



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de São José do Rio Preto

Fernanda Perpétua Casciotori

**Obtenção de parâmetros físicos e térmicos para simulação e projeto de
bioreatores de fermentação em estado sólido em leito fixo**

São José do Rio Preto
2011

Fernanda Perpétua Casciotori

**Obtenção de parâmetros físicos e térmicos para simulação e projeto de
bioreatores de fermentação em estado sólido em leito fixo**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, Área de concentração – Engenharia de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio Preto.

Orientador: Prof. Dr. João Cláudio Thoméo

**São José do Rio Preto
2011**

Casciotori, Fernanda Perpétua.

Obtenção de parâmetros físicos e térmicos para simulação e projeto de bioreatores de fermentação em estado sólido em leito fixo / Fernanda Perpétua Casciotori. – São José do Rio Preto: [s.n.], 2011.

120 f.: il.; 30 cm.

Orientador: João Cláudio Thoméo

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas

1. Microbiologia industrial. 2. Fermentação. 3. Biorreatores – Propriedades térmicas. I. Thoméo, João Cláudio. II. Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas. III. Título.

CDU – 663.15

Fernanda Perpétua Casciatori

Obtenção de parâmetros físicos e térmicos para simulação e projeto de
bioreatores de fermentação em estado sólido em leito fixo

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, Área de concentração – Engenharia de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio Preto.

Banca Examinadora

Prof. Dr. João Cláudio Thoméo
UNESP – São José do Rio Preto
Orientador

Prof. Dr. José Teixeira Freire
UFSCar – São Carlos

Prof^a. Dr^a. Maria Aparecida Mauro
UNESP – São José do Rio Preto

São José do Rio Preto
28/fevereiro/2011

Dedico este trabalho

Aos meus exemplos de vida, Donizetti (pai) e Ana Maria (mãe); à minha grande amiga, Priscila (irmã); e ao meu grande amor, Eduardo (esposo). Pela confiança que sempre tiveram em mim e por me fazerem sonhar cada vez mais alto.

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de toda sabedoria e da felicidade plena; pela presença constante em minha vida; por sempre conduzir meus passos e iluminar minha estrada.

Ao Prof. Dr. João Cláudio Thoméo, orientador desta dissertação, por todo empenho, sabedoria, compreensão, motivação, incentivo e, acima de tudo, pela rara amizade.

Ao Prof. Dr. Fábio Bentes Freire, por sua colaboração no desenvolvimento de programas de simulação com disponibilidade, competência e destreza incomuns; e ao Prof. Dr. José Teixeira Freire, pelas sábias sugestões que contribuíram imensamente no desfecho dos temas centrais deste trabalho, além do carinho de um avô.

À coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências de Alimentos, Profa. Maria Aparecida Mauro, por conduzir o programa com fiel dedicação.

Ao meu pai Donizetti, minha mãe Ana e minha irmã Priscila, que sempre sonharam junto comigo e me deram amor e força para que eu pudesse realizar mais essa conquista.

Ao meu querido esposo Eduardo, pela compreensão, admiração, incentivo e paciência; pelo nosso relacionamento construído sobre bases sólidas; por fazer parte da minha vida.

A todos os meus amigos e amigas, em especial Lina, Alex, Leandra, Karen, Rafael, Sandra e Teresa, que sempre estiveram presentes, me aconselhando, ajudando, incentivando ou trabalhando junto comigo com carinho e colaboração.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução dessa Dissertação de Mestrado.

À Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas de São José do Rio Preto, que proporcionou oportunidade e infra-estrutura necessárias.

À FAPESP, pelo apoio financeiro com bolsa de Mestrado (proc. MS 2008/55736-3).

“Mas aqueles que contam com o Senhor renovam suas forças; dá-lhes asas de águia. Correm sem se cansar, vão para frente sem se fatigar.”

(Isaías 40,31)

RESUMO

O propósito deste trabalho foi obter parâmetros físicos e térmicos para simulação de reatores de leito fixo para fermentação em estado sólido (FES), empregando rejeitos sólidos agroindustriais como substratos e fungos como agentes fermentativos. Os materiais estudados foram bagaço de cana, resíduo agroindustrial comumente empregado na FES, e um meio composto por bagaços de cana e laranja e farelo de trigo na proporção 1:2:2 (p/p), substrato empregado para obtenção de enzimas pectinolíticas por FES. Foi determinada a condutividade térmica na estagnação (K_0) pelo método da sonda linear. Observou-se que a condutividade era muito baixa para os recheios secos (inferior a $0,1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$), mas aumentava bruscamente para recheios muito úmidos (atingindo $0,5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$), o que foi atribuído à condução de calor através da água. Também foram determinados os parâmetros térmicos dos leitos percolados por ar com baixas vazões, típicas da FES. Os valores da condutividade térmica efetiva radial (K_r) obtidos foram muito baixos, tendendo ao valor da estagnação, e os valores do coeficiente convectivo de transferência de calor parede-fluido (h_p) foram muito inferiores aos encontrados na literatura, devido às baixas vazões de ar. Foram desenvolvidos programas para aquisição de dados experimentais de temperatura por meio do *software* de interface gráfica *LabView* (*National Instruments*). Também foram desenvolvidos programas em *MatLab* para cálculo dos parâmetros térmicos dos sistemas, tanto para o modelo unidimensional (coeficiente global U) quanto para o bidimensional. Esses programas permitiram calcular os parâmetros térmicos imediatamente após aquisição dos dados do processo. Programas de simulação numérica foram desenvolvidos em *MatLab* para simular o crescimento do fungo termofílico *Thermomucor indicae seudaticae* N31 e o comportamento térmico do processo de FES conduzido por Umsza Guez (2009) em bioreator de leito fixo recheado com meio composto por bagaços de cana e laranja e farelo de trigo. Foram empregados os modelos de Sangsurasak e Mitchell (1998) e Fanaei e Vaziri (2009). Os resultados da simulação foram coerentes com os perfis experimentais de Umsza Guez (2009).

Palavras-chave: Parâmetros térmicos. Bioreator em leito fixo. Fermentação sólida. Simulação.

ABSTRACT

The purpose of this work was to get physical and thermal parameters for simulation of reactors of fixed packed beds percolated by air for solid state fermentation (SSF), using agro-industrial solid residues as substrata and molds as fermentative agents. The materials studied were sugar cane bagasse, agro-industrial residue commonly used in SSF, and a medium composed by sugar cane and orange bagasses and wheat bran in ratio 1:2:2 (w/w), substratum used for pectinolytic enzymes attainment for SSF. The thermal conductivity on stagnation (K_0) was determined by heating linear method. It was observed that the conductivity was very low for dried materials (below $0,1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$), but increased brusquely for very humid materials (reaching $0,5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$), what it was admitted to be due to conduction of heat through the water. Also the thermal parameters of the fixed packed beds percolated by air with low outflows, typical of SSF, had been determined. The values of the thermal conductivity radial effective (K_r) gotten had been very low, tending to the value of the stagnation, and the values of the convective coefficient of heat transfer wall-fluid (h_p) had been very below to the found on literature, which had to the low air outflows. Programs for acquisition of experimental data of temperature by means of the software of graphical interface LabView had been developed (National Instruments). Also programs in MatLab for calculation of the thermal parameters of the systems had been developed, as much for the one-dimensional model (global coefficient U) how much for the two-dimensional. These programs had allowed calculating the thermal parameters immediately after acquisition of the data of the process. Programs of numerical simulation had been developed in MatLab to simulate the growth of thermophile mold Thermomucor indicae seudaticae N31 and the thermal behavior of the process of SSF lead by Umsza Guez (2009) in bioreactor of fixed stream bed stuffed with half composition for bagasses of sugar cane and orange and bran of wheat. The models of Sangsurasak and Mitchell (1998) and Fanaei and Vaziri (2009) had been used. The results of the simulation had been coherent with the experimental profiles of Umsza Guez (2009).

Keywords: Thermal parameters. Packed bed bioreactor. Solid fermentation. Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- FIGURA 2.1 Comparação das predições do modelo bidimensional de Sangsurasak e Mitchell (1998) (—) com dados experimentais de Saucedo-Castaneda e colaboradores (1990) (●) para altura adimensional = 0,6 e raios adimensionais: (a) 0,05; (b) 0,4; (c) 0,8; (d) 1,0 (extraído e adaptado de Sangsurasak e Mitchell, 1998)..... 23
- FIGURA 2.2 Comparação das predições do modelo (—) aos dados experimentais de Ghildyal e colaboradores (1994) (●), para raio adimensional 0,05, altura adimensional 0,5 e velocidades superficiais: (a) 0,0047; (b) 0,0141; (c) 0,0235 m/s (SANGSURASAK; MITCHELL, 1998)..... 24
- FIGURA 2.3 Comparação das predições dos modelos de transferência de calor de parâmetros concentrados e distribuídos com dados experimentais de Ghildyal e colaboradores (1994) (.) Dados experimentais; (--) Predições do modelo de parâmetros concentrados; (–) Predições do modelo de parâmetros distribuídos (extraído de Fanaei e Vaziri, 2009)..... 27
- FIGURA 2.4 Distribuição de temperaturas no leito ao longo do processo fermentativo de Umsza Guez (2009) nas condições Tcamisa – Tar – Vazão L/h: a) 45-40-60, b) 45-45-60, c) 45-40-120, d) 45-45-120, e) 45-40-180 e f) 45-45-180 (extraído de Umsza Guez, 2009)..... 28
- FIGURA 2.5 Perfil radial de porosidade de leitos empacotados (a) com lascas de basalto (ZOTIN, 1985); (b) com lascas de madeira finas (HAMEL; KRUMM, 2008)..... 32
- FIGURA 3.1 Conjunto experimental empregado para obtenção da condutividade térmica efetiva na estagnação pelo método da sonda linear..... 37
- FIGURA 3.2 Aparatos experimentais: a) Sistema experimental completo para ensaios no leito fixo percolado por ar; b) Detalhes da célula de medidas térmicas..... 38
- FIGURA 3.3 Conjunto suporte dos termopares: (a) longitudinais; (b) anelares..... 39

FIGURA 4.1 Resultados obtidos para esferas de 3,0 mm: a) temperatura em função do logaritmo do tempo; b) derivada da temperatura em relação ao logaritmo do tempo.....	48
FIGURA 4.2 Resultados obtidos para microesferas de 0,3 mm: a) temperatura em função do logaritmo do tempo; b) derivada da temperatura em relação ao logaritmo do tempo.....	49
FIGURA 4.3 Acomodação das partículas em torno da sonda de condutividade térmica a) esferas de vidro de 3,0 mm; b) microesferas de 0,3 mm de diâmetro (escala 1:15).....	50
FIGURA 4.4 Resultados do experimento para a determinação de K_0 do bagaço de cana a 25 °C: a) Temperatura em função do tempo para lã de vidro e bagaço de cana; b) Tempo de pré-aquecimento para lã de vidro; c) Tempo de pré-aquecimento para bagaço de cana a 18,7 % de umidade; d) Porção linear dos dados do bagaço de cana e curva de regressão linear.....	51
FIGURA 4.5 K_0 de bagaço de cana a 25 °C em função da umidade.....	52
FIGURA 4.6 Ajuste de K_0 do bagaço de cana em função da umidade.....	53
FIGURA 4.7 Determinação experimental de K_0 para farelo de trigo a 25 °C: a) perfil de elevação da temperatura; b) porção linearizada da curva.....	55
FIGURA 4.8 Determinação experimental de K_0 para o meio composto a 25 °C: a) temperatura em função do tempo; b) Tempo de pré-aquecimento do meio composto a 70 % de umidade.....	56
FIGURA 4.9 Condutividade térmica efetiva na estagnação para o meio composto em função do teor de umidade (b.u.), parametrizada pela temperatura inicial dos ensaios.....	58
FIGURA 4.10 Boxplot de K_0 em função do teor de umidade e da temperatura inicial.....	59
FIGURA 4.11 Ajuste de K_0 do meio composto em função da umidade: a) 25 °C; b) 50 °C.....	61

FIGURA 4.12 Temperatura de entrada no leito: pontos experimentais e curva de ajuste.....	63
FIGURA 4.13 Temperatura em função da posição radial no leito fixo recheado com bagaço de cana percolado por diferentes vazões de ar e com alturas: a) 6 cm; b) 12 cm; c) 18 cm.....	64
FIGURA 4.14 Perfis de temperatura em leito de bagaço de cana obtidos por medidas na saída da célula aberta (■) e com prolongamento (♦) (L = 18 cm, Vazão = 400 L/h; T ₀ = 40 °C; T _p = 65°C; prolongamento = 10 cm; seção térmica = 21 cm).....	65
FIGURA 4.15 Vista superior dos leitos empacotados (a) bagaço de cana; (b) lascas de madeira.....	66
FIGURA 4.16 Temperatura média radial no topo do leito de bagaço de cana em função da vazão de fluido percolante: (a) integração até r/R = 0,92; (b) integração até r/R = 1,00 (parede); (c) integração de r/R = 0,92 até 1,00 (parede).....	67
FIGURA 4.17 Coeficiente global U para leito de bagaço de cana em função da vazão de ar e calculado com base em T _{avg} : (a) até r/R = 0,92; (b) até r/R = 1,00; (c) de r/R = 0,92 até 1,00.....	69
FIGURA 4.18 Parâmetros térmicos estimados pelo modelo bidimensional para leitos recheados com bagaço de cana: a) K _r ; b) K _r /K ₀ ; c) h _p	71
FIGURA 4.19 Microfotografia das células de bagaço: a) 4 % de umidade; b) 75 % de umidade.....	76
FIGURA 4.19c Porosidade de leitos recheados com bagaço de cana e com meio composto.....	77
FIGURA 4.20 Temperatura em função da posição radial no leito fixo recheado com meio composto percolado por diferentes vazões de ar e com alturas: a) 6 cm; b) 12 cm; c) 18 cm.....	78

FIGURA 4.21 Vista superior do leito empacotado com meio composto por bagaços de cana e laranja e farelo de trigo (1:2:2 p/p): (a) Úmido; (b) Seco.....	79
FIGURA 4.22 Temperatura média radial no topo do leito de meio composto em função da vazão de fluido percolante e calculada de diferentes maneiras: (a) integração até $r/R = 0,92$; (b) integração até $r/R = 1,00$ (parede); (c) integração de $r/R = 0,92$ até $1,00$ (parede).....	80
FIGURA 4.23 Coeficiente global U de leito de meio composto em função da vazão de ar e calculado com base em T_{avg} : (a) até $r/R = 0,92$; (b) até $r/R = 1,00$; (c) de $r/R = 0,92$ até $1,00$	82
FIGURA 4.24 Parâmetros térmicos estimados pelo modelo bidimensional para leitos recheados com meio composto: a) K_r ; b) K_r/K_0 ; c) h_p	86
FIGURA 4.25 Menus de opções para entrada das variáveis operacionais: a) Vazão de ar; b) Altura do leito; c) Repetição do experimento.....	89
FIGURA 4.26 Estrutura <i>switch case</i> do programa para cálculo de U	90
FIGURA 4.27 Cálculo de U : a) por substituição direta; b) por ajuste.....	93
FIGURA 4.28 Teste de execução do programa empregando a equação (2.4).....	95
FIGURA 4.29 Variação da concentração de biomassa com o tempo para o processo fermentativo de Umsza Guez (2009).....	102
FIGURA 4.30 Temperatura na saída do bioreator de Umsza Guez (2009) prevista pelo modelo a parâmetros concentrados.....	102
FIGURA 4.31 Temperatura na saída do bioreator de Umsza Guez (2009) prevista pelo modelo com dispersão axial.....	105

- FIGURA 4.32 Superfície de temperatura em função do tempo e da posição axial para o processo de Umsza Guez (2009) pelo modelo com dispersão axial..... 106
- FIGURA 4.33a Superfície de temperatura em função das posições axial e radial no bioreator de Umsza Guez (2009) no início do processo ($t = 0$ horas)..... 108
- FIGURA 4.33b Superfície de temperatura em função das posições axial e radial no bioreator de Umsza Guez (2009) na metade do processo ($t = 12$ horas)..... 109
- FIGURA 4.33c Superfície de temperatura em função das posições axial e radial no bioreator de Umsza Guez (2009) no final do processo ($t = 24$ horas)..... 109

LISTA DE TABELAS

TABELA 4.1 Resultados obtidos nos experimentos com o meio composto.....	57
TABELA 4.2 Resultados da análise de variância dos dados de K_0 ($\alpha = 5\%$).....	58
TABELA 4.3 Temperatura T_0 ($^{\circ}\text{C}$) em $z = 0$ em função da vazão de ar.....	62
TABELA 4.4 Valores do coeficiente h_p encontrados na literatura.....	73
TABELA 4.5 Parâmetros K_r e h_p estimados e seus intervalos de confiança para leitos de bagaço de cana ($L = 6\text{ cm}$).....	74
TABELA 4.6 Porosidade de leitos recheados com meio composto.....	74
TABELA 4.7 Análise de variância em blocos ao acaso para porosidade dos leitos ($\alpha = 1\%$).....	76
TABELA 4.8 Coeficiente global U para meio composto e análise de variância ($\alpha = 5\%$).....	83
TABELA 4.9 U de leitos recheados com bagaço de cana e meio composto ($L = 6\text{ cm}$) ($\alpha = 5\%$).....	84
TABELA 4.10 K_r de leitos recheados com bagaço de cana e meio composto ($L = 6\text{ cm}$) ($\alpha = 5\%$).....	87
TABELA 4.11 Parâmetros K_r e h_p estimados e seus intervalos de confiança para leitos de meio composto ($L = 6\text{ cm}$).....	88
TABELA 4.12 Verificação do programa de cálculo do U em MatLab por substituição e ajuste.....	94

TABELA 4.13 Verificação do programa de cálculo de K_r e h_p 97

TABELA 4.14 Parâmetros empregados nos modelos cinético e de transferência de calor..... 98

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
CAPÍTULO 2. REVISÃO DA LITERATURA.....	3
2.1 Fermentação em estado sólido (FES) em bioreatores de leito fixo	3
2.2 Transferência de calor em leitos fixos empacotados	9
2.2.1 Com percolação de ar	9
2.2.2 Na estagnação	14
2.3 Simulação de processos de FES em leito fixo	17
2.4 Propriedades estruturais de leitos empacotados com recheios aplicáveis em FES....	30
CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1 Materiais	34
3.1.1 Materiais padrões.....	34
3.1.2 Materiais orgânicos.....	34
3.2 Determinação da porosidade dos leitos fixos recheados com meio composto	35
3.3 Ensaios de condutividade térmica na estagnação	36
3.4 Ensaios térmicos no leito fixo percolado por ar.....	37
3.5 Empacotamento das células de medidas	40
3.6 Métodos de cálculo	41
3.6.1 Condutividade térmica na estagnação	41
3.6.2 Parâmetros térmicos do leito fixo percolado por ar.....	42
3.6.3 Calor específico (C_{pb}) dos materiais empregados como recheios	43
3.7 Desenvolvimento de programa em MatLab para cálculo do coeficiente U.....	43
3.8 Desenvolvimento de programa em MatLab para cálculo dos parâmetros térmicos do modelo bidimensional – K_r e h_p	45
3.9 Simulação do processo de FES em leitos fixos	46
CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1 Condutividade térmica efetiva na estagnação (K_0).....	48
4.1.1 Materiais padrões.....	48
4.1.2 Bagaço de cana	50

4.1.3	Farelo de trigo	54
4.1.4	Meio composto	55
4.2	Leito fixo recheado com bagaço de cana percolado por ar.....	62
4.2.1	Temperatura de entrada do ar (T_0).....	62
4.2.2	Ensaio térmico	63
4.2.3	Coefficiente global de transferência de calor U.....	68
4.2.4	Parâmetros térmicos do modelo bidimensional.....	71
4.3	Leito fixo recheado com meio composto percolado por ar.....	74
4.3.1	Porosidade	74
4.3.2	Ensaio térmico	77
4.3.3	Coefficiente global de transferência de calor U.....	81
4.3.4	Parâmetros térmicos do modelo bidimensional.....	85
4.4	Programa em MatLab para cálculo do coeficiente global de troca térmica U.....	88
4.5	Programa em MatLab para cálculo dos parâmetros térmicos do modelo bidimensional (K_r e h_p).....	94
4.6	Simulação do processo de FES para obtenção de enzimas pectinolíticas	97
CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES		110
5.1	Conclusões	110
5.2	Sugestões	111
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		112

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A fermentação em estado sólido (FES) é uma aplicação industrial de grande interesse para os leitos empacotados, para a qual rejeitos sólidos agroindustriais percolados por ar vêm sendo empregados como substratos ou como suportes de substratos. A FES pode ser definida como um processo no qual uma matriz sólida porosa é inoculada com uma cultura de microrganismos, em presença de água suficiente para garantir o crescimento e as atividades metabólicas das células, sem que, no entanto, a capacidade de retenção de água pela matriz porosa seja excedida (PANDEY, 1992). O emprego de bagaço de cana-de-açúcar, bagaço de laranja, farelo de trigo, farelo de arroz e outros rejeitos sólidos agroindustriais na FES é técnica e economicamente interessante, tendo em vista a abundância e o baixo custo desses subprodutos, com possibilidade de obter bioprodutos de alto valor agregado.

Um dos maiores inconvenientes da FES em leitos fixos é a dificuldade no controle da temperatura do leito, uma vez que os constituintes do meio poroso têm baixa condutividade térmica e as vazões de ar são pequenas, dificultando a remoção de calor metabólico do meio, com conseqüente queda de produtividade do sistema e até a morte dos microrganismos (MITCHELL et al., 2000). Outra deficiência é a segregação de umidade na matriz porosa, que ocorre mesmo mediante a percolação com ar saturado, resultando em grande heterogeneidade na produção de metabólitos (LAURENTINO, 2007; UMSZA GUEZ, 2009).

A simulação de sistemas reacionais em leitos empacotados é uma importante ferramenta para o projeto e o controle de reatores, uma vez que fornece informações de prováveis pontos quentes e alternativas operacionais de como evitar esta deficiência (SAUCEDO-CASTAÑEDA et al., 1990; THOMÉO et al., 2004). Modelos que descrevam os mecanismos de transferência de calor em substratos utilizados em FES são fundamentais para a compreensão do processo e para a determinação de variáveis importantes numa ampliação de escala. No entanto, informações experimentais que validem esses modelos são escassas na literatura, o que compromete a eficiência do processo de implantação de reatores industriais para FES (SAUCEDO-CASTAÑEDA et al., 1990; ASHLEY et al., 1999).

Neste contexto, é justificável um estudo que busque maior compreensão dos fenômenos de transferência em leitos recheados com rejeitos sólidos agroindustriais e que forneça condições operacionais ótimas e parâmetros de projeto confiáveis que permitam a simulação de sistemas reacionais de FES, utilizando-se de modelagens de fácil aplicação que se aproximem da realidade tecnológica e industrial.

Diante do quadro exposto, o objetivo geral desta dissertação de Mestrado foi obter experimentalmente parâmetros térmicos que permitissem fazer simulação e projeto de bioreatores de leito fixo para fermentação em estado sólido para produção de enzimas hidrolíticas, empregando-se fungos mesofílicos e termofílicos.

Os objetivos específicos do estudo foram os seguintes:

- Determinar a condutividade térmica na estagnação – K_0 – de leitos empacotados com bagaço de cana e com meio composto por bagaços de cana e laranja e farelo de trigo;
- Determinar o coeficiente global de troca térmica – U – do modelo unidimensional da transferência de calor em leito fixo para leitos empacotados com bagaço de cana e com meio composto;
- Determinar a condutividade térmica efetiva radial – K_r – e o coeficiente convectivo de transferência de calor – h_p – em leito fixo para leitos empacotados com bagaço de cana e com meio composto;
- Desenvolver programas computacionais aplicáveis para cálculo dos parâmetros térmicos de leitos fixos empacotados percolados por ar;
- Desenvolver programas que permitam simular a transferência de calor em fermentadores de leito fixo recheados com meio composto por bagaço de cana, bagaço de laranja e farelo de trigo empregando-se fungo termofílico produtor de enzima pectinolítica, com base nos dados experimentais obtidos neste trabalho e na literatura.

CAPÍTULO 2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Fermentação em estado sólido (FES) em bioreatores de leito fixo

A fermentação no estado sólido (FES) consiste no crescimento microbiano em partículas sólidas na ausência de água líquida, com o substrato devendo possuir água suficiente para garantir as atividades metabólicas do microrganismo (PANDEY, 2003). Em geral, o meio permanece em equilíbrio com o ar úmido, que escoia através do leito. O meio poroso na FES pode ser inerte, servindo simplesmente como suporte a um sólido ou solução nutriente que o impregne, como também pode ser propriamente a fonte de nutrientes aos microrganismos. Além disso, as reações podem ocorrer na superfície das partículas ou no interior de seus poros.

A forma empregada na maioria dos estudos de FES diz respeito ao processo em batelada, no qual, basicamente, o meio inoculado é adicionado ao reator, seguido pela incubação por determinado período de tempo. A seguir, o produto obtido pode ser extraído por suspensão do meio com água, soluções tampão ou solventes, como no caso de enzimas, ácidos e alcoóis, ou simplesmente pode ser seco e armazenado, como no caso da produção de bioinseticidas ou proteína microbiana (PANDEY, 1992).

Devido à ausência de água líquida e conseqüente menor atividade de água (a_w) no sistema, os fungos filamentosos têm recebido a maioria das atenções nas pesquisas, pois apresentam melhor capacidade de crescimento nestas condições. Assim, um vasto campo de estudos tem-se vislumbrado utilizando esses microrganismos. Por esse motivo, a FES tem sido mais empregada para fungos filamentosos, que crescem na superfície das partículas e penetram suas hifas através dos espaços interpartículas.

Os materiais sólidos utilizados em processos de FES são geralmente fragmentados e de natureza granular ou fibrosa, de forma que retenham água por higroscopicidade ou capilaridade. O tamanho da partícula é outro fator a ser considerado. Por um lado, quanto menor seu tamanho, maior a área superficial e, conseqüentemente, maior o grau de transformação de substratos em bioprodutos. Por outro lado, as condições operacionais requerem um meio poroso com permeabilidade suficiente para que possa ser percolado uniformemente pelo ar, de modo a remover o calor metabólico gerado e contribuir no processo de transferência de massa de oxigênio e metabólitos gasosos. Para facilitar a atuação dos microrganismos sobre o meio, podem ser empregados alguns pré-tratamentos, tais como: esmagamento, quebra, moagem e peneiramento, visando adequar o meio à granulometria mais

adequada ao processo; suplementação de nutrientes e correção de pH, visando suprir a falta de algum nutriente ou adequar o meio às melhores condições de crescimento microbiano; hidrólise ácida ou alcalina de material celulósico, visando facilitar uma posterior atuação enzimática; embebição, para regular o teor de umidade inicial do processo; adição de agentes sequestrantes, com a finalidade de remover ou isolar íons metálicos que poderiam afetar o rendimento do processo; e esterilização do meio de cultura, para eliminar ou minimizar possível contaminação do reator por microrganismos indesejáveis, competidores ou inibidores (PANDEY, 2003).

