES

Abstract: *In this work a software was developed to simulate the operation of convective dryers. The global coefficient model, based on the mass and energy balance equations in solid and fluid phases, and the Overhults model were used to describe the drying operation. The program interacts with users by a series of communication windows that allow the selection of the material to be dried, the configuration of the dryer, and set the equipment's operational conditions. The simulated results may be presented in data (ASCII) files, shown on the screen, in tabular or graphic form, and sent to a printer. The program also allows the simulation and parameter estimation in fixed bed thin layer dryers. The simulated or estimated drying curves can be saved in data (ASCII) files. As the program operation is very simple, it can be applied in Unit Operations or Transport Phenomena classes, where the students may evaluate the most important aspects of drying operation.*

Key-words: *Grain dryers, Sliding bed dryers, Food drying, Fixed bed dryers*