Os resíduos sólidos agroindustriais, como bagaços de cana-de-açúcar e de laranja, cascas de frutas, farelos de trigo e de arroz, raspas de mandioca, tortas desengorduradas de soja, de girassol e de milho, podem ser empregados como substratos ou suportes de substratos em reatores de FES para obtenção de bioprodutos com alto valor agregado, como enzimas, alcoóis, polissacarídeos, ácidos orgânicos, fungos e bactérias, os quais podem ser empregados em processos tecnológicos nas indústrias de alimentos, químicas, farmacêuticas, têxteis e nas culturas agrícolas. No Brasil, o emprego de rejeitos sólidos agroindustriais na FES é técnica e economicamente interessante, tendo em vista a fácil disponibilidade e o baixo valor comercial desses subprodutos.

O bagaço de cana-de-açúcar, por exemplo, tem sido comumente empregado em reatores de FES, seja como substrato propriamente dito, atuando como fonte celulósica para os microrganismos, ou como inerte, atuando como suporte fibroso estrutural capaz de garantir a porosidade necessária nos leitos de FES. Tendo em vista que a cana-de-açúcar é utilizada tradicionalmente na produção de açúcar e álcool no Brasil e que são gerados em média 200 kg de bagaço para cada tonelada de cana moída, é possível ter idéia da abundância e baixo valor comercial deste subproduto no Brasil (SOCCOL, 2006).

Dentre os bioprodutos já obtidos através da FES, destacam-se as enzimas pectinolíticas, que representam 25 % de todo o mercado de aplicações industriais de enzimas, o qual movimentou cerca de 2 bilhões de dólares em 2004, estimando-se aumento para 6 bilhões de dólares em 2011 (FREEDONIAN, 2004, 2008). Devido a esse crescente aumento da aplicação das pectinases no mercado mundial, tem aumentado também o interesse científico na busca de diferentes alternativas para a produção das mesmas.

As pectinases podem ser aplicadas nas indústrias alimentícias para redução de viscosidade de sucos de frutas ricos em pectina, extração e clarificação de sucos de frutas, fermentação de café e de chá, alimentação animal e extração de óleo. Na indústria têxtil, há relatos de sua aplicação na maceração de tecidos de planta e degomagem de fibras

(KASHYAP et al., 2001). Uenojo e Pastore (2007) apresentaram um artigo de revisão citando diversas aplicações de pectinases nas indústrias de alimentos e perspectivas futuras, incluindo amadurecimento de frutas, clarificação e redução de viscosidade em sucos de frutas, tratamento preliminar do suco de uva para indústrias vinícolas, extração de polpa de tomate, fermentação de chá e chocolate, tratamento de resíduos vegetais, degomagem de fibras nas indústrias têxtil e de papel, nutrição animal, enriquecimento protéico de alimentos infantis e extração de óleos.

Em sucos mais consistentes, como de maçã, pêra e pêsego, estas enzimas hidrolisam compostos pécticos dispersos no fluido, fazendo com que estes precipitem, de forma a melhorar a centrifugação e a ultrafiltração. Para frutas que produzem sucos nebulosos, como cítricos, manga e mamão, as enzimas pectinolíticas são usadas para estabilizar a suspensão, já que estes sucos quando muito claros não são atrativos (KASHYAP et al., 2001; UMSZA GUEZ et al., 2010).

As pectinases consistem de grupos orgânicos heterogêneos, sendo produzidas por plantas e microrganismos. As enzimas pectinolíticas de origem fúngica apresentam alta atividade e tolerância a baixo pH, sendo a maioria dos estudos realizados com microrganismos mesofílicos. Todavia, recentemente, tem surgido um número cada vez maior de pesquisas relacionadas à produção de enzimas por microrganismos termofílicos (MARTINS et al., 2002; BADHAN et al., 2007; UMSZA GUEZ, 2009), uma vez que estes microrganismos tendem a produzir enzimas termoestáveis.

Laurentino (2007) e Umsza Guez (2009) empregaram um meio poroso composto por bagaços de cana e de laranja e farelo de trigo na proporção 1:2:2 (peso), respectivamente, para produção de pectinases por FES em escala de frasco e em reator de leito fixo, utilizando como agente fermentativo o fungo termofílico *Thermomucor indicae-seudaticae* N 31. O farelo de trigo, resíduo resultante do processamento da farinha, é rico em nitrogênio, carbono e sais inorgânicos, e foi empregado como fonte de energia facilmente disponível para o metabolismo microbiano, com a finalidade de acelerar o processo fermentativo em seus estágios iniciais (EL-HAWARY; MOSTAFA, 2001). O bagaço de laranja, resíduo sólido da indústria de sucos cítricos, é composto principalmente por fibras, e foi empregado como precursor das pectinases. O bagaço de cana, resíduo resultante da extração do açúcar, é constituído majoritariamente por fibras, principalmente celulose, hemicelulose e lignina, além de água, pequenas quantidades de sacarose e impurezas, e foi empregado como suporte estrutural inerte, com a finalidade de aumentar a permeabilidade do meio poroso, uma vez que

as partículas do bagaço de laranja formavam aglomerados indesejáveis no leito fixo utilizado pelos autores, dificultando a aeração do meio e a remoção de calor metabólico.

A quantidade de água mais apropriada para a fermentação do substrato varia de um material para outro. Em geral, os amiláceos (por exemplo, arroz, trigo, centeio, cevada, milho e mandioca) são fermentados entre 25 e 60 % de umidade inicial, enquanto os celulósicos (por exemplo, palhas, cascas, bagaço, farelos e outros) permitem trabalhar com teores de umidade mais elevados, de 60 a 80 %, sem a presença de água líquida (SOCCOL, 1992). Entre estes, o bagaço de laranja é normalmente utilizado com 70 % de umidade (SILVA et al., 2005; MARTIN, 2006). Umsza Guez (2009) empregou o meio composto por bagaços de cana e laranja e farelo de trigo com umidade de 70 % no reator de leito fixo para produção de pectinases, tendo obtido resultados satisfatórios de atividade enzimática após o período de apenas um dia de processo.

Quanto aos tipos de bioreatores disponíveis para FES, têm-se três tipos mais comuns: os bioreatores de leito fixo, os misturados intermitentemente e os misturados continuamente. Um bioreator de leito fixo consiste de um leito de substrato mantido estático normalmente sobre uma placa perfurada, através do qual escoar. Bioreatores misturados intermitentemente são tipicamente semelhantes aos de leito fixo, porém contendo um agitador interno. Durante os períodos estáticos, o sistema é idêntico a um leito fixo, porém o agitador promove movimentação do substrato a cada intervalo de tempo pré-determinado. Por fim, bioreatores misturados continuamente são aqueles em que o leito de substrato é mantido dentro de um tambor que é continuamente girado, promovendo movimentação constante do substrato no leito. Dentre os três tipos, os bioreatores de leito fixo são os mais baratos, tanto em termos de investimentos quanto de custos operacionais, além de que são os mais fáceis de operar e analisar, motivo pelo qual é estudado neste trabalho.

Sabe-se que, durante o processo fermentativo em estado sólido, uma grande quantidade de calor é gerada pelos agentes biológicos, a qual é diretamente proporcional às atividades metabólicas do microrganismo, particularmente a respiração durante o crescimento, cuja velocidade é medida através da taxa de consumo de oxigênio e/ou da taxa de formação de gás carbônico pelo microrganismo.

Um grande número de trabalhos de FES tem sido desenvolvido em escala laboratorial utilizando frascos de vidro ou sacos plásticos, buscando avaliar a viabilidade de um determinado produto a partir de um binômio substrato-microrganismo específico. Tais estudos são normalmente conduzidos sob condições operacionais controladas, onde as variáveis composição e umidade inicial do substrato e temperatura do sistema são impostas na busca de

pontos ótimos de operação. Isso só é possível porque, na escala laboratorial, controlar a temperatura no valor ótimo para o crescimento do microrganismo e para a produção dos bioprodutos de interesse é uma tarefa relativamente fácil. Nesta escala, muitos processos de FES têm se mostrado promissores. No entanto, a transposição destes processos para bioreatores em escala industrial, que contêm grande quantidade de substrato, encontra dificuldade na remoção de calor de leitos de sólidos e conseqüentemente no controle de temperatura no interior do bioreator. As condições ótimas de operação, via de regra, não são mantidas, uma vez que nos reatores o substrato inoculado fica sujeito às variações de temperatura decorrentes da atividade microbiana e às variações de umidade resultantes da interação entre a matriz porosa e o ar percolante. Assim, a transposição dos resultados de uma escala para outra não é trivial, normalmente resultando em baixa produtividade do reator (LAURENTINO, 2007).

Desta forma, um grande inconveniente da FES em leitos fixos é a dificuldade no controle da temperatura do leito, com possibilidade de ocorrência de superaquecimento do meio, com conseqüente queda de produtividade do sistema e mesmo a morte dos microrganismos. As temperaturas alcançadas podem estar bem acima da temperatura ótima para os processos, com o risco de a acumulação de calor danificar o produto formado e acumulado no leito (MITCHELL et al., 2000). Durante os momentos de pico de produção de calor pelo metabolismo do microrganismo, a temperatura pode chegar a valores de 15 °C acima da temperatura ótima de crescimento (MITCHELL et al., 2010). No entanto, de um modo geral, a elevação de temperatura em leitos fixos operados com fungos termófilos é muito inferior à observada com mesófilos (ZANELATO, 2010). No processo fermentativo de Umsza Guez (2009), por exemplo, a elevação de temperatura com o fungo termofílico *Thermomucor indiciae seudaticae* N-31 foi de apenas 4 °C, o que sugere que o controle dos processos de FES com fungos termofílicos tende a ser menos dificultoso.

De acordo com Ghildyal e colaboradores (1994), quanto mais longo o tempo em que altas temperaturas são mantidas no interior do leito, maiores os danos e as perdas dos produtos formados durante o processo fermentativo. Esses autores sugerem que o superaquecimento no interior do leito acarrete baixa atividade de enzimas que foram obtidas por processos em que altas elevações de temperaturas acima da ótima ocorreram durante a fermentação.

Apesar desses problemas, a FES ainda pode ser apropriada para a produção de enzimas e outros produtos termolábeis em bioreatores de leitos empacotados, especialmente quando maiores rendimentos podem ser obtidos em comparação à fermentação líquida

submersa (FSb). Os processos de FES são particularmente atrativos para aplicações industriais, oferecendo rendimento de produção mais elevado (medido em termos de produto por unidade de volume) e expressões diferentes dos metabólitos microbianos comparados com a FSb. Em comparação com os processos tradicionais de FSb, a FES apresenta requerimentos de energia menores, custos operacionais mais baixos, capital de investimento inferior, mais fácil controle de contaminação externa do reator e produção de menor quantidade de efluentes residuais, sendo ainda um processo ambientalmente amigável por ajudar a resolver ou minimizar o problema da disposição inadequada dos resíduos sólidos agroindustriais, através do reaproveitamento destes (PANDEY, 2003). O estudo dos aspectos básicos de produção de pectinases por FES tem mostrado que o resultado deste processo é sempre superior ao obtido por FSb. Essa diferença de produtividade entre FES e FSb é atribuída aos diferentes mecanismos regulatórios das reações bioquímicas, temperatura e pH ótimo, termoestabilidade e afinidade pelo substrato utilizado (ALAZARD; RAIMBAULT, 1981).

No entanto, o desafio de ampliação de escala na FES é claro. Ao contrário de processos de FSb, em que o controle de temperatura tipicamente não é dificuldade para o processo, a temperatura pode aumentar significativamente durante os processos de FES devido à baixa condutividade térmica efetiva do leito, mesmo para microrganismos que apresentam baixo crescimento específico. Na produção de compostos termolábeis por FES, bem como no cultivo de microrganismos termossensíveis, o controle da temperatura do processo é crucial, e isto pode impor limites máximos nas escalas que poderão ser usadas na FES. Além disso, mesmo com grandes vantagens e forte potencial de aplicação, reatores de FES ainda são pouco empregados em escala industrial, uma vez que cada projeto depende da relação microrganismo/substrato, o que dificulta a comercialização da técnica.

Diante do quadro apresentado e em comparação à extensa literatura para processos de FSb, conclui-se que muito pouco se sabe sobre como projetar e operar bioreatores de larga escala para FES. Constata-se que existe ainda uma lacuna de conhecimentos que limita o desenvolvimento bem sucedido de processos de FES em escala comercial. Mediante a necessidade de dissipar o calor gerado durante a fermentação para evitar danos à produtividade do processo, o conhecimento dos mecanismos, modelos e propriedades de transferência de calor em reatores mostra-se fundamental, sendo o suporte para projetos de reatores e para o controle dos processos de FES.

2.2 Transferência de calor em leitos fixos empacotados

2.2.1 Com percolação de ar

As propriedades térmicas efetivas de um meio poroso englobam vários mecanismos de transporte: condução de calor através das partículas sólidas, condução de calor através de fluido estagnado em contato com as partículas, convecção entre partícula e fluido, dispersão térmica na fase fluida, condução de calor entre parede e partículas e convecção entre parede e fluido (THOMÉO, 1990; LAURENTINO, 2007). Geralmente, experimentos de transferência de calor são conduzidos com partículas rígidas e inertes, como esferas de vidro ou partículas de alumínio (DE WASH; FROMENT, 1972; THOMÉO et al., 2004).

Há duas formas de se modelar o fenômeno térmico em leitos fixos: através da modelagem de duas fases ou da modelagem de uma fase, também conhecida como pseudo-homogênea. A modelagem de duas fases é mais abrangente e propõe um equacionamento matemático próprio para cada fase, por considerar que tanto a fase sólida como a fluida têm uma dinâmica própria na transferência de calor. Entretanto, esse modelo é de difícil aplicação prática, devido aos problemas na obtenção experimental da temperatura de cada fase (KUNII; SUZUKI, 1967; SMITH, 1973). Atualmente, devido aos avanços computacionais, muitos trabalhos têm sido publicados aplicando-se a técnica de CFD (Computational Fluid Dynamics) à transferência de calor em leitos fixos, o que possibilita prever coeficientes de transferência de calor por meio de simulações empregando a modelagem de duas fases, sem que, no entanto, haja comprovação experimental (ROMKES et al., 2003; GUARDO et al., 2005; AUGIER et al., 2010).

Uma grande diversidade de trabalhos experimentais e de pontos de vista teóricos concordam que existem lacunas em questões básicas do estudo das interações hidrodinâmicas entre fluidos e partículas, tais como a validade de tratar o meio poroso como um meio contínuo (NEGRINI et al., 1999). De acordo com Bear (1972), um Elemento de Volume Representativo (EVR) de uma matriz porosa fixa deveria incluir uma partícula e a sua vizinhança imediata. Em termos de medida de temperatura, um sensor muito maior que o EVR perderia alguma importante informação térmica, e um sensor muito menor seria sensível a características topológicas do leito que variam de uma posição a outra. Assim, deve ser empregado um sensor de medida de temperatura com tamanho aproximadamente igual ao do elemento de volume, de modo que este sensor possa coletar as informações térmicas das partículas, dos espaços vazios ao seu redor e dos pontos de contato com as partículas vizinhas.

Nesta aproximação de um meio poroso como um contínuo, um meio homogêneo é classificado como aquele do qual uma partícula individual poderia ser removida sem alterar significativamente a fração integral de vazios. Em leitos onde a razão do diâmetro do tubo (D) pelo diâmetro da partícula (d_p) é alta (maior que 10), a remoção de uma partícula individual de fato causaria uma mudança quase imperceptível no perfil radial de porosidade. Nesta situação, as propriedades hidrodinâmicas, térmicas e de massa são suficientemente uniformes através da maior parte da coluna, de tal forma que as partículas e os interstícios podem ser tratados como um meio contínuo. Isto facilita significativamente a análise de uma variedade de casos e ajuda na coleta de dados experimentais. Por outro lado, em leitos com razões D/d_p muito baixas, remover uma partícula altera dramaticamente a porosidade média. Neste caso, modelos discretos, que envolvem as muitas peculiaridades de transporte intrínsecas de cada fase, são mais apropriados que os modelos homogêneos, embora a dificuldade de obtenção de dados experimentais da fase sólida torne árdua a validação destes modelos. Para reatores de fermentação em estado sólido, é mais comum a situação em que o diâmetro da partícula é muito menor que o do reator, de forma que tratar a matriz porosa como um meio contínuo é uma aproximação razoável para a modelagem desses processos.

A modelagem de uma fase considera que, para um dado EVR do meio pseudo-homogêneo, a temperatura de ambas as fases são iguais, o que facilita o trabalho experimental, pois basta que seja medida a temperatura do fluido para que os parâmetros térmicos referentes a esse modelo possam ser determinados. Os fatores controversos acerca dessa modelagem são o detalhamento do modelo (COBERLY; MARSHALL, 1951; DE WASH; FROMENT, 1972; DIXON, 1985), as condições de contorno pertinentes ao balanço de energia (DIXON, 1985), o método de obtenção dos coeficientes térmicos (FREIRE, 1979) e as técnicas de medida do campo de temperaturas (THOMÉO et al., 2004).

A inserção dos termopares acima do leito de partículas é uma das técnicas de medida do campo de temperaturas mais utilizada, consistindo em colocar um conjunto de termopares acima do topo da camada de partículas, com os sensores localizados em diferentes posições radiais e angulares. Suas vantagens são a flexibilidade operacional e o caráter não invasivo, pois não provoca perturbações no meio poroso e com isso não introduz um mecanismo adicional de transferência de calor ao sistema (THOMÉO et al., 2004).

De acordo com Dixon (1985), em condições de escoamento em leito fixo, tanto a velocidade do gás como a temperatura apresentam variações angulares significativas numa dada posição radial, devido a variações nas características locais do empacotamento. Este comportamento, comum a qualquer leito fixo, torna trabalhosa a determinação dos perfis de

temperatura radiais quando se usam sensores pontuais, devido à manifestação de flutuações angulares da temperatura do leite, tornando-se necessário efetuar a média de várias tomadas de temperatura em diferentes posições angulares para obter uma medida representativa. A utilização de sensores anelares contorna esse problema, tendo em vista que estes sensores já obtêm a média das temperaturas angulares. Um sensor deste tipo foi proposto por Giudici (1990) em estudos de transferência de calor em leite fixo em condições de regime permanente. Adicionalmente, Giudici (1990) mostrou experimentalmente, e comprovou através de simulações, que a temperatura em cada anel que compõe o sensor anelar realmente representa a média das temperaturas angulares numa determinada posição radial.

Um dos primeiros estudos da transferência de calor em leitos fixos cilíndricos com escoamento monofásico foi realizado por Colburn (1931), que mediu apenas as temperaturas médias radiais de entrada e de saída do fluido percolante, de modo a determinar o coeficiente global de troca térmica (U), definido por:

$$\frac{R}{2} G C_p \frac{d T_{\text{avg}}}{d z} = U (T_{\text{avg}} - T_p) \quad (2.1)$$

onde R é o raio do leite cilíndrico; G é a vazão mássica superficial de fluido; C_p é o calor específico do fluido percolante; T_{avg} é a variável temperatura média radial; z é a variável posição axial e T_p é a temperatura da parede do leite, considerada constante.

A condição de contorno usualmente empregada para resolver a equação (2.1) é:

$$\text{Em } z = 0, T = T_0 \text{ (plano)} \quad (2.1a)$$

A solução analítica da equação (2.1), mediante a condição de contorno (2.1a), é dada por:

$$\ln \left(\frac{T_{\text{avg}} - T_p}{T_0 - T_p} \right) = \frac{2 U}{R G C_p} z \quad (2.2)$$

Essa formulação do modelo é unidimensional, pois contempla apenas os perfis axiais de temperatura ao longo do leite, sendo particularmente útil quando os perfis radiais de temperatura são praticamente planos. A equação (2.2) tem aplicação prática quando se quer

avaliar o aporte total de calor adicionado ou subtraído do leite, o que se consegue por meio do coeficiente global U .

No entanto, para leitões curtos, as temperaturas médias calculadas a partir dessa formulação se distanciam consideravelmente das temperaturas medidas, uma vez que os perfis radiais de temperatura são pronunciados (COBERLY; MARSHALL, 1951). Para tais casos, foi proposta a formulação bidimensional do balanço de energia ou equação da energia completa, que proporciona um mapeamento térmico mais detalhado. Para leitões cilíndricos, esta formulação é dada por:

$$\rho V_z C_p \frac{\partial T}{\partial z} = K_r \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + K_a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.3)$$

onde ρ é a densidade do gás e V_z sua componente axial da velocidade superficial; r é a variável posição radial; T é a variável temperatura; K_r e K_a são as condutividades térmicas efetivas radial e axial, respectivamente.

À equação (2.3), estão implícitas as restrições de regime permanente e simetria cilíndrica do perfil radial de temperatura. Embora esta equação seja uma forma mais abrangente de representar o problema, a derivada segunda de T em função de z decresce muito rapidamente com o aumento da altura do leite, de modo que o termo de dispersão axial

como um todo $\left(K_a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$ passa a ser desprezível frente ao termo de dispersão radial

$\left(K_r \left[\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] \right)$, de modo que usualmente se despreza a dispersão axial de calor. Desta

forma, elimina-se o parâmetro K_a , que é de difícil estimativa em virtude dessa diferença de ordem de magnitude das dispersões térmicas radial e axial, de modo que se obtém a equação da energia simplificada, para a qual se adotam as seguintes condições de contorno:

$$\text{Para } r = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (2.3a)$$

$$\text{Para } r = R, \quad -K_r \frac{\partial T}{\partial r} = h_p (T_p - T_R) \quad (2.3b)$$

$$\text{Para } z = 0, \quad T = T_0 \quad (2.3c)$$

onde h_p é o coeficiente convectivo de transferência de calor parede-fluido; T_R é a temperatura na posição radial $r = R$ (interface matriz porosa/parede da célula); e T_0 é a temperatura do ar percolante na posição axial $z = 0$ (entrada do leito).

A integração da equação da energia simplificada com as condições de contorno mencionadas deu origem ao modelo de dois parâmetros (K_r e h_p) tradicional (COBERLY; MARSHALL, 1951), cuja solução analítica é dada por:

$$\frac{T_p - T}{T_p - T_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 Ni J_0(\gamma_n r/R)}{[Ni^2 + \lambda_n^2] J_0(\gamma_n)} \exp\left[-\frac{K_r \gamma_n^2}{G C_p R^2} z\right] \quad (2.4)$$

onde $Ni = (h_p R / K_r)$ é o número de Biot modificado; J_0 é a função de Bessel de 1ª espécie e ordem 0; e γ_n são os auto-valores característicos que satisfazem a seguinte equação transcendental, onde J_1 é a função de Bessel de 1ª espécie e ordem 1:

$$Ni J_0(\gamma_n) - \gamma_n J_1(\gamma_n) = 0 \quad (2.5)$$

De Wash e Froment (1972), Dixon (1985), Thoméo (1995) e Smirnov e colaboradores (2003) utilizaram a equação (2.4) para determinar os valores de K_r e h_p aplicando o método dos mínimos quadrados não-lineares. Os autores observaram uma variação do coeficiente K_r com a altura do meio poroso, uma vez que K_r parte de altos valores na entrada do leito e decai assintoticamente para um valor constante com o aumento do comprimento. Smirnov e colaboradores (2003) propuseram um modelo com uma variação linear de K_r nas vizinhanças da parede para leitos empacotados de esferas, cilindros e anéis de Rashig, o qual consistia numa correlação simples entre o número de Nusselt (Nu) na parede e K_r no centro do leito, tendo obtido resultados satisfatórios e condizentes com a literatura. Já para o coeficiente h_p , o comportamento em função do comprimento do leito é menos definido, uma vez que, embora o mesmo também parta de altos valores na entrada do leito, seu decaimento é irregular. De um modo geral, foi encontrada, na literatura, uma dependência linear de ambos os parâmetros em relação à vazão de fluido.

Ressalta-se, portanto, a importância de se trabalhar com diferentes alturas de leito e vazões de fluido percolante na estimativa dos parâmetros térmicos efetivos do meio poroso pelo modelo de dois parâmetros, de forma que se possa observar o comportamento dos

valores de K_r e h_p em função de tais variáveis. Além disso, Sklivaniotis e colaboradores (1988) fizeram um estudo de sensibilidade paramétrica com o modelo adotado, onde concluíram que K_r depende dos valores de temperatura obtidos na região central para uma boa estimativa, enquanto que h_p depende de pontos na região da parede. Tais resultados auxiliam em avaliar se a aplicação do modelo é viável para determinação dos parâmetros térmicos efetivos de um determinado leito fixo percolado por um gás.

2.2.2 Na estagnação

A condutividade térmica efetiva na estagnação (K_0) é uma propriedade de cada material poroso que representa a resistência condutiva à propagação de calor no meio. Esta propriedade física engloba os mecanismos condutivos de transferência de calor e depende basicamente da composição química do material, em especial do teor de água, da sua estrutura física e da temperatura em que este material se encontra (ZACH, 2006).

Entre as técnicas de determinação de K_0 , o método da sonda linear é o mais aplicado e estudado na literatura (BLACKWELL; MISENER, 1951; BLACKWELL, 1953, 1954, 1956; VAN DER HELD; VAN DRUNNEN, 1949). É uma técnica simples e rápida, que apresenta boa precisão nos resultados, e se baseia na dissipação do calor gerado por uma fonte de diâmetro infinitesimal e comprimento infinito, em um meio igualmente infinito e homogêneo. Conforme McTaggart e Underwood (1960), se calor é dissipado em um sólido infinito a uma taxa constante e gerado por uma fonte linear, o aumento da temperatura com o tempo num ponto perto dessa linha é uma função da taxa de calor de entrada e das propriedades do sólido. Blackwell e Misener (1951) partiram da equação geral da condução de calor e apresentaram uma solução aproximada do problema de escoamento de calor em regime transiente, considerando escoamento unidirecional do fluxo de calor. A solução final do problema é dada por:

$$T - T_1 = \frac{q'}{4 \pi K_0} \ln\left(\frac{t}{t_1}\right) \quad (2.6)$$

onde t é a variável tempo; T é a variável temperatura; T_1 é a temperatura correspondente ao tempo de referência t_1 ; e q' é o calor dissipado por unidade de comprimento da sonda.

Segundo Pratt (1969), dentre as fontes de erro deste método citam-se o comprimento finito e o diâmetro real da sonda, as propriedades térmicas do material que constitui a sonda, a

resistência de contato entre a sonda e a amostra, o local de medição da temperatura e o efeito da interface de contato entre a sonda e a amostra.

Para corrigir o efeito do raio finito da sonda e da resistência de contato entre a sonda e a amostra, Van der Held e Van Drunen (1949) introduziram um fator de correção (t_0) no tempo, resultando na equação:

$$T - T_1 = \frac{q}{4\pi K_0} \ln\left(\frac{t - t_0}{t_1 - t_0}\right) \quad (2.7)$$

O fator t_0 representa o tempo de pré-aquecimento da sonda, a partir do qual o comportamento desta passa a ser próximo do ideal. Alguns autores não utilizam este fator de correção quando consideram a sonda construída adequadamente, sendo este tempo de aquecimento inicial (fase lag) inexistente ou desprezível. Outra opção é a que foi seguida por Sweat (1971) e Laurentino (2007), que fizeram aferição da sonda com materiais padrões de condutividade térmica conhecida, e adotaram um fator de correção (f_c), de acordo com a seguinte expressão:

$$T - T_1 = \frac{f_c}{K_0} \ln\left(\frac{t}{t_1}\right) \quad (2.8)$$

Para aferição da sonda, os materiais a serem utilizados devem possuir características de dispersão de calor similares às do meio ao qual será realizado o estudo, de forma que sua condutividade térmica efetiva mantenha um valor próximo ao valor da amostra cujo K_0 se deseja avaliar. Do mesmo modo, a superfície de contato entre a sonda e a amostra padrão deve ser similar à superfície de contato entre a sonda e a amostra a ser analisada (LAURENTINO, 2007).

Como regras gerais para obtenção de bons resultados experimentais, devem ser evitados gradientes de temperatura na amostra até o início do experimento e não pode haver refluxo de calor da parede para o centro da amostra durante a análise. O método da sonda fornece bons resultados para sólidos secos em geral, sendo também satisfatório para analisar materiais com baixa umidade, pois não há alterações significativas na distribuição de umidade no meio em curtos tempos de experimento (HOOPER; LEPPER, 1950).

Entretanto, a transferência de calor em materiais porosos úmidos pode ocorrer por condução e ao mesmo tempo ser influenciada pela transferência de massa, devido à migração de umidade na fase vapor (SAKIYAMA; YANO, 1990; GOEDEKEN et al., 1998).

Fang e colaboradores (2000) determinaram a condutividade térmica de quatro tipos de grânulos de amido de arroz com densidades *bulk* de 600 a 800 kg/m³, temperaturas de 20, 50 e 80 °C e umidades de 4, 20 e 40 % (b.u.), utilizando o método da sonda linear. Nos experimentos destes autores, a condutividade térmica foi significativamente diferente entre os diferentes amidos de arroz e suas classificações entre cerosos com baixo ou alto teor protéico. Além disso, a condutividade térmica aumentou significativamente com o aumento da densidade *bulk*, da temperatura e do conteúdo de água. No mesmo trabalho, são encontrados modelos matemáticos para calcular os valores de condutividade térmica nestas condições para aplicações práticas.

Sreenarayanan e colaboradores (1985) determinaram a condutividade térmica efetiva de soja pelo método da sonda linear, e também observaram dependência linear positiva da condutividade térmica em função do conteúdo de água do material, sendo que a condutividade térmica aumentou de 0,114 para 0,168 W/m°C conforme o conteúdo de umidade no grão variou de 9 para 30 % (b.u.).

Normalmente, o método da sonda é utilizado em temperatura ambiente, sendo os modelos encontrados satisfatórios para prever a condutividade efetiva em diferentes umidades. Porém, como tais modelos não incluem a transferência de calor devido à vaporização (K_v) ou devido à presença de um filme de água livre, os valores de K_0 obtidos para materiais úmidos podem não ser corretos, especialmente para condições de temperaturas elevadas, em que a vaporização é favorecida, ou de umidades elevadas, em que o excesso de água fica fracamente ligado à matriz sólida, sugerindo ser necessário corrigir a modelagem para incluir estes efeitos.

Laurentino (2007) empregou o método da sonda linear para obtenção de K_0 de farelo de trigo, bagaço de laranja e de bagaço de cana-de-açúcar em diferentes temperaturas e teores de umidade. Para aferição da sonda, a autora escolheu como materiais padrões de condutividades térmicas conhecidas a lã de vidro (bagaço de cana), esferas de vidro de 3 mm de diâmetro (bagaço de laranja) e serragem (farelo de trigo), ressaltando que o último material padrão poderia não ser o mais adequado. A autora observou que, para os casos em que a umidade do meio e/ou a temperatura eram elevadas, a aplicação do método foi comprometida, tendo em vista que não houve porção linear no gráfico do logaritmo da temperatura em função do tempo para análise. Laurentino (2007) sugeriu que o problema estaria relacionado à alta

dissipação de calor provocada pelo meio úmido, devido ao mecanismo de transferência de massa por vaporização, não previsto pelo modelo adotado.

Sakiyama e Yano (1990) descreveram a condutividade total dos sistemas porosos úmidos (K_t) como a soma das contribuições da condutividade verdadeira (K_0) e da transferência de calor devido à vaporização (K_v):

$$K_t = K_0 + K_v \quad (2.9)$$

Goedeken e colaboradores (1998) aplicaram o modelo de resistências térmicas em série no meio poroso para prever a condutividade verdadeira do meio, qual seja:

$$K_0 = (1 - \varepsilon) K_{\text{sólido úmido}} + \varepsilon K_{\text{ar}} \quad (2.10)$$

onde ε é a porosidade do sistema;

$$K_{\text{sólido úmido}} = (1 - x) K_{\text{sólido seco}} + x K_{\text{água}} \quad (2.11)$$

e x é a fração volumétrica de água no meio poroso.

Esses autores fizeram experimentos aplicando pressões de até 18 atm nas amostras para evitar a migração de umidade através da fase gasosa e demonstraram que os valores de K_0 obtidos sob pressão são próximos àqueles calculados através do modelo descrito, o que indica que as pressões elevadas minimizaram a mobilidade do ar e do vapor d'água no meio.

Ainda assim, faz-se necessária uma proposta de modelagem térmica e evaporativa ou de duas fases (matriz sólida e filme de água líquida) que permita estimar adequadamente valores de K_0 para meios porosos úmidos, como normalmente estes são empregados como substratos na FES.

2.3 Simulação de processos de FES em leito fixo

A modelagem matemática e a simulação, como ferramentas do desenvolvimento tecnológico de processos fermentativos, prevêm o comportamento de um processo, principalmente em condições não testadas empiricamente, possibilitando a determinação das condições operacionais ótimas dos sistemas e auxiliando no projeto e no ajuste de algoritmos de controle. A partir da modelagem e simulação, é possível reproduzir o comportamento real de um sistema, visando à otimização do processo (SCHMIDELL et al., 2001). Para isso,

comumente se utilizam como ferramentas linguagens de programação, tais como FORTRAN e PASCAL, e *softwares* comerciais, tais como o MatLab (*Matrix Laboratory*: The MathWorks, Massachusetts, Estados Unidos) e o MAPLE (Maplesoft, Ontario, Canadá), *softwares* de programação que proporcionam simulação digital a partir dos modelos informados.

O MatLab é uma linguagem muito eficiente em termos de computação técnica, visto que é bastante versátil para cálculos matemáticos, simulações e modelagens, análises numéricas, visualização de gráficos, etc. Em geral, utilizam-se métodos numéricos que requerem um algoritmo bem definido do método a ser aplicado, sendo que o MatLab fornece um pacote com as ferramentas numéricas necessárias para solução de diversos tipos de problema. Na indústria, o *software* alcançou o status de ferramenta de pesquisa, projeto e desenvolvimento (GILAT, 2004).

O conceito de modelagem em FES é a busca por expressões matemáticas que representem o sistema reacional em questão, de forma que os modelos matemáticos, verificados com base em dados obtidos em escala laboratorial, possam ser usados como ferramentas no dimensionamento de bioreatores de larga escala. Essas expressões têm o objetivo de estabelecer as relações ou funções entre diferentes variáveis que caracterizem o sistema. Comumente, as expressões que modelam os sistemas de FES são dadas na forma de equações diferenciais parciais (PDEs) que sejam capazes de descrever a cinética de reação e os fenômenos de transferência de calor no sistema reacional. Essas PDEs, para as quais, em geral, não se encontra solução analítica reportada na literatura, são normalmente resolvidas numericamente empregando métodos numéricos, como, por exemplo, a discretização das variáveis por diferenças finitas e a solução simultânea das equações diferenciais ordinárias através do método de Runge-Kutta.

O projeto de engenharia de sistemas de FES tem sido dificultado pelos inconvenientes em fazer medidas experimentais diretas, o que leva a uma lacuna de modelos matemáticos. Diante disso, a modelagem de bioreatores pode apresentar um papel crucial na análise, no projeto e no desenvolvimento de bioprocessos. A simulação de sistemas reacionais de FES em bioreatores de leitos fixos empacotados pode fornecer informações de prováveis pontos quentes e alternativas operacionais de como evitar esta deficiência devida à geração de calor durante a fermentação (THOMÉO et al., 2004). As simulações de processos fermentativos utilizando modelos que descrevem os mecanismos de transferência de calor em substratos utilizados em FES são fundamentais para a compreensão do processo e a determinação de variáveis importantes numa ampliação de escala. No entanto, informações experimentais que

validam esses modelos são escassas na literatura, o que compromete a possibilidade de utilização industrial de reatores para FES. Neste sentido, estudos de simulação de processos de FES têm-se intensificado com o intuito de fornecer informações que possam viabilizar a ampliação de escala de bioreatores para processos de FES (ASHLEY et al., 1999).

Na literatura sobre FES em leitos fixos empacotados percolados por ar, o modelo pseudo-homogêneo bidimensional tem sido o mais empregado para representar fisicamente os fenômenos de transferência de calor, uma vez que o sistema é muito semelhante aos reatores catalíticos empacotados e percolados por um fluido.

Entretanto, é sabido que os experimentos de transferência de calor conduzidos com materiais orgânicos englobam, além dos demais mecanismos de transporte de calor por condução e convecção, a ocorrência de calor latente de vaporização e a geração de calor metabólico pelo microrganismo no interior do leito empacotado.

Sangsurasak e Mitchell (1995) propuseram um modelo descrevendo a transferência de calor bidimensional em um bioreator de leito empacotado com geometria cilíndrica para processos de FES, capaz de descrever uma larga faixa de geometrias e condições operacionais, melhorando o modelo anteriormente proposto por Saucedo-Castaneda e colaboradores (1990), que negligenciava a transferência de calor axial, o qual foi apropriado somente para colunas cilíndricas de pequeno diâmetro operando a baixas taxas de aeração.

Mais adiante, Sangsurasak e Mitchell (1998) melhoraram o seu modelo, que já incluía um termo descrevendo a geração de calor metabólico, por meio do acréscimo de um termo descrevendo a evaporação de água da matriz porosa, que contribui significativamente para a remoção de calor no bioreator. Com isso, Sangsurasak e Mitchell (1998) apresentaram o modelo dado na equação (2.12) para modelagem da transferência de calor num processo de FES em leito fixo:

$$\rho_b C_{pb} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + (C_{pa} + f\lambda) \rho_a V_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) = \left[\frac{K_b}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + K_b \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \right] + K_b \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \rho_s (1 - \varepsilon) Y \frac{\partial X}{\partial t} \quad (2.12)$$

onde C_{pb} é o calor específico efetivo do leito e ρ_b sua densidade; C_{pa} é o calor específico do ar úmido percolante e ρ_a sua densidade; V_z é a velocidade superficial do gás (ar úmido); t é a variável tempo; f expressa o conteúdo de vapor d'água no ar por unidade de temperatura; λ é o calor latente de vaporização da água; K_b é a condutividade térmica efetiva do leito; ρ_s é a densidade do substrato sólido; ε é a porosidade do leito; z é a variável posição axial; r é a

variável posição radial; Y é o coeficiente de rendimento de energia gerada por unidade de biomassa produzida; e X é a concentração de biomassa microbiana no leito.

Nota-se pela equação (2.12) que o equacionamento dos fenômenos térmicos em reatores de FES em leito fixo torna-se complexo, dificultando a inclusão de todas as contribuições de geração e remoção de calor no interior dos bioreatores.

Como o leito de substrato foi tratado como uma matriz pseudo-homogênea, os valores para densidade, condutividade térmica e calor específico do leito foram calculados por meio da média ponderada das propriedades do ar percolante e do substrato dentro do leito, utilizando-se da porosidade como peso de ponderação, por representar a fração de ar, ou fração de vazios, no interior do meio poroso. Além disso, as propriedades físicas e térmicas do leito são assumidas como independentes da temperatura.

As condições de contorno normalmente adotadas para solução da equação (2.12) correspondem às seguintes situações físicas: temperatura no fundo do leito constante e igual à temperatura de entrada do ar; ausência de resfriamento externo no topo do leito; simetria cilíndrica; e resfriamento convectivo nas laterais pelas paredes do leito. A resistência das paredes do bioreator à troca de calor foi desprezada pelos autores (SANGSURASAK; MITCHELL, 1998). As equações (2.12a) a (2.12d), respectivamente, representam matematicamente as condições de contorno descritas e adotadas para solução da equação (2.12):

$$\text{Para } z = 0, \quad T = T_0 \quad (2.12a)$$

$$\text{Para } z = L, \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (2.12b)$$

$$\text{Para } r = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (2.12c)$$

$$\text{Para } r = R, \quad -K_b \frac{\partial T}{\partial r} = h_p (T_p - T_R) \quad (2.12d)$$

Nas equações de balanço dos fenômenos térmicos nos reatores de FES, é comum considerar-se que a taxa de calor gerado pelo metabolismo microbiano durante o processo fermentativo seja diretamente proporcional à produção de nova biomassa, sendo ignorada a geração de calor devido à manutenção do metabolismo do agente biológico (SANGSURASAK; MITCHELL, 1998), conforme se encontra representado no último termo da equação (2.12). Por esse motivo, encontram-se também na literatura diversos estudos de

modelagem da cinética de crescimento dos microrganismos empregados em FES, informação esta que é utilizada para avaliar a geração de calor metabólico pelo microrganismo durante a fermentação, que corresponde ao aporte de calor que deve ser removido do sistema para evitar superaquecimento do meio.

A cinética de crescimento dos microrganismos em FES tem sido comumente expressa como uma cinética de primeira ordem ou, preferencialmente, como uma equação logística, que é um modelo não-estruturado empírico e baseado em observações experimentais, no qual é possível descrever as diferentes sensibilidades dos microrganismos em função da temperatura. Apesar da simplicidade matemática, a equação logística pode representar uma aproximação adequada da curva de crescimento completa em uma única equação, incluindo as fases lag, de crescimento exponencial e estacionária (FANAIEI; VAZIRI, 2009), sendo representada por:

$$\frac{d X}{d t} = \mu X \left(1 - \frac{X}{X_m} \right) \quad (2.13)$$

onde X é a concentração de biomassa microbiana no substrato e X_m seu valor máximo; e μ é a taxa de crescimento específico, expressa empiricamente como uma função da temperatura, de acordo com a seguinte expressão:

$$\mu = \left(\frac{s + (T_{m\acute{a}x} - T_{opt})}{T_{m\acute{a}x} - T_{opt}} \right) \left(\frac{\mu_{opt} (T_{m\acute{a}x} - T)}{s + (T_{m\acute{a}x} - T)} \right) \quad (2.13a)$$

onde s é uma constante que representa a sensibilidade da taxa de crescimento específico a aumentos da temperatura; $T_{m\acute{a}x}$ é a temperatura máxima de crescimento do microrganismo; T_{opt} é a temperatura ótima de crescimento; e μ_{opt} é a taxa ótima de crescimento específico do microrganismo. A condição inicial adotada para solução da equação (2.13) é de que em $t = 0$, $X = X_0$ (concentração de biomassa no início do processo).

Diante do exposto, considerando apenas os fenômenos de transferência de calor no sistema, nota-se que os modelos matemáticos propostos para FES consistem de uma equação descrevendo a cinética de crescimento do agente de fermentação e outra equação descrevendo o balanço de energia térmica sobre cada posição no interior do bioreator de leito empacotado, de forma que seja possível prever o comportamento térmico do bioreator durante todo o

processo por meio de simulações numéricas. Sangsurasak e Mitchell (1998) ainda sugerem a incorporação de um balanço de água ao seu modelo, de modo que este passe a ser capaz também de prever os efeitos de segregação de umidade e de remoção de calor latente de vaporização das matrizes porosas.

Tendo em vista que a cultura de *Aspergillus niger* tem a capacidade de produzir nada menos do que 19 tipos diferentes de enzimas, dependendo da indução e/ou do substrato utilizado, boa parte dos dados experimentais encontrados na literatura referem-se a essa cultura, o que tem facilitado os estudos de modelagem e simulação de processos fermentativos com este microrganismo.

Saucedo-Castaneda e colaboradores (1990) estudaram o crescimento de *Aspergillus niger* em farinha de mandioca, fonte amilácea, em um bioreator de leito empacotado cilíndrico, aerado a partir do fundo com ar úmido e com uma camisa de água removendo calor por convecção através da sua parede externa. A altura da coluna era de 35 cm e o raio era de 3 cm, tendo sido realizadas medidas de temperaturas em quatro diferentes posições radiais e uma posição axial.

Sangsurasak e Mitchell (1998) verificaram o modelo proposto na equação (2.12) – que equaciona a transferência de calor radial e axial, a geração de calor metabólico e a remoção de calor por evaporação de água da matriz porosa – com relação aos dados experimentais de Saucedo-Castaneda e colaboradores (1990), e obtiveram boa concordância entre os perfis de temperatura preditos pelo modelo e os referidos dados experimentais, conforme se pode observar nas Figuras 2.1a a 2.1d. Nota-se nas figuras que o modelo bidimensional proposto descreveu temperaturas mais altas durante as fases de aquecimento e resfriamento, mas predisse altura e tempo do pico de temperatura próximos dos experimentais.

Conforme ainda se observa nas Figuras 2.1a a 2.1d, o modelo bidimensional de Sangsurasak e Mitchell (1998) previu um aquecimento mais rápido do substrato durante um período de latência mais curto, observado dentro das primeiras 10 horas de processo, quando comparado aos dados experimentais de Saucedo-Castaneda e colaboradores (1990), com a discrepância sendo maior próximo ao eixo central da coluna, como visto nas Figuras 2.1a (centro) e 2.1b ($r/R = 0,4$). Durante este período de latência, a produção de calor metabólico foi desprezível, o que se nota pela lenta elevação de temperatura neste período inicial do processo.

A contribuição da convecção entre o substrato sólido e o ar de percolação foi relativamente pequena no caso do projeto de coluna fina e com a baixa velocidade superficial usada por Saucedo-Castaneda e colaboradores (1990), e então ambos os modelos radial e

bidimensional predisseram gradientes radiais de temperatura significativos. Entretanto, o modelo bidimensional também predisse perfis axiais de temperatura significativos, com diferenças de temperatura de 10 °C entre alturas de 3 e 21 cm, e diferenças acima de 5 °C entre alturas de 10 e 21 cm. Experimentalmente, Saucedo-Castaneda e colaboradores (1990) observaram que, depois dos primeiros 5 cm dos 35 cm totais da coluna, onde a temperatura do leito subia nitidamente, as diferenças de temperatura ao longo do restante da coluna foram inferiores a 3 °C, tendo sido frequentemente muito menores que isso.

No trabalho de Saucedo-Castaneda e colaboradores (1990), a coluna estreita e a baixa velocidade superficial de ar levaram à dominância da transferência de calor radial no processo. O modelo permitiu analisar a contribuição dos vários mecanismos de transferência de calor envolvidos na remoção de calor do interior do leito. Esta análise mostrou que, até mesmo quando ar saturado e com baixa velocidade de escoamento é usado para aerar o leito empacotado, devido ao aumento da temperatura conforme o ar atravessa o leito, a evaporação ainda tem contribuições muito significativas para a remoção de calor.

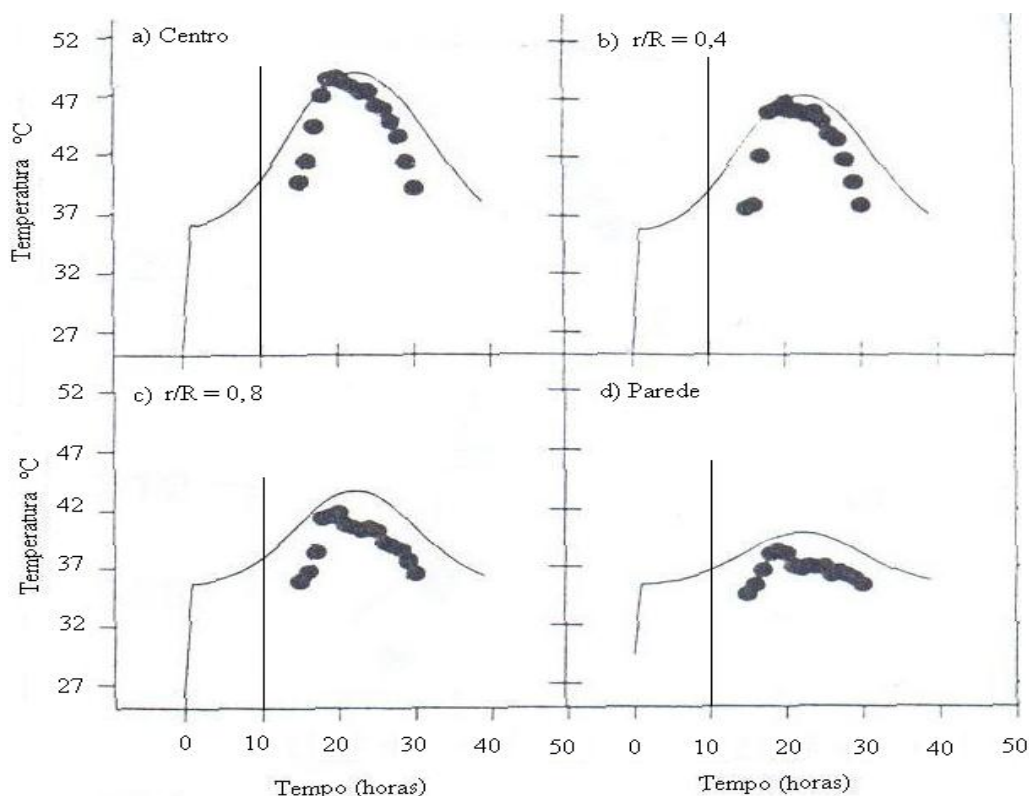


Figura 2.1: Comparação das predições do modelo bidimensional de Sangsurasak e Mitchell (1998) (—) com dados experimentais de Saucedo-Castaneda e colaboradores (1990) (●) para altura adimensional = 0,6 e raios adimensionais: (a) 0,05; (b) 0,4; (c) 0,8; (d) 1,0 (extraído e adaptado de Sangsurasak e Mitchell, 1998).

Ghildyal e colaboradores (1994) estudaram o crescimento de *A. niger* em farelo de trigo úmido em uma coluna de aço inoxidável percolada por ar saturado e resfriada pela parede. A altura da coluna era de 34,5 cm e o raio era de 7,5 cm, tendo sido feitas medidas de temperatura em somente uma posição radial e uma posição axial. Assim, Ghildyal e colaboradores (1994) mediram perfis temporais de temperatura no centro do leito, utilizando três níveis de vazão de fluido percolante no bioreator.

Sangsurasak e Mitchell (1998) verificaram também o modelo proposto na equação (2.12) – englobando transferência de calor radial e axial, geração de calor metabólico e remoção de calor por evaporação – com relação aos dados experimentais de Ghildyal e colaboradores (1994). Conforme se observa na Figura 2.2, o modelo bidimensional predisse com boa precisão e exatidão a magnitude e os instantes dos picos de temperatura para as três diferentes taxas de escoamento de ar utilizadas experimentalmente. A boa concordância com os resultados experimentais sobre uma larga faixa de velocidades superficiais sugeriu que o modelo proposto descreveu razoavelmente bem as contribuições do resfriamento convectivo e evaporativo, uma vez que esses são os mecanismos de remoção de calor que são mais diretamente afetados pela velocidade superficial de escoamento do fluido através da matriz porosa que recheia o leito.

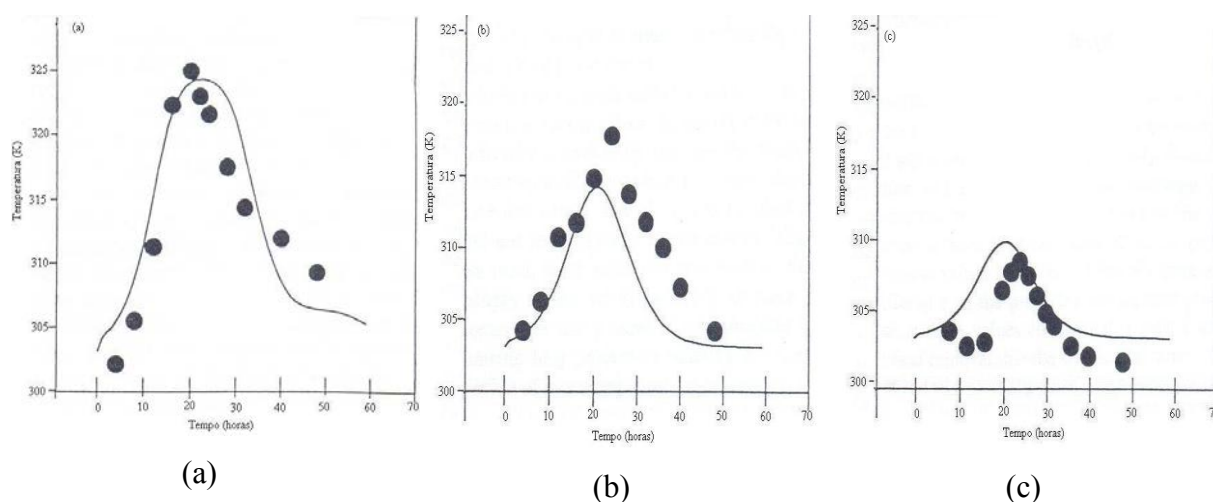


Figura 2.2: Comparação das predições do modelo (—) aos dados experimentais de Ghildyal e colaboradores (1994) (●), para raio adimensional 0,05, altura adimensional 0,5 e velocidades superficiais: (a) 0,0047; (b) 0,0141; (c) 0,0235 m/s (SANGSURASAK; MITCHELL, 1998).

Fanaei e Vaziri (2009) também estudaram a modelagem e simulação dos fenômenos térmicos em bioreatores de FES empregando os dados de Ghildyal e colaboradores (1994). Como Ghildyal e colaboradores (1994) reportaram os perfis de temperatura somente em altura de 17 cm de leito, este foi também o valor usado como a altura do bioreator nas simulações, a fim de possibilitar avaliação dos modelos de predição com os dados experimentais disponíveis. Neste trabalho, os autores utilizaram-se de um programa escrito em linguagem MatLab para simular o fenômeno.

Para modelar as variações de temperatura no leito, esses autores utilizaram dois modelos de balanço energético muito semelhantes ao modelo de Sangsurasak e Mitchell (1998), expresso na equação (2.12), porém assumiram que as variações radiais de temperatura eram desprezíveis por conta de o escoamento de ar através do leito ser considerado por esses autores como aproximadamente plano, de forma que eliminaram o primeiro e o segundo termos à direita da equação (2.12). Esses modelos também contemplavam as expressões para a geração de calor metabólico e para a remoção de calor evaporativa e convectiva; entretanto, somente um dos modelos, denominado distribuído (2.14a), considerava também o termo diferencial da condução axial de calor, enquanto o modelo de parâmetros concentrados (2.14b) trabalhava apenas com a variação de temperatura entre a entrada e a saída do leito.

$$\rho_b C_{pb} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \rho_s (1 - \varepsilon) Y \frac{\partial X}{\partial t} - \rho_a C_{pa} V_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho_a f \lambda V_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + K_b \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.14a)$$

$$\rho_b C_{pb} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \rho_s (1 - \varepsilon) Y \frac{\partial X}{\partial t} + \rho_a C_{pa} \frac{V_z}{L} (T_a - T) + \rho_a f \lambda \frac{V_z}{L} (T_a - T) \quad (2.14b)$$

onde C_{pb} é o calor específico efetivo do leito e ρ_b sua densidade; C_{pa} é o calor específico do ar úmido percolante e ρ_a sua densidade; t é a variável tempo; f expressa o conteúdo de vapor d'água no ar por unidade de temperatura; λ é o calor latente de vaporização da água; K_b é a condutividade térmica efetiva do leito; ρ_s é a densidade do substrato sólido; ε é a porosidade do leito; Y é o coeficiente de rendimento de energia gerada por unidade de biomassa produzida; T_a é a temperatura de entrada do ar no leito; z é a variável posição axial; L é o comprimento do leito; e X é a concentração de biomassa microbiana no leito.

Destaque especial foi dado no trabalho realizado por Fanaei e Vaziri (2009) à expressão para a taxa de geração de calor metabólico pelo microrganismo durante o processo

fermentativo, a qual foi obtida por meio de uma modificação dos modelos cinéticos comumente empregados para o crescimento microbiano em bioreatores de estado sólido. Na maioria dos estudos anteriores, a taxa de crescimento tinha sido expressa somente como uma função da temperatura atual, por meio da taxa de crescimento específico do microrganismo, como visto na equação (2.13). Entretanto, sabe-se que a taxa de crescimento microbiano é função também da variação de temperatura sofrida pelo organismo, no decorrer de todo o processo. No modelo proposto, Fanaei e Vaziri (2009) consideraram que a taxa de crescimento depende da temperatura atual do bioreator e também do binômio tempo-temperatura de tratamento a que o organismo previamente foi submetido ao longo do processo fermentativo. Para expressar tais efeitos, esses autores empregaram o modelo logístico da equação (2.13) modificada, a saber:

$$\frac{d X}{d t} = \mu \Phi X \left(1 - \frac{X}{X_m} \right) \quad (2.15)$$

onde Φ representa o nível de um fator fisiológico, que consiste de um valor adimensional relacionado ao estado fisiológico do organismo.

De acordo com os autores, tal fator indica o nível de um componente essencial da biomassa que desempenha uma importante função no mecanismo de crescimento do agente biológico, representando o efeito do regime de temperatura no crescimento do microrganismo, por meio das mudanças do nível desse componente essencial da biomassa. Como pode ser visto naquele artigo, a desnaturação térmica associada a esse fator ao longo do tempo de processo foi expressa em função das taxas das reações de síntese e desnaturação deste fator, as quais dependem da temperatura no leito. A taxa de crescimento específico, por sua vez, é expressa empiricamente como uma função da temperatura.

Os resultados de simulação de Fanaei e Vaziri (2009) mostraram que as predições do modelo distribuído apresentaram boa concordância com os dados experimentais, sendo capaz de fornecer predições detalhadas sobre a temperatura em qualquer tempo e posição dentro do leito, conforme pode ser visto na Figura 2.3.

Levando em consideração que o modelo distribuído proposto por estes autores contemplava os mecanismos de transferência de calor envolvidos no bioreator, com aproximações e considerações aceitáveis, pôde-se concluir que os gradientes de temperatura puderam ser satisfatoriamente preditos por este modelo.

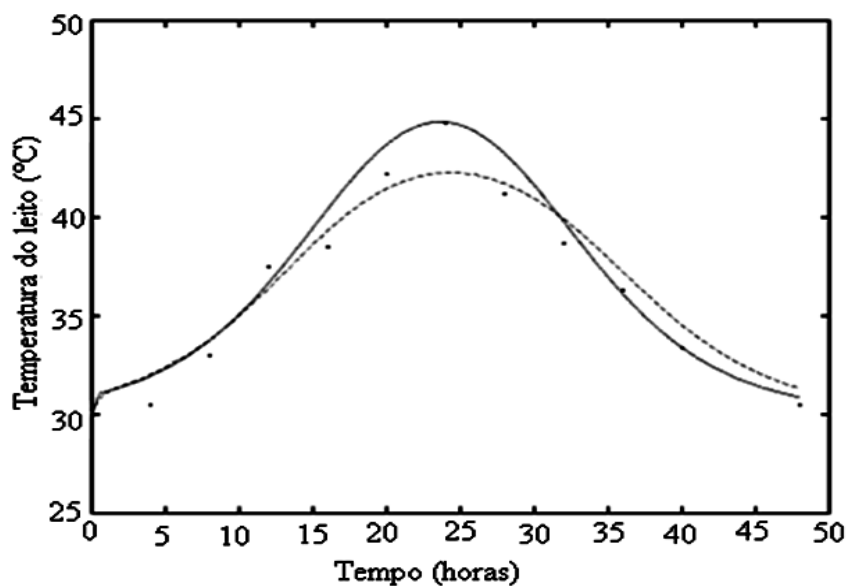


Figura 2.3: Comparação das previsões dos modelos de transferência de calor de parâmetros concentrados e distribuídos com dados experimentais de Ghildyal e colaboradores (1994) (.) Dados experimentais; (--) Previsões do modelo de parâmetros concentrados; (—) Previsões do modelo de parâmetros distribuídos (extraído de Fanaei e Vaziri, 2009).

Laurentino (2007) e Umsza Guez (2009) realizaram conjuntamente experimentos de fermentação sólida em bioreator de leito fixo empregando o fungo termofílico *Thermomucor indiciae-seudaticae* N 31 como agente fermentador e um meio composto por bagaços de cana e de laranja e farelo de trigo na proporção de 1:2:2 (peso), com umidade de 70 % (b.u.), e ar percolante com umidade relativa de 95 %. O referido microrganismo é termo-resistente e é grande produtor de enzimas pectinolíticas. Apesar do curto tempo de fermentação, 24 horas, estes autores observaram que houve segregação de umidade no leito, com conseqüente gradiente de produção de enzimas. Os resultados experimentais de Laurentino (2007) e Umsza Guez (2009) mostraram que as temperaturas ao longo do leito atingiram um pico em torno de 48 °C, mantendo-se constantes nesta faixa nas primeiras 24 horas de processo e decaindo após esse período. De acordo com os autores, a fase lag durou cerca de 10 horas, período no qual a geração de calor metabólico pelo microrganismo não foi muito intensa. Quanto à condição ótima de temperatura para crescimento e produção da enzima de interesse, Laurentino (2007) e Umsza Guez (2009) concluíram que a temperatura de 45 °C foi considerada ótima na escala de reator piloto, uma vez que foi a condição térmica que propiciou maior produção de pectinase.

Na Figura 2.4, são apresentados os perfis de temperatura obtidos por Laurentino (2007) e Umsza Guez (2009), onde as posições correspondentes às temperaturas T_1 a T_5 são indicadas na própria figura.

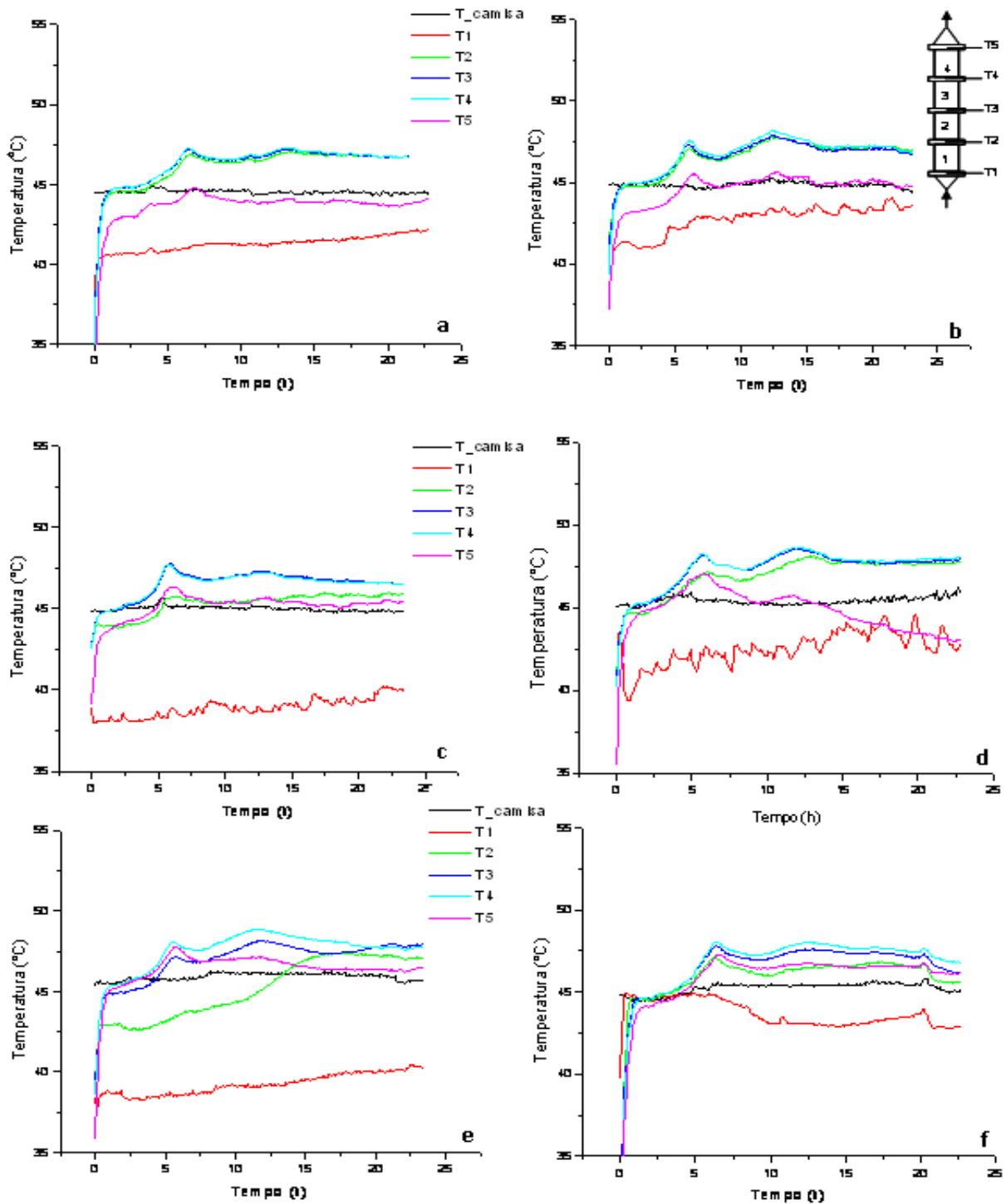


Figura 2.4: Distribuição de temperaturas no leito ao longo do processo fermentativo de Umsza Guez (2009) nas condições T_{camisa} – Tar – Vazão L/h: a) 45-40-60, b) 45-45-60, c) 45-40-120, d) 45-45-120, e) 45-40-180 e f) 45-45-180 (extraído de Umsza Guez, 2009).

Os autores notaram que, qualitativamente, os perfis foram similares para as diferentes condições operacionais empregadas, enquanto que os picos de temperatura foram entre 1,3 e 2,9 °C acima da temperatura média do processo. Foram registrados dois picos de temperatura, sendo que o primeiro iniciou-se a partir de aproximadamente 3 horas de fermentação, estendendo-se até cerca de 8 horas. Após este pico, a temperatura ficou constante por curto período, para posteriormente formar outro pico progressivamente, após o que esta temperatura de pico se manteve até o final das 24 horas de fermentação. Cabe ressaltar que os autores consideraram que as temperaturas registradas pelos termopares 2, 3 e 4 eram mais representativas do processo.

O trabalho conjunto de Laurentino (2007) e Umsza Guez (2009) é um claro exemplo de que muito ainda há para ser feito em termos de modelagem e simulação de processos de FES, uma vez que seu trabalho fornece dados e parâmetros experimentais inéditos que poderão ser úteis em futuros estudos de modelagem e simulação de FES em leito fixo. Assim, utilizando seus dados experimentais, será possível aplicar os modelos cinéticos de crescimento e modelos de transferência de calor já propostos e verificados na literatura, bem como avaliar e propor novos modelos ou modificações nos modelos existentes, a fim de que os dados preditos pelas modelagens possam ser tão próximos quanto possíveis dos dados experimentais para diferentes combinações de substrato-microrganismo e condições operacionais variadas.

As perspectivas do ramo da ciência que trata dos processos de FES são de crescimento potencial de futuros trabalhos acerca de estudos de projeto, modelagem e simulação de bioreatores de FES em leitos fixos. Os estudos devem ser realizados tanto em termos de obtenção de dados experimentais quanto em termos de modelagem e simulação das cinéticas de crescimento dos microrganismos e dos fenômenos térmicos e gradientes de temperatura no interior dos leitos fixos, na tentativa de auxiliar na otimização dos processos e possibilitar as aplicações desses processos em escala industrial. Ademais, diversas são as combinações possíveis de agentes biológicos e resíduos sólidos agroindustriais usados como substratos na matriz porosa, sabendo-se que extensa gama de microrganismos é capaz de se adaptar a processos de FES e desta forma produzir diferentes tipos de bioprodutos de alto valor agregado e de interesse tecnológico, científico e industrial a partir de diferentes substratos e sob distintas condições operacionais.

Neste sentido, estudos para obtenção de dados e parâmetros experimentais e estudos de modelagem e simulação de processos tornam-se necessários para diferentes microrganismos e diferentes substratos empregados em bioreatores de FES em leito fixo.

Além disso, deve-se manter em vista a necessidade de solucionar, ou ao menos minimizar, os dois principais inconvenientes deste processo, que são o possível superaquecimento no interior do leito e a segregação de umidade na matriz porosa quando percolada por ar no estado insaturado ou mesmo saturado na entrada do leito.

Diante do quadro apresentado, têm-se perspectivas futuras bastante promissoras e crescimento científico potencial para estudos de bioprocessos de FES em leitos fixos, englobando desde o âmbito experimental até o âmbito de modelagens e simulações numéricas de processos.

2.4 Propriedades estruturais de leitos empacotados com recheios aplicáveis em FES

Várias propriedades efetivas dos meios porosos comumente aplicadas nos processos de FES dependem da sua estrutura, em especial da densidade e da porosidade dos leitos. Neste contexto, o conhecimento da estrutura do meio poroso é um fator relevante para o entendimento dos fenômenos que podem ocorrer nos sistemas particulados, contribuindo para a otimização dos processos de FES. Convém lembrar que as propriedades estruturais do meio poroso podem ser obtidas em sistemas não-reacionais, desde que seja empregada a mesma composição da matriz porosa utilizada no processo fermentativo. No entanto, em alguns casos, o meio poroso pode ser consumido pelo microrganismo, o que pode causar alteração da sua estrutura.

A densidade é uma propriedade importante nos estudos em leitos empacotados. Um sólido poroso possui uma densidade denominada aparente, também chamada densidade de partícula, que consiste na razão da massa de partículas pelo volume ocupado por estas, englobando o volume ocupado pelos seus poros internos. Considerando um leito de partículas porosas ou não, tem-se a densidade *bulk*, dada pela razão da massa do leito particulado pelo volume ocupado pelo leito, englobando o volume ocupado pelas partículas e o volume de espaços vazios entre estas.

O volume intersticial do leito pode influenciar em parâmetros como permeabilidade e condutividade térmica, por exemplo. Em sistemas de FES, em que há necessidade de fornecer O₂ e de remover CO₂ e calor metabólico gerado, a avaliação da estrutura porosa do substrato apresenta enorme valia. Neste contexto, a porosidade é outra propriedade estrutural importante dos leitos empacotados, sendo definida como a fração de vazios dentro de um dado volume do leito (AUGIER et al., 2010).

Zotin (1985) desenvolveu um trabalho detalhado sobre a estrutura de leitos testando diferentes técnicas de empacotamento, e concluiu que o empacotamento é fator primordial

para definir o comportamento da porosidade do sistema, seja ela local (ε) ou média ($\bar{\varepsilon}$). O empacotamento representa a acomodação das partículas ao recipiente que as contém; qualquer alteração no recheio tem como consequência mudanças sensíveis nos perfis de porosidade (ROUILLER, 2000). Avaliando o comportamento da porosidade com as coordenadas radial e axial em leitos de geometria cilíndrica, Zotin (1985) constatou que ε não pode ser considerada constante para qualquer região do leito, caso a razão diâmetro do leito por diâmetro da partícula (D/d_p) seja inferior a 30. A porosidade parte de um valor próximo à unidade junto à parede e decai oscilatoriamente conforme há um afastamento em direção ao centro do leito, podendo chegar a ser constante caso D/d_p seja suficientemente grande. Este comportamento deve-se ao fato de as partículas terem que se acomodar ao contorno físico imposto pelo tubo, distribuindo-se nas camadas subsequentes de forma cada vez mais aleatória, sendo o decaimento da porosidade função da geometria e do tamanho das partículas e da técnica de empacotamento. Por outro lado, quando a relação D/d_p é suficientemente grande, como geralmente acontece em leitos fixos destinados à FES, as perturbações ocasionadas pela proximidade da parede do leito tornam-se secundárias, de tal forma que predomina o comportamento médio amortecido do meio poroso.

A porosidade média do leito pode ser obtida através da seguinte expressão:

$$\bar{\varepsilon} = 1 - (\rho_{\text{bulk}} / \rho_{\text{partícula}}) \quad (2.16)$$

onde ρ_{bulk} e $\rho_{\text{partícula}}$ são as densidades do leito (ou *bulk*) e da partícula, respectivamente, que equivale a:

$$\bar{\varepsilon} = V_{\text{vazios}} / V_{\text{leito}} = (V_{\text{leito}} - V_{\text{sólidos}}) / V_{\text{leito}} \quad (2.16a)$$

onde V_{leito} é o volume do leito particulado; $V_{\text{sólidos}}$ é o volume ocupado somente pelos sólidos no leito e $V_{\text{vazios}} = (V_{\text{leito}} - V_{\text{sólidos}})$ é o volume de espaços vazios entre as partículas.

No mesmo trabalho, Zotin (1985) avaliou o empacotamento de leitos com partículas rígidas de formatos regulares (esferas e cilindros) e irregulares (lascas de basalto), e concluiu que os empacotamentos com partículas regulares apresentam efeito de parede que se prolongam a distâncias superiores a 3 d_p a partir da parede do tubo. Por outro lado, observou que os recheios irregulares resultaram em leitos com perfis de porosidade achatados e praticamente isentos de oscilação, sendo que o efeito de parede fica restrito a uma região muito próxima à parede, cerca de 0,5 d_p , conforme visto na Figura 2.5a.

Hamel e Krumm (2008) desenvolveram um trabalho semelhante ao de Zotin (1985) ao estudarem os perfis de porosidade de leitos empacotados com lascas de madeira finas, partículas irregulares e deformáveis, similares a alguns rejeitos sólidos agroindustriais aplicáveis como recheios em reatores de FES. Esses autores também observaram que a porosidade dos leitos de lascas de madeira partia de um valor máximo na parede (para $r/R = 1$, $\varepsilon = 1$) e que a curva de porosidade radial decaía até uma distância adimensional a partir da parede do tubo de 0,25 até 0,50, onde o valor da porosidade média era atingido; a partir deste ponto, a curva passava a seguir leves flutuações radiais oscilatórias, sem mostrar um mínimo claramente definido, conforme se vê na Figura 2.5b.

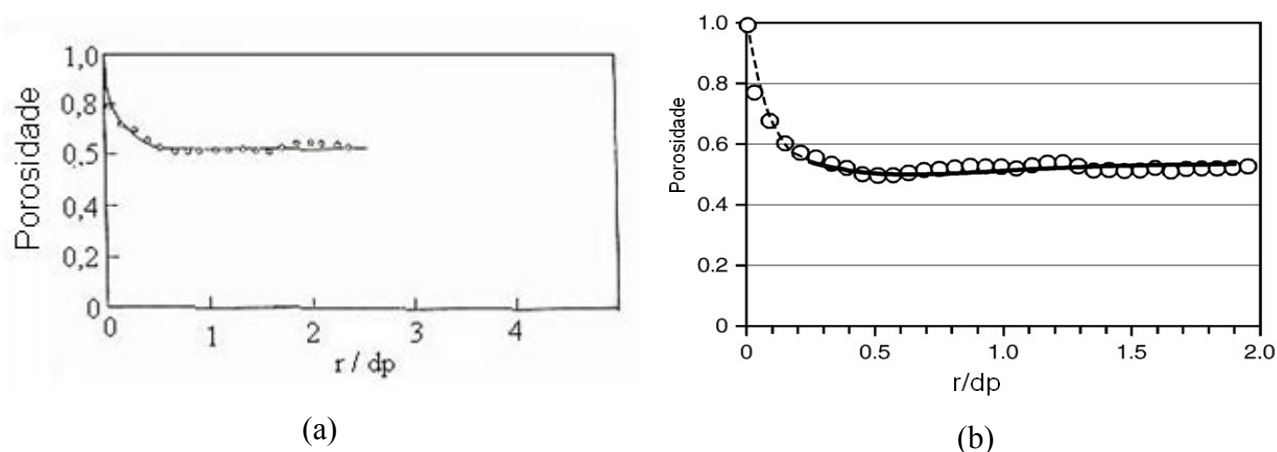


Figura 2.5: (a) Perfil radial de porosidade de leitos empacotados (a) com lascas de basalto (ZOTIN, 1985); (b) com lascas de madeira finas (HAMEL; KRUMM, 2008).

Embora as propriedades estruturais de leitos recheados com fibras indeformáveis já estejam bem estabelecidas, ainda são escassas as informações com relação à porosidade dos leitos empacotados com fibras deformáveis, tais como as que são empregadas como substratos em processos de FES. Trabalhando-se com fibras orgânicas de rejeitos sólidos agroindustriais, o meio poroso torna-se ainda menos homogêneo, as dimensões das partículas têm grande variabilidade e o espaço intersticial para o escoamento do fluido é ainda mais aleatório do que no caso do empacotamento com partículas regulares e indeformáveis.

Ademais, a mistura de partículas de diferentes tamanhos e formatos (como fibras, grânulos e farelos) pode ser necessária para suprir as necessidades do processo de FES em termos nutricionais e estruturais ou tecnológicos. Nestes casos, a técnica de empacotamento do leito deixa de ser trivial, tendo em vista a possibilidade de segregação das partículas que compõem o meio fermentativo. Zanelato (2010) demonstrou nítida heterogeneidade na

produção de enzimas celulolíticas em leitos fixos cujos empacotamentos propiciaram a segregação das partículas de um meio composto por fibras de bagaço de cana e farelo de trigo. Em decorrência da técnica de empacotamento, parte do farelo depositava-se ao fundo do leito, que apresentou maior desenvolvimento do fungo, e conseqüente maior produção de enzimas, do que as regiões superiores do leito.

Diante do exposto, um estudo específico das propriedades estruturais dos leitos recheados com materiais de interesse na FES é importante para os estudos de transferência de calor e massa e de otimização de processos em bioreatores de leito fixo.

CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A parte experimental e computacional deste trabalho foi desenvolvida no Laboratório de Medidas Físicas do Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos do IBILCE/UNESP. A parte computacional contou com o apoio do professor Dr. Fábio Bentes Freire, do Departamento de Engenharia Química da UFSCar – São Carlos – SP.

3.1 Materiais

3.1.1 Materiais padrões

Para aferição da sonda de condutividade térmica na estagnação, foram empregados como padrões materiais com valores de condutividade térmica conhecidos: esferas de vidro de 3 mm e microesferas de vidro de 0,3 mm de diâmetro e lã de vidro.

3.1.2 Materiais orgânicos

Os materiais utilizados foram bagaço de cana, bagaço de laranja e farelo de trigo.

O bagaço de cana foi gentilmente cedido pela Usina Cerradinho S/A, de Catanduva–SP, e apresentava irregularidade quanto ao tamanho das fibras e teor de umidade em torno de 60 % (b.u.). Para os experimentos, o bagaço de cana-de-açúcar foi seco em estufa de convecção forçada a 105 °C até atingir aproximadamente 6 % de umidade. Para fins de padronização do tamanho das fibras utilizadas, o material foi peneirado em peneiras de 4 e 3 mm, separando-se para uso nos experimentos apenas o bagaço retido na peneira de 3 mm. Foram selecionadas aleatoriamente 50 fibras de bagaço, as quais foram medidas com paquímetro. A média das 50 medidas de espessura das fibras resultou no diâmetro médio de partícula $dp = 0,177 \text{ mm}$ ($\pm 0,153 \text{ mm}$), que foi usado como dimensão característica necessária para cálculo dos parâmetros térmicos.

Para os ensaios na estagnação, as fibras de bagaço de cana foram acondicionadas em sacos plásticos nos devidos teores de umidade por aspensão de quantidades definidas de água, com auxílio de um borrifador doméstico. As amostras foram armazenadas em câmara fria a 5 °C por pelo menos 15 dias para homogeneização da umidade, sendo as amostras revolvidas diariamente. Foram empregados 17 teores de umidade variando entre 6,7 e 80 % (b.u.), verificados através de ensaios de medida de umidade pelo método da estufa de convecção forçada. Para os ensaios com percolação de ar, optou-se por trabalhar com as fibras mais secas

de bagaço de cana (6 % de umidade b.u.), tendo em vista não se contemplarem neste trabalho aspectos de transferência de massa.

O bagaço de laranja foi gentilmente fornecido pela indústria de cítricos Citrovita S/A, também de Catanduva-SP. O material era heterogêneo e constituído de cascas, sementes e polpa, com elevado teor de umidade. Para os experimentos, o bagaço de laranja foi moído, peneirado e seco em estufa a 60 °C até atingir umidade média de 10 % (b.u.), sendo armazenado em câmara fria. Nos ensaios, foram utilizadas as partículas retidas em peneira do sistema Tyler com abertura de 1,44 mm.

O farelo de trigo foi adquirido no comércio local, contendo cerca de 14 % de umidade (b.u.) e tamanho de partícula relativamente homogêneo, tendo sido empregado nos experimentos tal como adquirido.

Os materiais foram empregados, conforme a necessidade de obtenção de dados, individualmente ou misturados formando um meio composto contendo 20 % de bagaço de cana, 40 % de bagaço de laranja e 40 % de farelo de trigo (porcentagens em massa), tal como o meio fermentativo empregado por Laurentino (2007) e Umsza Guez (2009) em seus estudos experimentais de fermentação em bioreator de leito fixo.

Para os ensaios na estagnação, o meio composto também foi acondicionado em sacos plásticos nos devidos teores de umidade por aspersão de água, da mesma forma como feito para o bagaço de cana. Salienta-se que, neste caso, a mistura dos materiais na devida proporção do meio composto era feita com os materiais secos, ou seja, bagaço de cana com 6 % de umidade, bagaço de laranja com 10 % e farelo de trigo com 14 %, após o que se procedia à aspersão de água sobre a mistura em quantidade suficiente para obtenção da umidade final desejada no meio composto. Para verificação da umidade final do meio composto, a mistura era revolvida, e desta se tomava uma alíquota considerada homogênea e representativa da composição do meio. A determinação da umidade dessa amostra era feita pelo método gravimétrico em estufa de convecção forçada a 105 °C por 24 horas.

3.2 Determinação da porosidade dos leitos fixos recheados com meio composto

O meio composto foi empacotado em recipientes cilíndricos de aço inox de volumes conhecidos (418 e 696 cm³) através do despejo de porções de partículas misturadas, pressionando-se o leito com um disco de madeira (acoplado a uma haste) a cada adição, evitando-se agitação para que não ocorresse segregação das partículas constituintes do meio composto. O volume do recipiente foi calculado através de medidas do raio e da altura dos cilindros com paquímetro digital com precisão de 0,1 mm. A massa do leito foi obtida por

pesagem do recipiente empacotado em balança semi-analítica com precisão de 0,01 g. Assim, a densidade dos leitos (ρ_{bulk}) recheados com meio composto foi determinada pela razão entre a massa e o volume do leito.

A densidade das partículas (ρ_{ap}) para o meio composto foi determinada por ponderação das densidades de cada constituinte individualmente, as quais foram extraídas do trabalho de Laurentino (2007), que as mediu por gravimetria em um picnômetro, tendo óleo de soja e tolueno como fluidos picnométricos. Laurentino (2007) apresentou ajustes das densidades aparentes ou densidades de partícula dos materiais em função de seus conteúdos de umidade, conforme as expressões:

$$\text{Para bagaço de cana: } \rho_{\text{bag cana}} = 0,578 + (0,00365 \cdot \exp(\frac{X_{\text{bu}}}{0,149})) \quad (3.1a)$$

$$\text{Para bagaço de laranja: } \rho_{\text{bag lar}} = 0,978 + (0,264 \cdot \exp(\frac{-X_{\text{bu}}}{0,214})) \quad (3.1b)$$

$$\text{Para farelo de trigo: } \rho_{\text{far trigo}} = (0,23 \cdot X_{\text{bu}}) + 0,966 \quad (3.1c)$$

onde X_{bu} é a fração de umidade dos materiais, em base úmida.

De posse de ρ_{ap} e ρ_{bulk} , foi determinada a porosidade média (ε) do leito através da equação (2.16) apresentada na *Revisão da Literatura*.

3.3 Ensaios de condutividade térmica na estagnação

Foram realizados ensaios preliminares com esferas de vidro de 3 e 0,3 mm de diâmetro e com lã de vidro como materiais padrões de condutividade térmica conhecida, com a finalidade de testar a veracidade das considerações feitas para a aferição da sonda para obtenção da condutividade térmica de grãos de milho e de soja e de algodão, respectivamente, comparando-se os valores obtidos aos disponíveis na literatura.

Para aferição da sonda para os ensaios com bagaço de cana, foi empregado como material padrão de condutividade térmica conhecida a lã de vidro, que foi selecionada por ser inerte e apresentar as características estruturais e de contato com a sonda similares às das fibras de bagaço de cana. Para os ensaios com o meio composto por bagaços de cana e laranja e farelo de trigo, o meio padrão selecionado para aferição foram as microesferas de vidro de 0,3 mm de diâmetro, consideradas mais adequadas para representar o contato das partículas do meio composto com a sonda. Deste modo, as constantes da sonda foram obtidas a partir dos materiais de referência escolhidos para cada recheio estudado.

A Figura 3.1 mostra um esquema do conjunto completo utilizado nos experimentos. A sonda empregada era composta por um elemento de aquecimento (fio de constantan) e um termopar tipo T, ambos inseridos em uma bainha de aço inox com diâmetro $D = 0,6$ cm e comprimento $L = 21,5$ cm ($L/D = 35,8$).

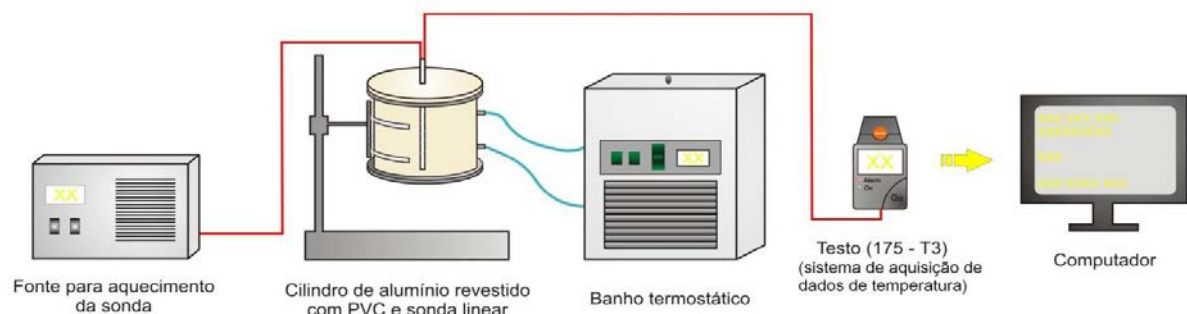


Figura 3.1: Conjunto experimental empregado para obtenção da condutividade térmica efetiva na estagnação pelo método da sonda linear.

Os ensaios foram realizados colocando-se o meio poroso em um cilindro de alumínio de 9,5 cm de diâmetro interno e 24,1 cm de comprimento, inserido em um tubo de PVC com diâmetro de 15,7 cm, sendo que no espaço anular entre os cilindros foi circulada água à temperatura constante, provida por um banho termostático. O sistema foi fechado com duas tampas de nylon, sendo que em uma delas estava acoplada a sonda linear. A resistência elétrica foi conectada a uma fonte de tensão de corrente contínua para promover o aquecimento sob taxa constante no interior do meio poroso. Os sinais provenientes do termopar foram coletados pelo *data logger* Testo modelo 175 – T3.

O experimento tinha início assim que era estabelecido o equilíbrio térmico na amostra, quando a sonda passava a ser aquecida e as temperaturas passavam a ser coletadas a cada 10 segundos. As temperaturas empregadas nos ensaios variaram entre 20 e 55 °C, correspondente à faixa de processos fermentativos de fungos mesófilos e termófilos, variando-se também a umidade dos substratos.

3.4 Ensaios térmicos no leito fixo percolado por ar

A Figura 3.2a apresenta esquematicamente o sistema térmico completo, o qual se assemelha aos tipicamente empregados para estudos de transferência de calor em leitos fixos empacotados (THOMÉO, 1990; THOMÉO, 1995; ROUILLER, 2000; LAURENTINO, 2007). Ar, fluido percolante, foi fornecido por compressor, sendo filtrado para remoção de

impurezas sólidas em suspensão e tendo sua vazão estabelecida por válvula agulha e monitorada por rotâmetro. Antes de percolar o leito, o ar foi aquecido em banho termostático a 40 °C, após o que percolou o leito. Os sinais provenientes dos termopares do sistema foram coletados por módulo de aquisição da *National Instruments* e enviados para um computador, sendo processados pelo *software Lab View 8.5*. A água da camisa de aquecimento era aquecida por outro banho termostático a 65 °C e circulada com auxílio de bomba centrífuga.

A Figura 3.2b apresenta um esquema da célula de medidas térmicas. O leito consistia em uma célula de inox, cujas dimensões eram de 4,67 cm de diâmetro interno e 30 cm de comprimento total, sendo 9 cm de seção de entrada e 21 cm de seção térmica. A seção de entrada consistia de um tubo não-encamisado com o mesmo diâmetro do tubo interior da seção térmica, tendo como função desenvolver o perfil de velocidade do fluido antes que este entrasse na seção térmica. A seção térmica era circundada por uma camisa de aquecimento, sendo que nesta seção eram coletados os dados de temperatura. A seção de entrada foi empacotada com esferas de vidro, para desenvolvimento do perfil de velocidade do ar, enquanto que a seção térmica foi empacotada com bagaço de cana-de-açúcar e/ou com meio composto.

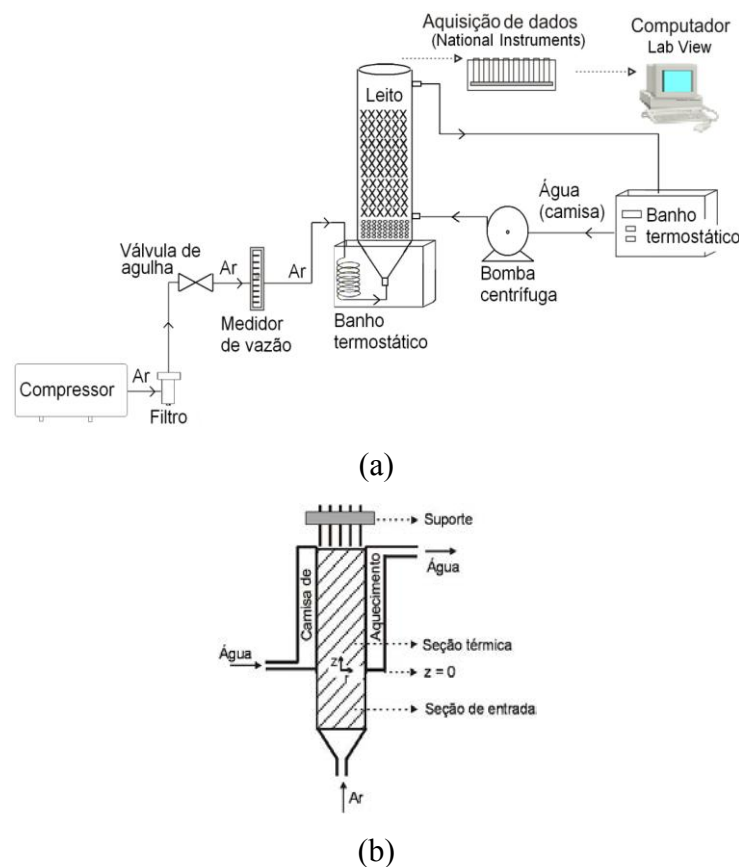


Figura 3.2: Aparatos experimentais: a) Sistema experimental completo para ensaios no leito fixo percolado por ar; b) Detalhes da célula de medidas térmicas.

A técnica de medidas de temperatura empregada foi a de inserção dos termopares acima do leito de partículas, em que um conjunto de termopares foi colocado acima do topo da camada de partículas, com os sensores localizados em diferentes posições radiais e angulares. Os sensores eram termopares tipo T, tendo sido localizados nas posições radiais adimensionais $r/R = 0,00; 0,27; 0,56; 0,79$ e $0,92$. A distância da extremidade dos sensores dos termopares à superfície do meio poroso foi fixada em 5 mm, seguindo recomendação de Thoméo e colaboradores (2004). Todos os sensores do sistema foram prévia e devidamente calibrados. Foram utilizados dois formatos de sensores: sondas retas e sensores anelares.

As sondas retas eram feitas em bainha de aço inox de diâmetro de 1,5 mm e comprimento de 44,55 mm, fixadas em uma placa de nylon perfurada, que permitia a passagem do ar e dava sustentação ao conjunto, conforme ilustrado pela Figura 3.3a. O conjunto de termopares longitudinais possibilitou graus de liberdade angular e axial aos sensores. Para cada posição radial, foram realizadas 8 medidas angulares igualmente espaçadas de 45° , de forma que a temperatura em cada posição axial e radial foi dada pela média das medidas angulares, considerando-se a dependência dos perfis de temperatura com a direção angular devido à não homogeneidade da matriz porosa.

Os sensores anelares consistiam de quatro anéis de cobre concêntricos com um termopar soldado em cada anel e um quinto termopar de bainha de inox posicionado no centro da haste de nylon em forma de “Y”, que dava sustentação ao conjunto, conforme ilustrado pela Figura 3.3b. Os anéis foram confeccionados a partir de um fio de cobre de 1,5 mm de diâmetro.

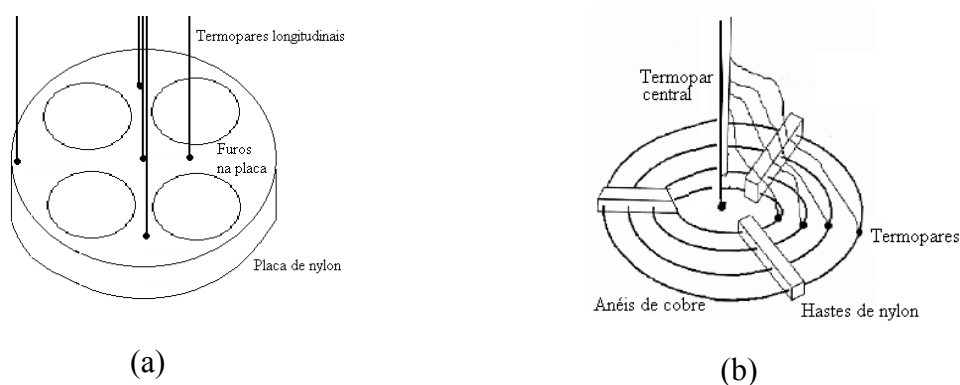


Figura 3.3: Conjunto suporte dos termopares: (a) longitudinais; (b) anelares.

Foram realizados ensaios em duplicata, empregando-se alturas de leito de 6, 12 e 18 cm e vazões de percolação de 400, 500, 600, 800, 1000 e 1200 L/h, sendo os testes

conduzidos até a obtenção do regime permanente de transferência de calor, admitido quando da ocorrência de leituras constantes dos termopares com intervalo de 1 hora.

A temperatura do fluido percolante foi controlada por um banho termostático mantido a 40 °C. A temperatura na entrada da seção térmica (T_0), por sua vez, foi medida por um termopar inserido radialmente na posição $z = 0$ da célula de medidas, conforme se vê na Figura 3.2b, tendo-se conduzido ensaios preliminares com a célula não empacotada para se determinar os valores de T_0 em cada vazão de percolação, mantendo constantes as temperaturas da camisa de aquecimento e do banho de controle da temperatura do ar.

A temperatura da água de aquecimento foi monitorada por sensores localizados na entrada e na saída da camisa. As temperaturas na entrada e na saída da camisa eram próximas entre si e praticamente iguais à do banho termostático, ou seja, mantiveram-se em $65 \pm 0,5^\circ\text{C}$. O fato de a superfície da célula ser metálica e de a vazão de água ser elevada garante que a temperatura da parede seja constante.

As variáveis de resposta foram as temperaturas em cada posição radial e a temperatura média radial na saída do leito (T_{avg}), obtida por integração numérica do perfil radial experimental por meio da regra de Simpson e/ou do trapézio.

3.5 Empacotamento das células de medidas

As amostras foram empacotadas no cilindro interno da célula de medidas da estagnação e no leito fixo segundo a técnica de empacotamento solto, descrita por Casciotori e colaboradores (2007), que consiste no simples derramamento das partículas em pequenas porções dentro do leito, seguido de leve uniformização do material por toda a seção transversal até a obtenção de leito com a altura desejada.

Para realização dos ensaios na estagnação com o meio composto, as amostras eram acondicionadas nos devidos teores de umidade desejados e armazenadas em câmara fria por tempo suficiente para homogeneização do teor de água. Devido à composição mista do meio composto, era necessário que o recheio fosse empacotado nas células com especial cuidado, de modo que as partículas permanecessem aderidas entre si e homogeneamente misturadas, evitando-se que as partículas de bagaço de laranja e de farelo de trigo fossem segregadas para o fundo das células de medidas, o que tornaria o substrato heterogêneo quanto à distribuição dos materiais.

Para realização das medidas térmicas no leito fixo percolado por ar, empacotava-se o leito e deixava-se o sistema com percolação de ar até que se observasse visualmente que o meio estava seco (com umidade aproximada de 5 % b.u.), de forma que só então se aguardava

a ocorrência do regime permanente de transferência de calor. O tempo de secagem por percolação de ar foi determinado através de ensaios preliminares. Foram adotados pelo menos 5 dias de percolação com ar a aproximadamente 40 °C na vazão de 800 L/h após o empacotamento com recheio úmido (aproximadamente 70 % de umidade b.u.). Apesar da saída de água, as partículas já acomodadas permaneciam homoganeamente misturadas nos leitos secos, garantindo que a porosidade, a estrutura e a composição dos leitos fossem mantidas.

Para o empacotamento dos materiais padrões, foi seguida a mesma metodologia empregada para os rejeitos agroindustriais estudados. Foi feito o simples derramamento das partículas a partir da borda para dentro do leito, sendo os materiais levemente comprimidos e ligeiramente distribuídos por toda a seção transversal do leito.

3.6 Métodos de cálculo

3.6.1 Condutividade térmica na estagnação

Como citado na *Revisão da Literatura*, um balanço térmico do método da sonda linear resulta na equação (8). Quando se usa o procedimento de aferição da sonda, esta se transforma na equação (10). Neste trabalho, foi feito uso de um meio poroso de referência para a aferição da sonda, mais especificamente fibras de lã de vidro, cujos valores de condutividade térmica foram obtidos na literatura. Com isso, determinou-se um fator de correção (f_c), dado pela média de três repetições dos ensaios de aferição da sonda, desde que o coeficiente de variação dos resultados fosse inferior a 10 %, garantindo-se assim a confiabilidade do valor obtido de f_c . Assim, da porção linear da representação gráfica dos dados $(T - T_1)$ em função de $\ln(t/t_1)$ para a lã de vidro, obteve-se o coeficiente angular (B), dado por:

$$B = \frac{f_c}{K_{\text{lã de vidro}}} \quad (3.2)$$

Das curvas de $(T - T_1)$ em função de $\ln(t/t_1)$ resultantes dos experimentos com as amostras de meios porosos destinados à FES, obtiveram-se coeficientes angulares (C), descritos como:

$$C = \frac{f_c}{K_0} \quad (3.3)$$

de modo que K_0 do material de interesse pode ser obtido por:

$$K_0 = \frac{B}{C} K_{\text{material padrão}} \quad (3.4)$$

onde $K_{\text{material padrão}}$ é o valor da condutividade térmica efetiva na estagnação dos materiais de referência, quais sejam $K_{\text{lã de vidro}} = 0,035 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (INSULATIONS SOLUTIONS, 2004) e $K_{\text{esfera de vidro}} = 0,25 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (FREIRE, 1979).

Das porções lineares das curvas, foram feitas regressões lineares para obtenção dos coeficientes angulares B e C. Para a avaliação do instante a partir do qual a elevação da temperatura com $\ln(t/t_1)$ seria linear, foi feita a derivada ponto a ponto, através da técnica de diferenças finitas, utilizando-se o *software* Origin 6.0 (Microcal), sendo avaliado quando esta derivada se tornaria constante.

Para a condução dos experimentos, foi realizado um planejamento estatístico fatorial completo que teve como variáveis a umidade do meio e a temperatura dos ensaios. Os resultados foram analisados estatisticamente através de análises de variância e significância, com auxílio dos *softwares* estatísticos Minitab 15.1 e Estat 2.0.

Por fim, os dados de K_0 obtidos em ampla faixa de umidades dos materiais foram ajustados em função da fração de água dos recheios, utilizando-se o *software* Origin 6.0 (Microcal). O ajuste foi comparado aos resultados experimentais obtidos neste trabalho para o bagaço de cana e o meio composto.

3.6.2 Parâmetros térmicos do leito fixo percolado por ar

O coeficiente global de transferência de calor do modelo unidimensional (U) foi calculado diretamente através da equação (2). Além disso, foram também utilizados programas computacionais em linguagem MatLab desenvolvidos neste trabalho para cálculo deste parâmetro, utilizando-se do pacote MatLab® versão 7.0, tal como descrito a seguir.

O coeficiente convectivo de troca de calor (h_p) e a condutividade térmica efetiva radial (K_r) foram calculados empregando-se o modelo a dois parâmetros tradicional, dado na equação (4). Para tanto, foi utilizado um programa em linguagem FORTRAN, já disponível e previamente utilizada por Thoméo (1995), para ajuste do modelo aos dados experimentais,

empregando-se o método dos mínimos quadrados não-linear otimizado através do algoritmo de Marquardt (1963).

Transcreveu-se ainda o cálculo de K_r e h_p do programa em FORTRAN para um programa em MatLab, que também empregava o modelo a dois parâmetros tradicional e o algoritmo de Marquardt (1963). Portanto, um novo programa em MatLab foi escrito para calcular os parâmetros do modelo bidimensional da transferência de calor em leitos fixos, buscando-se principalmente facilitar ao usuário a entrada e a saída de dados experimentais, que é mais simples no MatLab que no programa em FORTRAN atualmente disponível.

3.6.3 Calor específico (C_{pb}) dos materiais empregados como recheios

Para utilização dos modelos de transferência de calor comumente empregados em FES, também foi necessário conhecer o calor específico do leito (C_{pb}) composto por bagaços de cana e laranja e farelo de trigo (1:2:2 p/p). Tal propriedade térmica foi obtida por meio de cálculos empregando as correlações de Choi e Okos (1986), que relacionam calor específico em função da temperatura para cada constituinte dos materiais (carboidratos, proteínas, fibras, água, etc.), em combinação com os dados de composição centesimal dos materiais, os quais foram extraídos do trabalho de Laurentino (2007). A autora obteve a composição centesimal do farelo de trigo e do bagaço de laranja por meio de técnicas recomendadas pela AOAC (1997) e assumiu que o bagaço de cana era constituído apenas por fibras e água.

Deste modo, o calor específico do leito de meio composto (C_{pb}) foi calculado como média ponderada pela composição do meio composto e pela porosidade do leito, considerando-se os valores individuais do calor específico de cada material, calculados pelas correlações de Choi e Okos (1986), e do ar contido no espaço vazio entre as partículas.

3.7 Desenvolvimento de programa em MatLab para cálculo do coeficiente U

Um programa em linguagem MatLab foi escrito para calcular o coeficiente global de troca térmica U para os leitos recheados com bagaço de cana e com meio composto nas condições operacionais empregadas neste trabalho. O objetivo do programa foi facilitar e agilizar o cálculo do parâmetro, eliminando a necessidade de cálculos manuais ou através de planilhas.

Foram escritos dois programas diferentes para calcular o coeficiente global, sendo um de cálculo por substituição e outro de cálculo por ajuste. O primeiro programa empregou diretamente a solução analítica do modelo unidimensional, dada na equação (2.2) da *Revisão da Literatura*, substituindo $z = L$ para cada altura de leito em que se desejava calcular U.

O segundo programa empregou a mesma equação (2.2), porém sem substituir z por L . Com base no valor de T_{avg} experimental, era calculada a temperatura média axial (T_m) em $z = L/2$, dada pela média aritmética entre T_0 e T_{avg} . De posse de T_0 em $z = 0$, T_m em $z = L/2$ e T_{avg} em $z = L$, o programa ajustava um valor ótimo de U que melhor satisfizesse a relação entre z e T_{avg} experimentais, o que foi feito através dos comandos *optimset* e *lsqcurvefit*, que empregaram o método dos mínimos quadrados (MMQ) para busca do valor ótimo do parâmetro usando o algoritmo de Levenberg (1944) – Marquardt (1963).

As propriedades térmicas e físicas do fluido percolante (C_p e densidade) foram ajustadas em função da temperatura, tomando por base dados tabelados disponíveis na literatura (PERRY et al., 2008). O programa calculava C_p e densidade com base na temperatura média entre as temperaturas na entrada e na saída do leito (T_m).

Dados como o raio da célula de medidas, as posições radiais dos sensores e a temperatura de entrada do ar foram fixados pelo programador, uma vez que não representavam variáveis de processo. A temperatura média radial na saída do leito, T_{avg} , foi obtida por integração do perfil radial de temperaturas, através do comando *trapz*, que faz a integração numérica empregando a regra do trapézio. Foram também utilizadas ferramentas de aritmética básica para cálculos de variáveis dependentes e para conversão de unidades.

Para entrada de dados no processamento do programa, foram empregados os comandos *input*, *menu* e *read*. O *input* permite que o usuário informe o dado no momento da execução do programa através de digitação, podendo-se especificar ao usuário a variável que deveria ser inserida e sua respectiva unidade. O comando *menu* consiste em criar para o usuário um menu com opções de altura do leito, vazão de ar e número da repetição do experimento, para que este possa selecionar o valor desejado. O comando *read* consiste em fazer com que o programa importe os dados de um arquivo previamente criado, tendo-se usado aqui o *xlsread*, que importa dados de uma planilha com extensão *.xls* do Microsoft Excel®. Ressalta-se que a rotina desenvolvida com o *software LabView* para aquisição dos dados já os armazenava em uma planilha do Microsoft Excel® específica para cada condição de processo.

O programa também continha comandos condicionais como *if*, *while* e *switch case*, para que o usuário pudesse realizar os cálculos de U para diferentes condições operacionais no mesmo sistema, sem necessitar executar novamente o programa. Por meio de uma série de comandos *switch case* em cascata, foi estabelecido o arquivo de origem a partir do qual o MatLab deveria importar os dados a cada execução do programa. O arquivo de origem deveria conter extensão *.xls* e ser identificado por um título contendo vazão de ar, altura de

leito e número da repetição do experimento. O usuário deveria apenas especificar a página e a região da planilha das quais os dados deveriam ser importados.

Dados experimentais de temperatura obtidos neste trabalho foram utilizados como referência para elaboração e verificação de ambos os programas desenvolvidos: com substituição de $z = L$ e com ajuste de z entre 0 e L .

3.8 Desenvolvimento de programa em MatLab para cálculo dos parâmetros térmicos do modelo bidimensional – K_r e h_p

Um programa para cálculo dos parâmetros térmicos do modelo bidimensional da transferência de calor em leitos fixos empacotados percolados por um fluido foi desenvolvido com base no programa escrito para o modelo unidimensional, porém com certas modificações em seu algoritmo. Mantiveram-se inalteradas as condições geométricas do leito, tais como o raio, as posições radiais dos termopares, as alturas do recheio no leito e a temperatura da parede. Também foram mantidas as equações de cálculo das propriedades termofísicas do ar (calor específico, densidade e vazão mássica superficial) para determinada temperatura média axial no leito. Além disso, foram utilizados os mesmos *menus* para entrada de dados do processo, tais como vazão de ar, altura do leito e repetição do experimento, de modo que o programa importasse as temperaturas experimentais coletadas pelo LabView e armazenadas no Excel por meio do comando *xlsread*.

Para a entrada de dados, incluiu-se uma linha ao algoritmo para que o usuário pudesse especificar a quantidade desejada de termos da série do modelo tradicional a dois parâmetros que seria empregada para a estimativa. Como a temperatura calculada pelo modelo (T_{calc}) dependia das posições radiais e do número de termos da série, T_{calc} foi inserida em duas sub-rotinas *for*: um referente a cada posição radial no topo do leito e outro referente a cada termo da função em série. Assim, T_{calc} foi tratada como uma matriz de n termos (linhas) e m posições radiais (colunas). Deste modo, a *function* declarada na sub-rotina BIDIM4 ocupa apenas quatro linhas. Ao calcular uma matriz F ($n \times m$), chamou-se de teta (θ) a soma das linhas de cada coluna de F , de modo a se obter o valor dos tetas para cada ponto do vetor r , ou seja, para cada posição radial dos sensores térmicos experimentais.

O programa principal deveria receber a entrada de dois valores iniciais, um para K_r e outro para h_p , os quais ficavam armazenados num vetor *chute* para uso posterior na estimativa dos parâmetros. Os n auto-valores característicos γ_n , presentes na equação (2.4) da *Revisão da Literatura*, foram calculados por meio de um comando que fornece as raízes da equação

transcendental definida na equação (2.5). A equação transcendental foi escrita numa sub-rotina *for* para rodar um número de vezes igual ao número de termos desejados (*iter*).

Para encontrar as raízes γ (gama), usou-se o comando *fzero*, que busca os zeros da função num determinado intervalo ou ponto próximo da raiz (*i*). O intervalo estipulado para a busca das raízes foi baseado nas raízes das funções de Bessel de 1ª espécie de ordens 0 e 1 (x_0 e x_1 , respectivamente), já que Cremasco (2008) afirma que, para um adimensional Ni variando de zero a infinito, tem-se as raízes γ variando entre as raízes de J_1 e J_0 . Deste modo, foi também necessário calcular as raízes de J_0 e J_1 para aperfeiçoamento do intervalo de busca das raízes γ , o que também foi feito por meio do comando *fzero* aplicado às próprias funções de Bessel de 1ª espécie e ordens 0 e 1.

Foram empregados dois laços *for* para o cálculo das raízes de J_0 e J_1 . Para ambas as funções, a quantidade de raízes calculadas seria igual à quantidade de iterações desejadas. Foi necessário declarar duas funções, *@bessel0* e *@bessel1*, para que fosse aplicado o comando *fzero* nas proximidades de um ponto *i*. Para a raiz x_0 de J_0 , o passo para incremento foi colocado antes do cálculo da raiz; para a raiz x_1 de J_1 , o passo foi inserido depois do cálculo da raiz da função de Bessel. O programa foi estruturado desta forma com base nos valores de x_0 e x_1 dados por Cremasco (2008). De acordo com o autor, a primeira raiz de J_1 (primeiro valor de x_1) é zero; como o programa irá buscar raízes próximas de *i*, primeiramente se deverá ter $i = 0$. Por outro lado, a primeira raiz de J_0 (primeiro valor de x_0) tem um valor aproximado de 2,4048, de modo que o programa buscará a primeira raiz próxima de um ponto $i = \pi$ ($\pi = 3,14$). Do primeiro valor em diante, ambas as raízes x_0 e x_1 passam a ter um passo aproximado de π , de forma que *i* passa a ser incrementado de π a cada iteração.

3.9 Simulação do processo de FES em leitos fixos

O processo de FES de Umsza Guez (2009) foi simulado neste trabalho. Para desenvolvimento dos programas de simulação numérica deste processo de FES em bioreator de leito fixo, foi utilizado o *software* MatLab versão 7.0. Basicamente, a metodologia consistiu em escolher modelos matemáticos que representassem os mecanismos no bioreator, escrever os programas de simulação no MatLab e verificar os resultados da simulação com relação aos dados experimentais da literatura (LAURENTINO, 2007; UMSZA GUEZ, 2009).

Neste contexto, os processos fermentativos foram modelados a partir dos balanços de massa dos principais constituintes e balanços de energia no bioreator. O trabalho de Fanaei e Vaziri (2009) foi utilizado como referência principal para condução das simulações. Os modelos apresentados por estes autores e o modelo de Sangsurasak e Mitchell (1998),

apresentado na equação (2.12) do item *Revisão da Literatura*, juntamente com a equação logística empregada para modelar a cinética de crescimento do microrganismo, foram utilizados para representar os fenômenos de transferência no bioreator.

Os programas de simulação desenvolvidos englobavam a cinética de crescimento do microrganismo ao longo da fermentação e a distribuição de temperaturas no interior do reator durante o processo e em diferentes posições no interior do leito. As propriedades físicas e térmicas do leito e do substrato e as características do crescimento do fungo foram obtidas neste trabalho e/ou extraídas da literatura.

A simulação do processo fermentativo envolveu a resolução de equações diferenciais ordinárias (ODEs) e parciais (PDEs), as quais foram resolvidas numericamente por discretização de variáveis pelo método de diferenças finitas e pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem, representado pela função *ode45* do MatLab. Conhecendo o método numérico, as ODEs e PDEs, o valor inicial e as condições de contorno, o passo de integração das variáveis, os parâmetros envolvidos nos modelos, os valores dos termos constantes e a previsão dos resultados com base em dados experimentais, os programas em MatLab foram escritos para resolver numericamente os modelos e fornecer soluções gráficas aproximadas para que se pudesse prever o processo fermentativo no leito fixo.

Seguindo a metodologia recomendada por Saucedo-Castañeda (1990), primeiramente foi utilizado um conjunto simultâneo de equações diferenciais ordinárias para descrever a fisiologia do processo e o crescimento microbiano em função do tempo e da temperatura. Em segundo lugar, foi empregado um balanço de energia contendo acúmulo, condução, convecção e geração de calor metabólico para a modelagem e a descrição do processo de transferência de calor no sistema. Por fim, o modelo pôde ser verificado com base em dados experimentais de temperaturas (disponíveis na literatura) em comparação às temperaturas calculadas pelo programa.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Condutividade térmica efetiva na estagnação (K_0)

4.1.1 Materiais padrões

Nas Figuras 4.1 e 4.2, é observada a temperatura em função do logaritmo do tempo (a) e a derivada da temperatura em função do logaritmo do tempo (b) para esferas de vidro de 3 mm e para microesferas de vidro de 0,3 mm de diâmetro, respectivamente. Tais materiais foram avaliados tendo em vista sua aplicação como materiais padrões de condutividade térmica conhecida para aferição da sonda linear. Das figuras, foi possível obter o tempo de pré-aquecimento pelo método da sonda, o qual corresponde ao $\ln(t)$ a partir do qual a elevação da temperatura passa a ser linear ou a partir do qual a derivada da temperatura estabiliza-se em torno de um valor.

Conforme visto nas Figuras 4.1 e 4.2, os perfis e as derivadas da temperatura em função do logaritmo do tempo a 25 °C foram praticamente coincidentes para as esferas de vidro de 3,0 e de 0,3 mm. Consequentemente, os tempos de pré-aquecimento da sonda foram assumidos iguais para ambos os materiais padrões, sendo $t_0 = 120$ s ou $\ln(t_0) = 4,8$, como destacado nas Figuras 4.1 e 4.2. Logo, o valor da condutividade térmica na estagnação para as esferas e as microesferas de vidro foi assumido como igual a 0,25 W/m°C, valor obtido por Freire (1979) para as esferas de 3,0 mm.

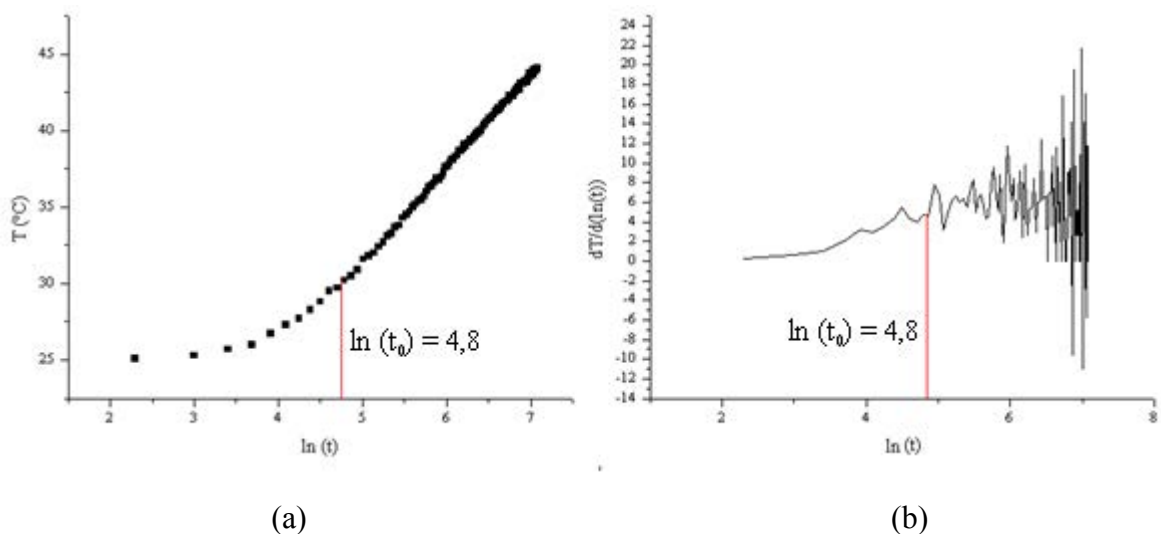


Figura 4.1: Resultados obtidos para esferas de 3,0 mm: a) temperatura em função do logaritmo do tempo; b) derivada da temperatura em relação ao logaritmo do tempo.

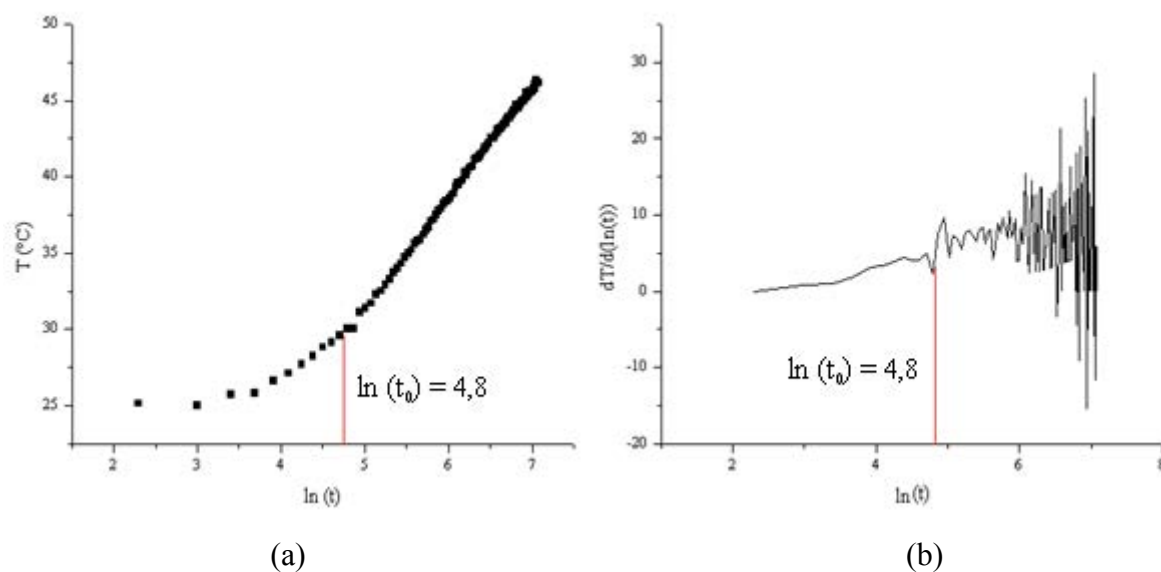


Figura 4.2: Resultados obtidos para microsferas de 0,3 mm: a) temperatura em função do logaritmo do tempo; b) derivada da temperatura em relação ao logaritmo do tempo.

Considerou-se que a diferença de tamanho de partícula, embora implique em diferença na área superficial de contato, não afetou o valor de K_0 do material. De acordo com Legawiec e Ziólkowski (1995), a porosidade média dos leitos empacotados com as esferas de 3,0 ou de 0,3 mm é praticamente a mesma e em torno de 0,38, tendo em vista que o diâmetro da célula de medida da condutividade térmica (9,5 cm) é suficientemente grande para que a porosidade média seja amortecida. No entanto, como a condutividade térmica não depende somente da porosidade do leito, observou-se que a diferença de área de contato com a sonda implicou em diferentes coeficientes angulares das retas da porção linear das curvas de aquecimento mostradas nas Figuras 4.1a e 4.2a, sendo seus valores 6,2 e 7,0 para esferas de vidro de 3 e 0,3 mm, respectivamente. Isso indica que, apesar de a condutividade ser a mesma para ambas as partículas, a área de troca e a diferença de temperatura no leito foram compensadas proporcionalmente, de modo a dissipar a mesma quantidade de calor gerado pela sonda.

Na Figura 4.3, feita em escala, é possível observar nitidamente que a área de contato com a sonda é maior para as microsferas de 0,3 mm do que para as esferas de 3,0 mm. Assim, pode-se dizer que os diversos mecanismos envolvidos na transferência de calor em um meio poroso parecem ser mais relacionados à área de contato partícula/sonda do que à fração de vazios resultante do empacotamento diferenciado para cada tamanho de esfera.

Para verificação da qualidade dos resultados obtidos com a sonda linear, foram analisados alguns materiais já estudados na literatura. Assumindo-se as esferas de vidro de 3 mm de diâmetro como padrão, foram estimados os valores de K_0 do milho e da soja. Para o

milho, o valor obtido experimentalmente foi igual a $0,144 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, muito próximo ao encontrado na literatura (KUSTERMANN *apud* RAHMAN, 1995), que é de $0,14 \text{ W/m}^\circ\text{C}$. Para a soja, K_0 obtido experimentalmente foi igual a $0,147 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, também próximo ao encontrado na literatura (DESHPANDE et al., 1996), que é de $0,130 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ para soja com 10 % de umidade (b.u.). O valor adotado para K_0 das esferas de vidro foi aquele obtido por Freire (1979), igual a $0,25 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, como supracitado. Da mesma forma, adotando-se lã de vidro como padrão ($K_0 = 0,035 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ – INSULATIONS SOLUTIONS, 2004) e determinando-se K_0 de algodão, os resultados foram de $0,049 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, sendo que o valor reportado na literatura ficava entre $0,047$ e $0,053 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, dependendo da variedade do algodão (FRYDRYCH et al., 2002).

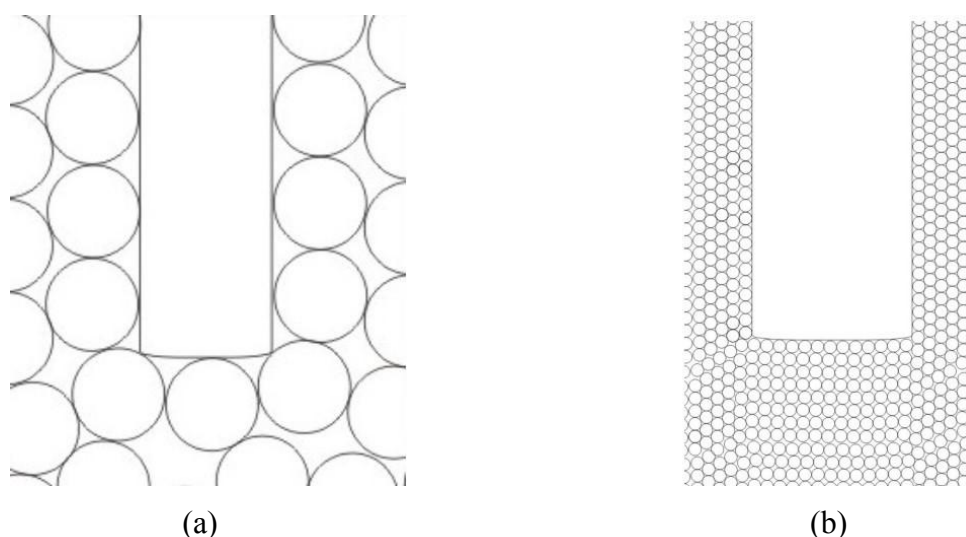


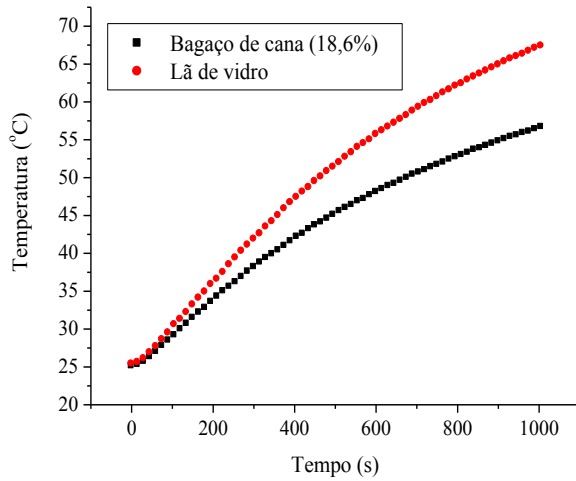
Figura 4.3: Acomodação das partículas em torno da sonda de condutividade térmica a) esferas de vidro de 3,0 mm; b) microesferas de 0,3 mm de diâmetro (escala 1:15).

4.1.2 Bagaço de cana

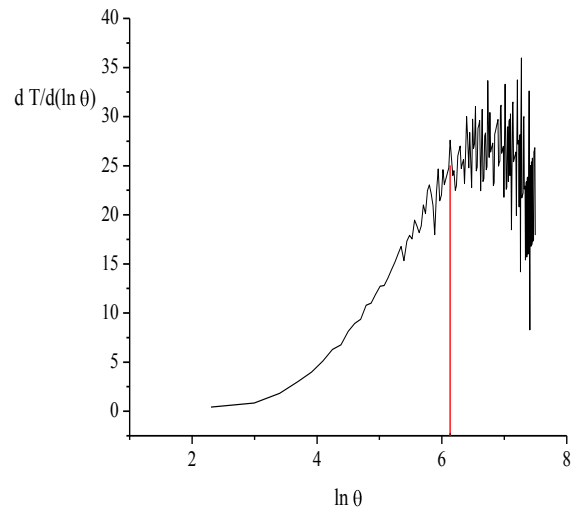
Por indução, o comportamento térmico do bagaço de cana foi obtido a partir da lã de vidro como padrão. Os dados do comportamento da lã de vidro foram extraídos do trabalho de Laurentino (2007). Como a elevação da temperatura foi semelhante entre os materiais similares, o mesmo foi considerado válido para a fase inicial de aquecimento da sonda (t_0), conforme visto na Figura 4.4a, para a temperatura inicial de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Deste modo, a constante obtida a partir do material de referência foi válida para o cálculo da condutividade do material em estudo no intervalo desejado.

A Figura 4.4b apresenta um resultado típico para a derivada da temperatura em função do tempo para lã de vidro. Admitiu-se que a porção linear iniciou-se para $\ln(t) = 6,2$, ou seja,

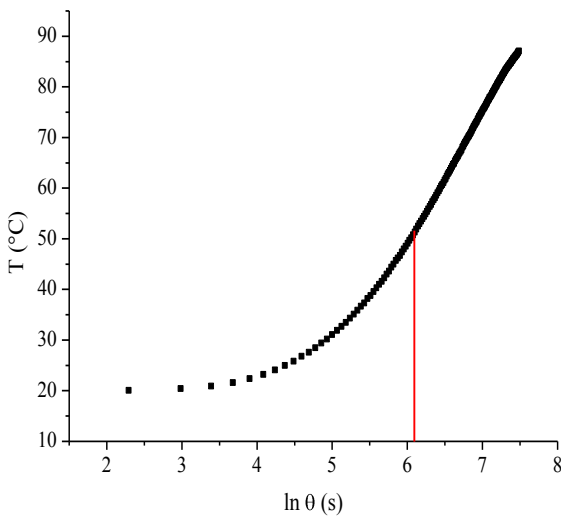
em torno de 500 s de experimento. A porção linear adotada fica bem caracterizada na Figura 4.4c, da variável temperatura em função do tempo linearizado, a qual foi admitida após o tempo de 500 s ($\ln(t_0) = 6,2$). A regressão linear dos dados, conforme visto na Figura 4.4d, resultou em um coeficiente de regressão superior a 0,999.



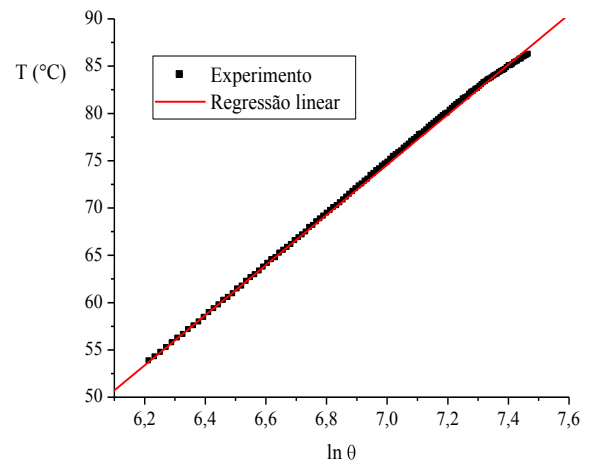
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.4: Resultados do experimento para a determinação de K_0 do bagaço de cana a 25 °C:

- a) Temperatura em função do tempo para lã de vidro e bagaço de cana;
- b) Tempo de pré-aquecimento para lã de vidro;
- c) Tempo de pré-aquecimento para bagaço de cana a 18,7 % de umidade;
- d) Porção linear dos dados do bagaço de cana e curva de regressão linear.

A fase seguinte dos cálculos consistiu na determinação dos valores de K_0 para as 17 amostras de bagaço de cana com umidades distintas, cujo comportamento pode ser visto na Figura 4.5. Note-se que o comportamento de K_0 com a umidade foi praticamente linear crescente até valores de umidade próximos a 25 % (b.u.), após o que esta linearidade deixa de existir, fazendo supor que haja algum fenômeno de transferência de calor que não apenas a condução via partículas.

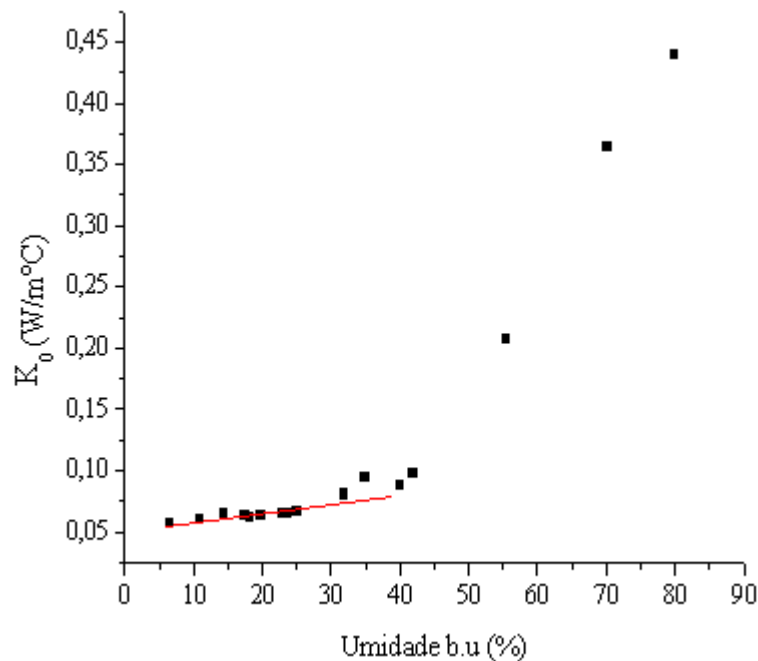


Figura 4.5: K_0 de bagaço de cana a 25 °C em função da umidade.

Visando definir o comportamento de K_0 do bagaço de cana em toda a faixa de umidades avaliada, uma função assintótica foi ajustada aos dados experimentais da Figura 4.5, sendo a equação dada por:

$$\frac{1}{K_0} = A - B \cdot C^{\frac{1}{u.b.u.}} \quad (4.1)$$

onde u.b.u. é o teor de umidade do material, em base úmida, e A, B e C são parâmetros de ajuste do modelo, cujos valores foram $A = 16,84$, $B = 35,74$ e $C = 0,51$, sendo os respectivos desvios padrão 0,39, 3,36 e 0,03. O valor do coeficiente de correlação foi $r^2 = 0,98$.

Na Figura 4.6, estão representados os pontos experimentais, a respectiva curva ajustada e a distribuição dos resíduos. Como o coeficiente de correlação foi próximo de 1 e a

distribuição dos resíduos foi aleatória, pode-se dizer que a equação (4.1) ajustou-se satisfatoriamente aos dados experimentais, sendo adequada para representar K_0 em função do teor de umidade do bagaço. Destaque-se que foram testadas várias equações de ajuste, mas optou-se por empregar a equação (4.1) por ela ser não linear apenas em relação ao parâmetro C , o que minimiza a possibilidade de ocorrência de vício na estimativa dos parâmetros.

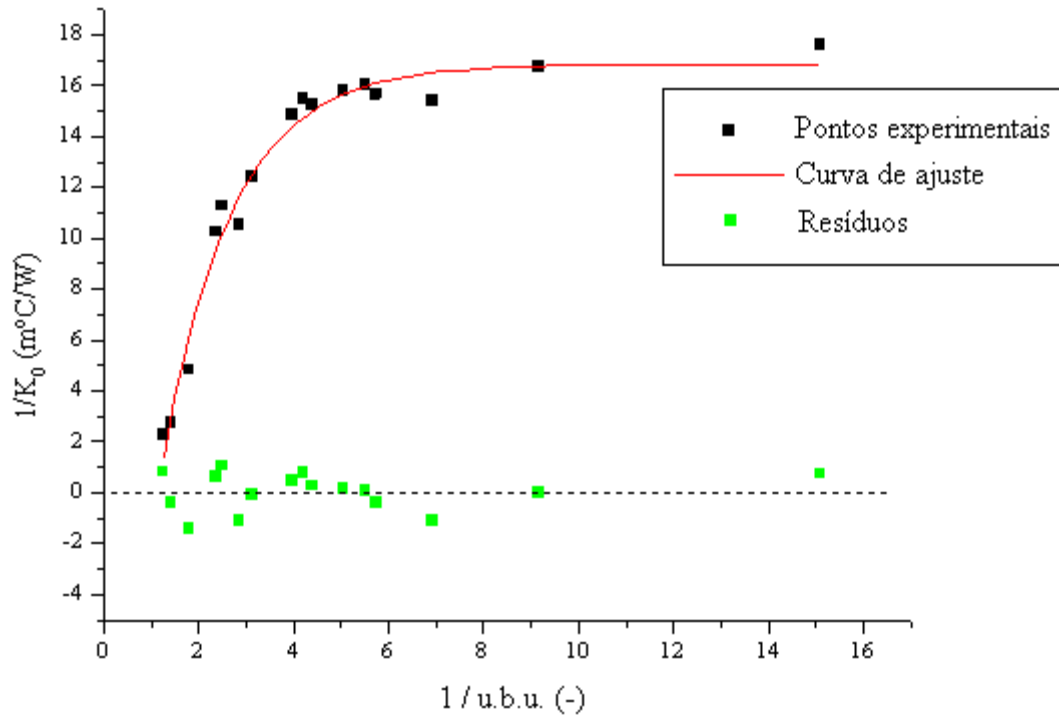


Figura 4.6: Ajuste de K_0 do bagaço de cana em função da umidade.

Acredita-se que essa brusca elevação dos valores de K_0 para altas umidades do recheio seja decorrente de uma mudança de mecanismo através do qual o calor é preferencialmente conduzido. Para teores de umidade inferiores a 25 % (base úmida, b.u.), ou 33 % (base seca, bs), a água está aderida fortemente às fibras, uma vez que a umidade de equilíbrio ainda não foi atingida. Laurentino (2007) obteve experimentalmente as isotermas de sorção de bagaço de cana-de-açúcar e demonstrou que as mesmas são independentes da temperatura, sendo a equação de Oswin (1946) a que melhor se ajustou aos dados experimentais. Assumindo-se atividade de água igual a 0,99, a equação obtida por Laurentino (2007) prevê uma umidade de equilíbrio de 34 % (bs). Nestas condições, é razoável supor que os mecanismos de transferência de calor são aqueles propostos na literatura clássica sobre o tema (GOEDEKEN et al., 1998), tais como o mecanismo em série, já apresentado na equação (2.10) do capítulo *Revisão da Literatura*, qual seja:

$$K_0 = (1 - \varepsilon) K_{\text{sólido úmido}} + \varepsilon K_{\text{ar}} \quad (2.10)$$

Laurentino (2007) empregou este modelo e os resultados obtidos foram muito próximos aos resultados experimentais obtidos com a sonda linear. Assim, para teores de umidade acima da umidade de equilíbrio do material, a água passa a estar muito fracamente ligada à matriz sólida, recobrando as partículas, e passa a transferir calor por condução como se estivesse em seu estado líquido puro, de modo que K_0 tende ao valor da condutividade térmica da água líquida pura quando a umidade do material, em base úmida, tende a 100 %.

4.1.3 Farelo de trigo

No trabalho de Laurentino (2007), houve a tentativa de cálculo da condutividade térmica efetiva na estagnação do farelo de trigo isoladamente, em diferentes teores de umidade. No entanto, devido à dificuldade de encontrar um material padrão de condutividade térmica conhecida similar ao farelo de trigo, levando em consideração seu contato com a sonda, a própria autora suspeitava que os resultados obtidos não possuísem alta confiabilidade. Na ocasião, foram testados areia, farinha de trigo e serragem, sendo que a serragem foi o material escolhido pela autora para os cálculos. No entanto, o valor de condutividade térmica utilizada para a serragem não especificava o tamanho de suas partículas, propriedade que deveria ser considerada por promover alterações significativas nos valores obtidos.

Diante disso, os ensaios com farelo de trigo com teor de umidade de 14 % (b.u.) a 25 °C foram repetidos no presente trabalho, e os resultados experimentais são apresentados nas Figuras 4.7a e 4.7b. Neste trabalho, as microesferas foram utilizadas como material padrão para os cálculos, tendo em vista as características estruturais e de contato com a sonda similares entre as microesferas de vidro e as partículas de farelo de trigo.

A condutividade térmica efetiva calculada do farelo de trigo foi de 0,13 W/m°C, enquanto que o resultado anteriormente obtido por Laurentino (2007) havia sido aproximadamente 0,08 W/m°C. Considerando o valor teórico previsto pelas equações (2.10), (2.11) e as equações de Choi e Okos (1986), a condutividade do farelo de trigo resulta em 0,12 W/m°C, valor de referência do qual o valor experimental obtido neste trabalho se aproxima mais do que o relatado no trabalho anterior.

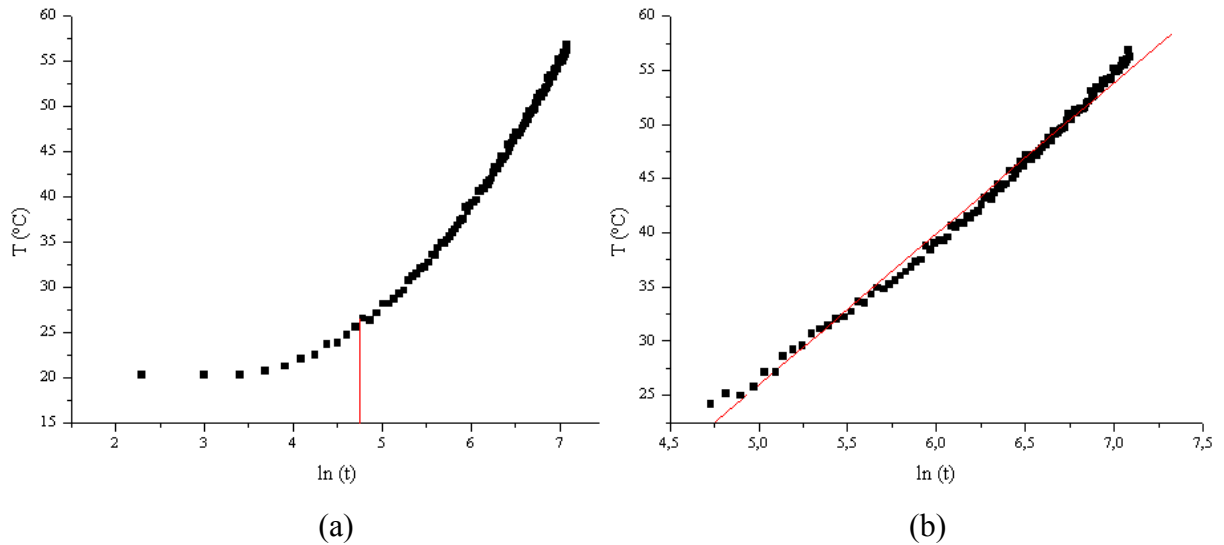


Figura 4.7: Determinação experimental de K_0 para farelo de trigo a 25 °C: a) perfil de elevação da temperatura; b) porção linearizada da curva.

4.1.4 Meio composto

As microesferas de vidro de 0,3 mm foram selecionadas como material padrão de aferição da sonda, pelo fato de apresentarem características intrínsecas de dispersão de calor, tais como o tempo de pré-aquecimento (período no qual a elevação da temperatura é não-linear em função do tempo linearizado), bem como características estruturais (contato das partículas com a sonda) similares às do meio composto pelas fibras de bagaço de cana e partículas de bagaço de laranja e farelo de trigo.

Na Figura 4.8a, observam-se perfis de elevação de temperatura similares para as microesferas e para o meio composto com 70 % de umidade. Deste modo, a constante da sonda obtida a partir do material de referência foi, por indução, considerada válida para o cálculo da condutividade do material em estudo. Na Figura 4.8b, tem-se a variável temperatura em função do tempo linearizado para meio composto com 70 % de umidade, na qual fica bem caracterizada a porção linear dos dados. Comparando-se este gráfico ao da Figura 4.2b, admitiu-se que a porção linear iniciou-se para $\ln(t_0) = 4,8$, ou seja, em torno de 120 s de experimento.

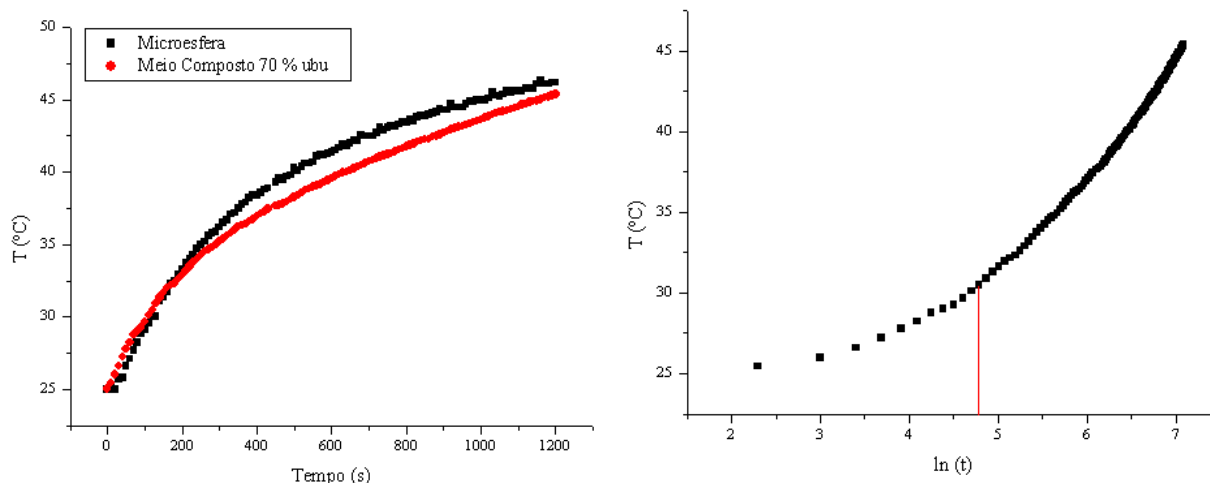


Figura 4.8: Determinação experimental de K_0 para o meio composto a 25 °C: a) temperatura em função do tempo; b) Tempo de pré-aquecimento do meio composto a 70 % de umidade.

De forma geral, o meio composto, para toda a faixa de umidades testadas, possui um tempo de pré-aquecimento de 100 a 150 segundos, que coincide com o tempo de pré-aquecimento das microesferas de vidro de 0,3 mm, o que indica que tal material é adequado para aferição da sonda para os ensaios com o meio composto.

Os perfis de elevação de temperatura em função do tempo linearizado mostraram que o meio composto condicionado a umidades relativamente baixas (inferiores a 30 % b.u.) possui tempo de aquecimento muito maior do que quando comparado com o meio condicionado a altos valores de umidade (superiores a 50 % b.u.). Na faixa de baixas umidades, também se notou diferença expressiva nos tempos de aquecimento nos testes realizados a 25 e a 50 °C. Na temperatura de 25 °C, a taxa de aquecimento foi discretamente maior que a 50 °C. Quando o teor de umidade do meio aumentava, observava-se que as diferenças dos tempos de aquecimento tornavam-se pouco expressivas quando comparadas entre 25 e 50 °C. Observou-se ainda que, com o aumento do teor de umidade do meio, a taxa de aquecimento do material nas proximidades da sonda tendia a diminuir para ambas as temperaturas, assim como o tempo de pré-aquecimento.

Na Tabela 4.1, são apresentados os valores de K_0 determinados para o meio composto acondicionado em teores de umidade distintos entre 22 e 80 % (b.u.) e submetido às duas temperaturas de ensaio (25 e 50 °C), caracterizando um planejamento fatorial completo com dois fatores, umidade do meio e temperatura de ensaio, trabalhando-se com sete níveis do fator umidade e dois níveis do fator temperatura. Na Tabela 4.2, são apresentados os resultados da análise de variância realizada para avaliar estatisticamente a significância do

efeito das variáveis umidades do meio e temperatura inicial do ensaio nos resultados de condutividade térmica efetiva do meio composto, ao nível de 5 % de significância, lembrando que os ensaios foram realizados em duplicata.

Na Figura 4.9, são apresentados os dados de K_0 em função do teor de umidade, parametrizados pela temperatura inicial dos ensaios, o que possibilita observar a tendência dos resultados obtidos em função das variáveis analisadas. Na Figura 4.10, tem-se o boxplot dos valores de K_0 também em função da umidade do meio e da temperatura inicial, onde é possível avaliar a variação da condutividade quando da mudança de níveis das variáveis envolvidas.

Tabela 4.1: Resultados obtidos nos experimentos com o meio composto.

Umidade (b.u.)	Ensaio	T = 25 °C			T = 50 °C		
		C_{meio}	R^2	K_0 (W/m°C)	C_{meio}	R^2	K_0 (W/m°C)
22 %	1	21,58	0,999	0,068	18,71	0,998	0,079
	2	21,84	0,999	0,068	19,02	0,999	0,078
30 %	1	17,87	0,999	0,083	15,31	0,999	0,096
	2	18,00	0,999	0,082	15,55	0,999	0,095
40 %	1	14,13	0,999	0,104	11,48	0,998	0,128
	2	14,26	0,999	0,103	11,68	0,998	0,126
50 %	1	11,25	0,997	0,131	11,60	0,996	0,127
	2	11,47	0,998	0,128	11,9	0,997	0,124
60 %	1	11,41	0,998	0,129	10,32	0,995	0,143
	2	11,66	0,998	0,126	10,67	0,996	0,138
70 %	1	8,12	0,997	0,182	6,37	0,998	0,232
	2	7,77	0,996	0,189	6,48	0,999	0,228
80 %	1	2,88	0,999	0,512	2,04	0,998	0,723
	2	2,48	0,999	0,510	2,06	0,998	0,717

Tabela 4.2: Resultados da análise de variância dos dados de K_0 ($\alpha = 5\%$).

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma de Quadrados	Quadrado médio	Estatística F	Valor P
Umidade	6	0,870712	0,145119	24626,21	0,000 ** ($p \ll \alpha = 5\%$)
Temperatura	1	0,013684	0,013684	2322,19	0,000 ** ($p \ll \alpha = 5\%$)
Umidade x Temperatura	6	0,032993	0,005499	933,15	0,000 ** ($p \ll \alpha = 5\%$)
Erro	14	0,000082	0,000006		
Total	27	0,917473			

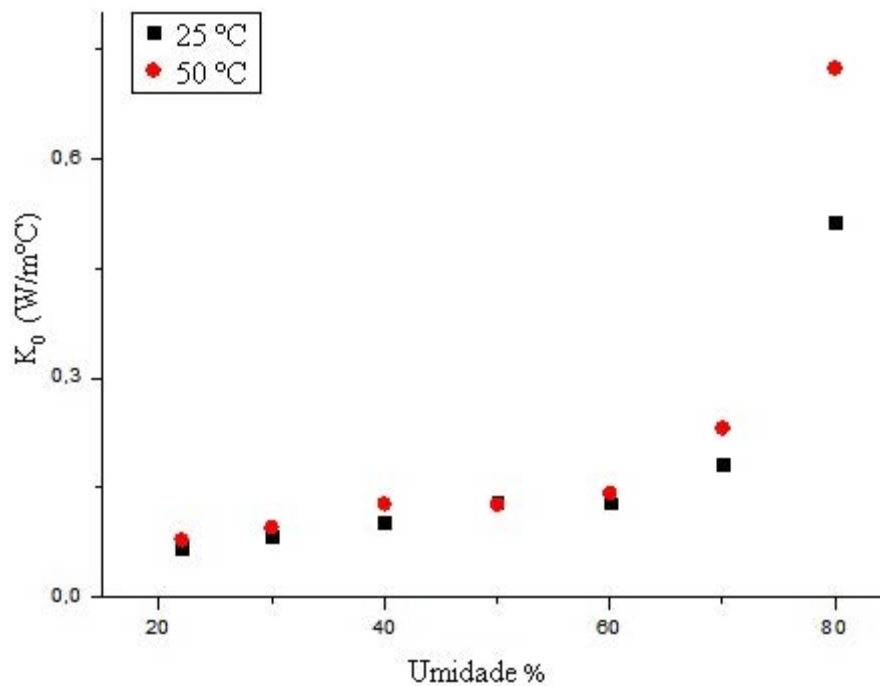


Figura 4.9: Condutividade térmica efetiva na estagnação para o meio composto em função do teor de umidade (b.u.), parametrizada pela temperatura inicial dos ensaios.

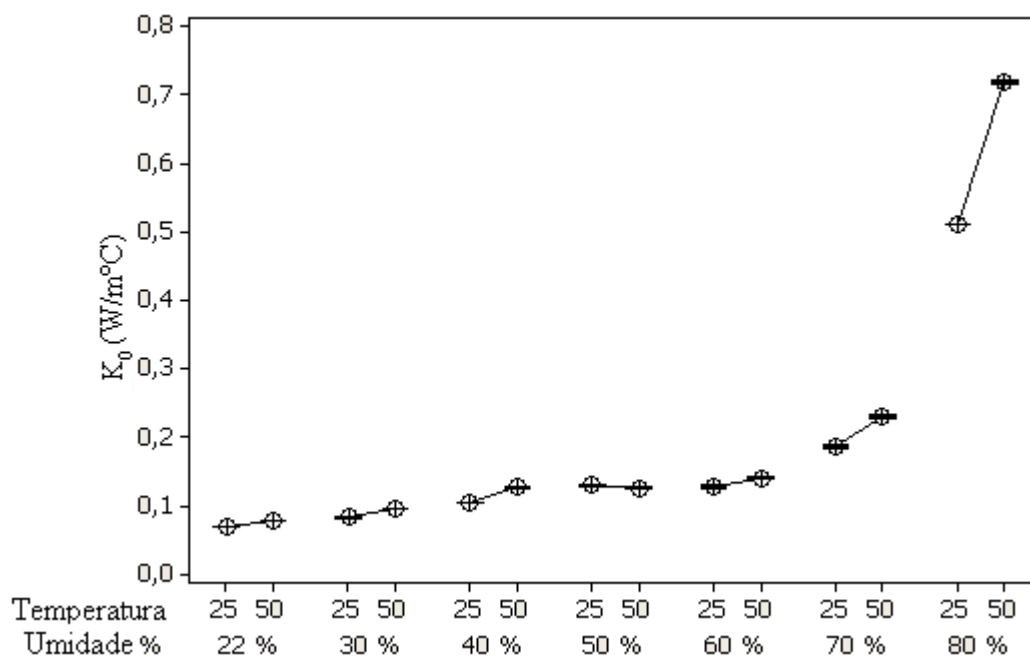


Figura 4.10: Boxplot de K_0 em função do teor de umidade e da temperatura inicial.

Analisando-se os coeficientes angulares (C_{meio}) apresentados na Tabela 4.1, que correspondem à inclinação da porção linearizada das curvas de temperatura em função de $\ln(t)$, percebe-se que não há grandes variações da taxa de aquecimento para o meio composto com determinado teor de umidade quando submetido às temperaturas iniciais de ensaio de 25 e 50 °C.

De acordo com a análise de variância apresentada na Tabela 4.2, tem-se que a temperatura exerce efeito significativo nos valores de K_0 do meio composto, de modo que a condutividade tende a ser maior à temperatura de 50 °C, conforme esperado, uma vez que a literatura mostra que a condutividade é uma propriedade térmica que aumenta com a elevação da temperatura (PERRY et al., 2008). Conforme se observa no boxplot da Figura 4.10, a variação dos valores de K_0 entre as temperaturas de 25 e 50 °C torna-se expressiva a partir de 70 % de umidade (b.u.), sendo particularmente significativa quando o teor de umidade do material é de 80 % (b.u.), que foi o valor máximo de umidade avaliado.

Com relação ao efeito da umidade do material, observa-se nas Figuras 4.9 e 4.10 que há nítida diferença entre os valores de condutividade térmica do meio com baixa umidade (22 %) e do meio com alta umidade (80 %), e a análise de variância comprovou que tal fator exerce efeito significativo sobre K_0 , ao nível de 5 %. Nota-se que, até 60 % de umidade, a variação da condutividade térmica do meio com o teor de umidade é linear, enquanto que a elevação de K_0 se torna bem pronunciada para o meio com conteúdos de umidade superiores a

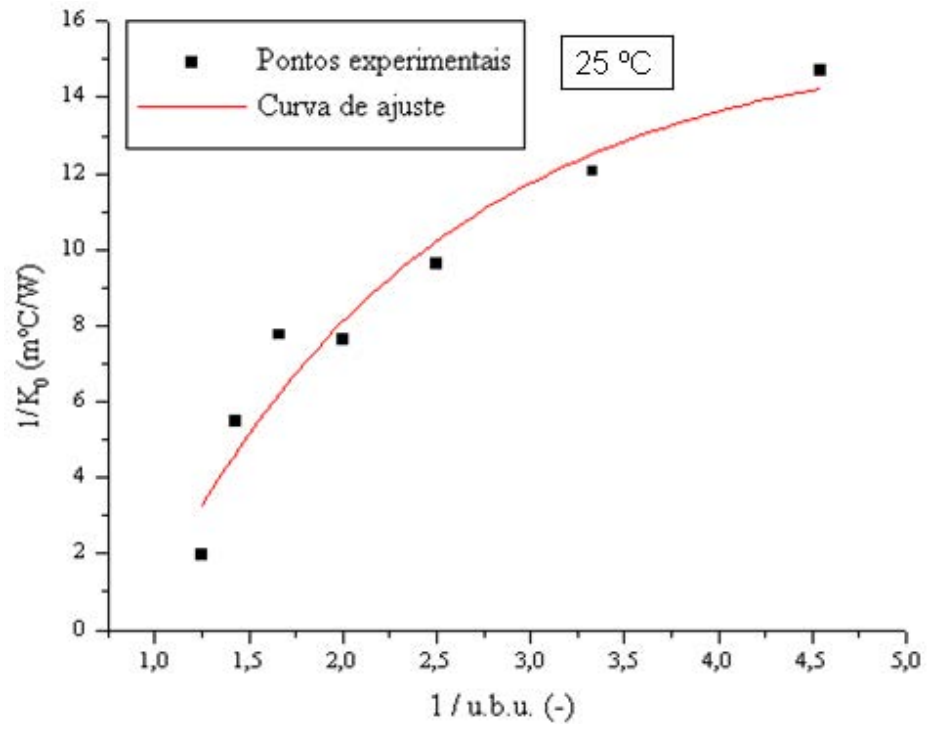
70 % (b.u.), especialmente para a maior temperatura, o que novamente se atribui à grande quantidade de água livre presente no sistema em análise.

Os resultados aqui observados concordam com as observações de Fang e colaboradores (2000) em seu trabalho com amidos de arroz, no qual observou que a condutividade térmica dos amidos aumentava significativamente com o aumento da temperatura e do conteúdo de água. Sreenarayanan e colaboradores (1985) também observaram aumento da condutividade térmica efetiva de soja com o aumento do conteúdo de água do material.

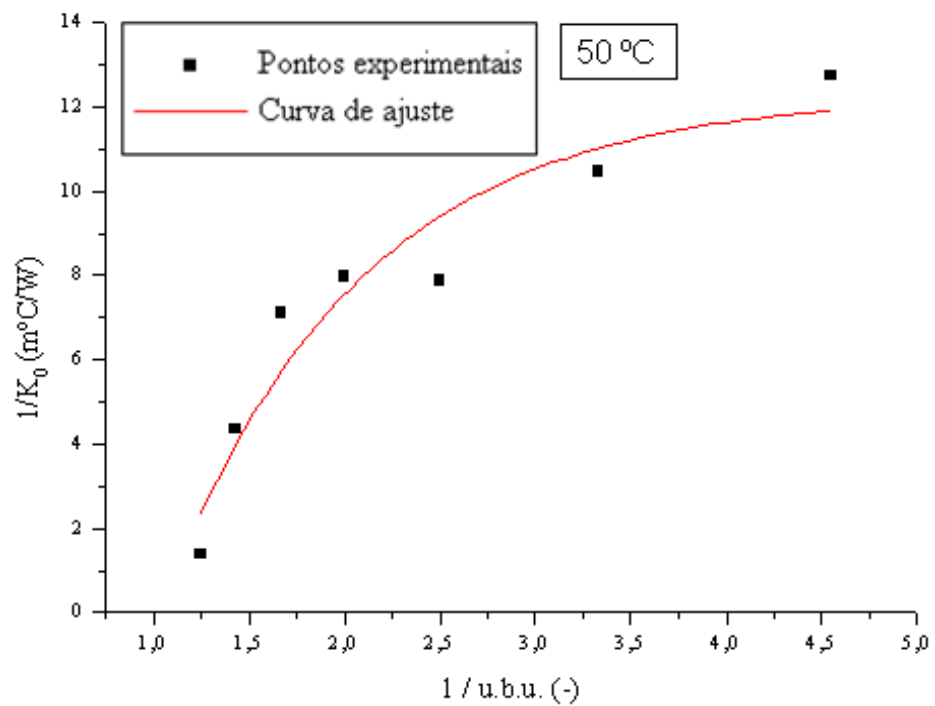
Como se nota nas Figuras 4.9 e 4.10, o meio com baixos teores de umidade apresentou condutividade térmica muito baixa, tendo em vista a predominância de fibras orgânicas no leite. Em altos teores de umidade (superiores a 70 % b.u.), o meio apresentou condutividade térmica mais elevada.

Levando em consideração o efeito combinado da umidade e da temperatura, comparando-se os valores da condutividade térmica da água pura a 25 e a 50 °C extraídos da literatura (PERRY et al., 2008), 0,611 e 0,642 W/m°C, tem-se uma elevação de 5,6 %, enquanto que, para o meio composto com 80 % de umidade, esta elevação é de 40,6 % (0,511 para 25 °C e 0,720 para 50 °C), sugerindo que, para temperaturas mais elevadas, haja um outro mecanismo de transporte preponderante e distinto daquele observado para as fibras de bagaço de cana a 80 % de umidade, como discutido anteriormente, quando se supôs que o mecanismo dominante seria o de condução através de um filme de água líquida que recobria as partículas. Como o valor de K_0 do meio composto é superior ao da condutividade térmica molecular da água pura e dos demais constituintes do meio composto, é de se supor que algum mecanismo convectivo, como a migração de umidade na fase vapor, deva estar associado ao fenômeno.

A mesma equação assintótica (4.1) foi ajustada aos dados de K_0 do meio composto nas temperaturas de 25 e 50 °C. Os pontos experimentais e a curva ajustada são apresentados nas Figuras 4.11a e 4.11b, para as temperaturas de 25 e 50 °C, respectivamente. Para 25 °C, os valores dos parâmetros de ajuste foram $A = 15,65$, $B = 28,29$ e $C = 0,52$, com desvios padrão de 2,55, 7,62 e 0,16, respectivamente, sendo o coeficiente de correlação $r^2 = 0,95$. Para 50 °C, $A = 12,29$, $B = 34,20$ e $C = 0,37$, com desvios padrão de 1,57, 17,03 e 0,16, respectivamente, e coeficiente de correlação $r^2 = 0,92$. Como $r^2 \approx 1$, tem-se que as curvas se ajustaram bem aos dados experimentais de K_0 em função da umidade do meio.



(a)



(b)

Figura 4.11: Ajuste de K_0 do meio composto em função da umidade: a) $25^\circ C$; b) $50^\circ C$.

4.2 Leito fixo recheado com bagaço de cana percolado por ar

4.2.1 Temperatura de entrada do ar (T_0)

A medida da temperatura de entrada do ar foi feita com um termopar inserido radialmente em $z = 0$. De acordo com os ensaios preliminares com a célula não empacotada, apesar de o ar ter sua temperatura condicionada ao passar num banho a 40 °C antes de percolar o leito, a temperatura na posição $z = 0$ foi sempre superior a este valor, provavelmente devido a um efeito de aleta, já reportado por Thoméo e colaboradores (2004), provocado pela inserção radial do termopar. Acredita-se que ocorria condução de calor da camisa para a parede da seção de entrada da célula, e desta para a haste do termopar, provocando o efeito de aleta.

Na Tabela 4.3, são apresentados os resultados de temperatura na posição $z = 0$, obtidos dos ensaios preliminares na célula não empacotada. Como os coeficientes de variação dos ensaios em quintuplicata foram inferiores a 1 %, pode-se dizer que os resultados foram reprodutíveis.

Tabela 4.3: Temperatura T_0 (°C) em $z = 0$ em função da vazão de ar.

Vazão (L/h)		400	500	600	800	1000	1200
T_0 (°C)	Ensaio 1	43,0	42,6	42,3	41,6	41,4	41,3
	Ensaio 2	43,0	42,8	42,5	41,6	41,3	41,2
	Ensaio 3	43,2	42,7	42,4	41,9	41,2	41,0
	Ensaio 4	43,6	43,3	42,6	41,9	41,1	40,9
	Ensaio 5	43,8	43,2	42,7	41,9	41,0	40,8
	Média (°C)	43,3	42,9	42,5	41,8	41,2	41,0
	Coeficiente de variação (%)	0,8	0,7	0,4	0,4	0,4	0,5

Nota-se que T_0 é dependente da vazão de ar, apresentando tendência de queda com o aumento da vazão, devido ao resfriamento convectivo na seção de entrada. Assim, aos pontos experimentais de T_0 foi ajustada uma função da vazão de ar e da temperatura do banho termostático, obtendo-se a seguinte função:

$$T_0 = T_{\text{ref}} + 6,3 \exp(-\text{Vaz} / 636,3) \quad (4.2)$$

onde T_0 é a temperatura na posição $z = 0$ do leito, T_{ref} é a temperatura de referência do banho termostático (neste caso, 40 °C) e Vaz é a vazão de ar percolante, em L/h.

Na Figura 4.12, são apresentados os pontos experimentais e a curva de ajuste por decaimento exponencial. Nota-se que, quando a vazão tende a 0, T_0 tende a 46,3 °C; por outro lado, quando a vazão tende ao infinito, T_0 tende a T_{ref} , o que está adequado ao fenômeno físico observado. O coeficiente de correlação foi 0,995, o que reitera que o ajuste foi satisfatório. Esta equação foi empregada nos programas computacionais que requereram esta informação.

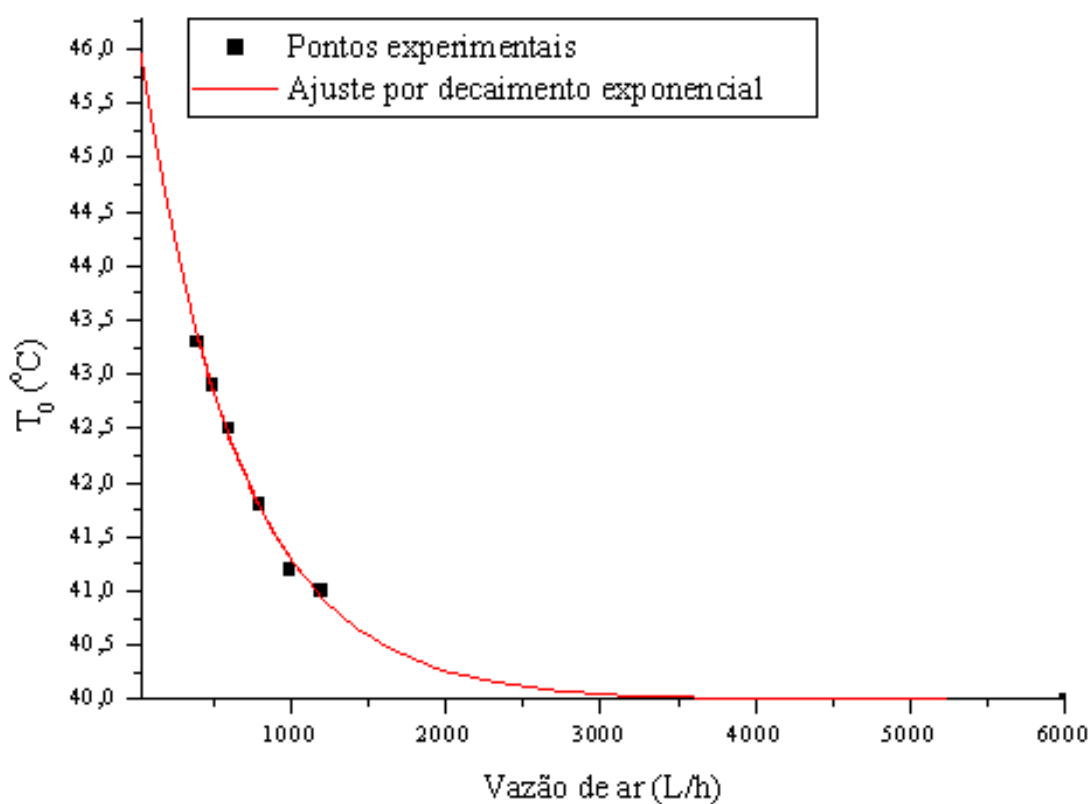


Figura 4.12: Temperatura de entrada no leito: pontos experimentais e curva de ajuste.

4.2.2 Ensaios térmicos

Nas Figuras 4.13a a 4.13c, são observados os perfis radiais de temperatura nos leitos com comprimentos 6, 12 e 18 cm, respectivamente, empregando-se os termopares do tipo sondas retas. Apesar de, a princípio, os perfis de temperatura parecerem típicos, nota-se que as variações de temperatura foram muito discretas no interior do leito fixo.

Para os leitos de 6 e 12 cm, nota-se que a temperatura permanece praticamente constante nas proximidades do centro do leito, sofrendo pouca variação desde o centro do

leito até uma distância radial correspondente a mais da metade do raio do leito ($r/R = 0,56$), o que foi particularmente característico das menores vazões de percolação empregadas.

Em alguns casos, mesmo com re-empacotamento do leito entre as repetições, observou-se que os termopares alocados em $r/R = 0,27$ e $0,56$ indicaram temperaturas inferiores à do sensor central, o que contraria o perfil esperado de temperatura decrescente a partir da parede até o centro do leito, já que foi feito aquecimento pela camisa. Entretanto, como os perfis de temperatura foram achatados nas proximidades do centro do leito, notou-se que as diferenças de temperatura entre as posições radiais $r/R = 0,0$; $0,27$ e $0,56$ eram inferiores à precisão assumida para os sensores ($\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$).

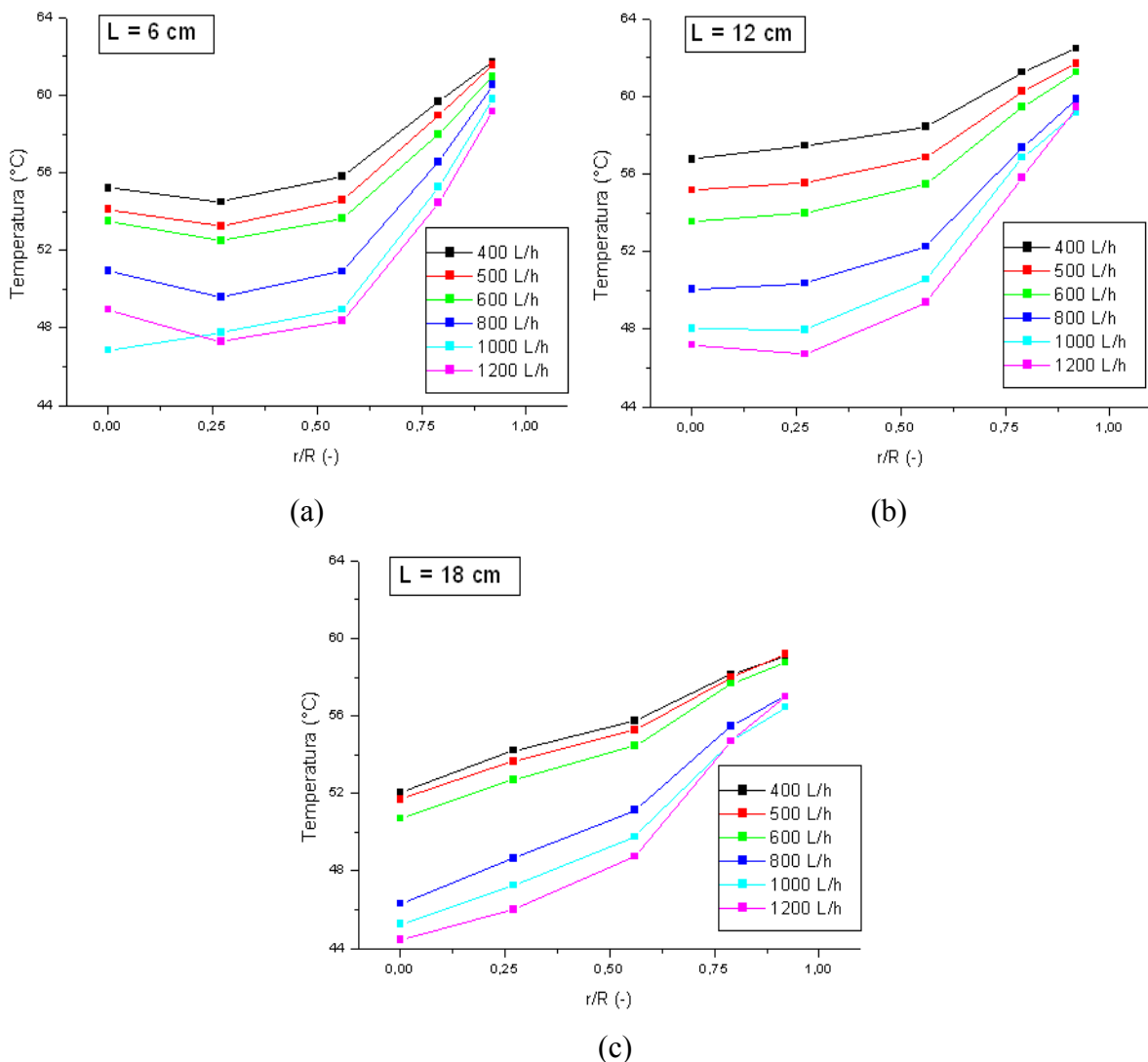


Figura 4.13: Temperatura em função da posição radial no leito fixo recheado com bagaço de cana percolado por diferentes vazões de ar e com alturas: a) 6 cm; b) 12 cm; c) 18 cm.

Estas medidas de temperatura foram realizadas com os termopares dispostos longitudinalmente, o que minimiza os efeitos de aleta sobre os valores fornecidos pelos sensores. Tal efeito é decorrente do fato de a base e a junção dos termopares estarem a temperaturas distintas, o que faz com que haja condução de calor através da bainha do sensor, mascarando o valor real da temperatura (BIRD et al., 2002). Neste trabalho, poderia se suspeitar que o gradiente de temperatura ao longo da haste do termopar pudesse causar um efeito de aleta nas medidas. Esse gradiente térmico na haste tenderia a ser mais pronunciado para o leito empacotado até 18 cm, situação na qual parte da haste dos termopares fica dentro da região encamisada e parte fica exposta ao ambiente. No entanto, Casciotori (2008) realizou medidas com os termopares dispostos longitudinalmente no topo do leito adotando duas estratégias, uma com a célula aberta ao ambiente e outra com a colocação de um prolongamento de PVC de 10 cm de comprimento acoplado ao topo da seção térmica, com o objetivo de comparar se a exposição da haste à temperatura do ambiente poderia interferir nas medidas. Para ambas as formas de medida, os perfis de temperatura obtidos pela autora foram praticamente coincidentes, como se observa na Figura 4.14. Deste modo, o efeito de aleta decorrente dos gradientes térmicos ao longo da haste do termopar pode ser considerado desprezível nas condições operacionais empregadas neste trabalho e no de Casciotori (2008).

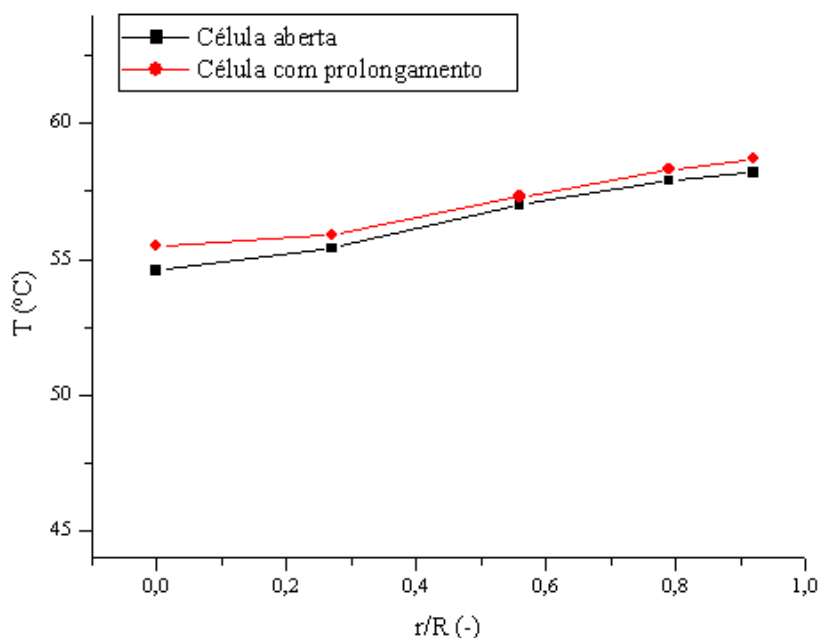


Figura 4.14: Perfis de temperatura em leito de bagaço de cana obtidos por medidas na saída da célula aberta (■) e com prolongamento (◆) ($L = 18$ cm, Vazão = 400 L/h; $T_0 = 40$ °C; $T_p = 65$ °C; prolongamento = 10 cm; seção térmica = 21 cm).

Para os três comprimentos de leito, nota-se uma mudança mais brusca da temperatura quando se passa da vazão de 600 L/h para a de 800 L/h, o que se assumiu como uma fase de transição entre a predominância da contribuição estática para uma fase de equivalência entre as contribuições estática e dinâmica. Também se notou que a temperatura na posição radial mais próxima da parede ($r/R = 0,92$) tendia, em média, a valores próximos de $T_R = 60\text{ }^\circ\text{C}$, independentemente da vazão de ar e da altura de leito. Levando em conta que a distância entre o centro do sensor de temperatura mais externo e a parede do leito (assumida como estando a $T_p = 65\text{ }^\circ\text{C}$) era de apenas 1 mm, teve-se um gradiente de temperatura muito expressivo nessa região ($5\text{ }^\circ\text{C}/\text{mm}$). Diante disso, é possível inferir que a condição de contorno convectivo em $r = R$ é a mais adequada para a representação física do fenômeno e que há uma resistência térmica elevada entre a parede e a matriz porosa.

Tal fato pode ser atribuído à alta porosidade observada visualmente na região do contato entre a parede e o contorno da matriz composta por fibras secas de bagaço de cana (Figura 20a), decorrente de um grau de empacotamento diferente causado pela presença física da parede da célula, conhecido como efeito de parede (ZOTIN, 1985; THOMÉO et al., 2004). A estrutura dos leitos empacotados com lascas de madeira estudados por Hamel e Krumm (2008) pode ser considerada semelhante à dos leitos empacotados com bagaço de cana seco, conforme se vê nas Figuras 4.15a e 4.15b. De acordo com esses autores, as oscilações espaciais da porosidade da matriz provocam alterações na velocidade intersticial do ar, o que interfere nos mecanismos de transferência de calor, resultando em variações espaciais dos parâmetros térmicos do leito empacotado. Conforme já apresentando no capítulo *Revisão da Literatura*, o comportamento da porosidade não é propriamente oscilatório amortecido, como observado por vários autores para esferas de vidro (RIDGWAY; TARBUCK, 1968; ZOTIN, 1985; HAMEL; KRUMM, 2008), mas há um decréscimo acentuado para um valor constante a uma distância de apenas 0,5 dp. Neste pequeno espaço, a porosidade é muito elevada, o que favorece o escoamento preferencial do ar junto à parede, permitindo a formação de camada limite térmica e justificando o contorno de 3ª espécie.

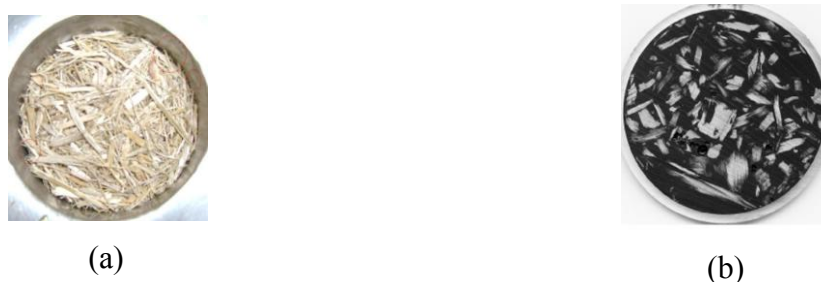


Figura 4.15: Vista superior dos leitos empacotados (a) bagaço de cana; (b) lascas de madeira.

Nas Figuras 4.16a a 4.16c, são apresentadas as temperaturas médias na saída do leito (T_{avg}) em função de vazão, parametrizadas pelo comprimento do leito. As temperaturas médias no topo do leito foram obtidas por integração numérica do perfil radial de temperaturas, utilizando a função *trapz* do MatLab 7.0. A integração foi realizada de três formas distintas: (a) integração do centro até $r/R = 0,92$ (posição do sensor térmico mais externo); (b) integração do centro até $r/R = 1,00$ (parede); e (c) integração desde $r/R = 0,92$ até $r/R = 1,00$ (parede).

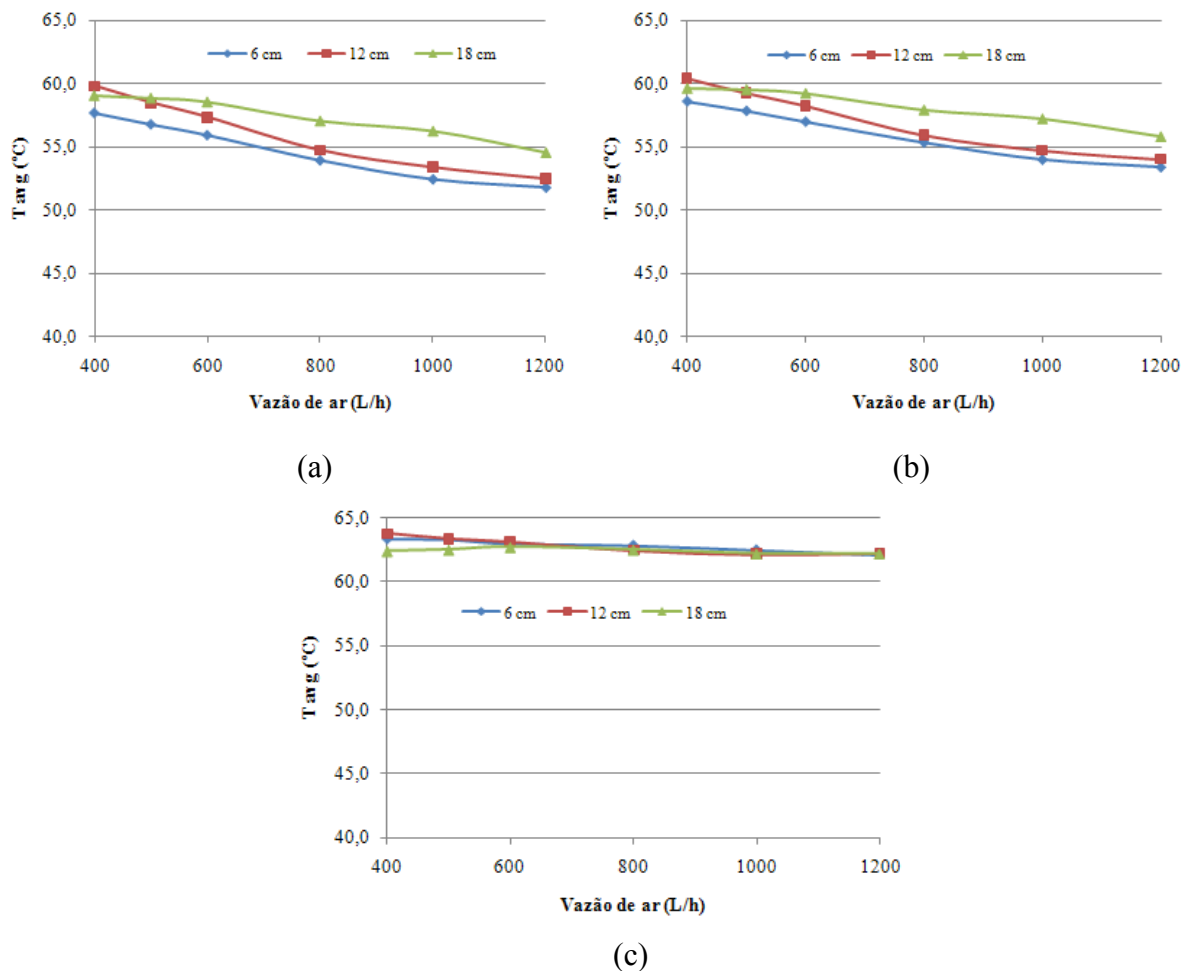


Figura 4.16: Temperatura média radial no topo do leito de bagaço de cana em função da vazão de fluido percolante: (a) integração até $r/R = 0,92$; (b) integração até $r/R = 1,00$ (parede); (c) integração de $r/R = 0,92$ até $1,00$ (parede).

No primeiro caso, para r/R de 0 a 0,92, obteve-se T_{avg} com base nos dados térmicos radiais efetivamente coletados experimentalmente. No segundo e no terceiro casos, para r/R de 0 a 1 e r/R de 0,92 a 1, admitiu-se que a temperatura da parede era igual à da água de aquecimento ($65\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Nas Figuras 4.16a e 4.16b, nota-se que as temperaturas médias apresentam tendência crescente com o comprimento do leito. Essa tendência não é observada na Figura 4.16c, na qual se nota que T_{avg} na região entre a borda da matriz porosa e a parede do tubo não depende do comprimento do leito, uma vez que essa região de contorno é praticamente uma fenda ou um canal vazio, no qual as temperaturas mantêm-se sempre próximas à temperatura da parede. Convém lembrar que a porosidade média já é muito alta (próxima de 0,9) no leito de bagaço de cana seco (CASCIATORI et al., 2007). De um modo geral, T_{avg} é mais dependente da vazão de percolação que do comprimento, observando-se tendência decrescente com aumento da vazão de ar, o que era esperado, por se fazer aquecimento pela camisa e resfriamento pela percolação de ar.

Observa-se nas Figuras 4.16a e 4.16b que o comportamento de T_{avg} em função da vazão foi muito semelhante para as integrações do centro até $r/R = 0,92$ e do centro até a parede, sendo os valores obtidos da integração até a parede em média $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ maiores que os obtidos da integração até a posição radial do último sensor de temperatura, uma vez que, no primeiro caso, foi inserido na integração o maior dado térmico do sistema.

Por outro lado, na Figura 4.16c, foi possível observar que os valores de T_{avg} na região da parede foram consideravelmente maiores que os valores de T_{avg} desde o centro até a parede do leito ou até o termopar mais externo, sendo em média $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ maiores que as temperaturas médias calculadas em toda a seção transversal do leito, podendo essa diferença ultrapassar 8°C . Tal observação denota novamente que, nessa região próxima da parede do leito, tem-se uma zona em que a transferência de calor é diferenciada, devido ao escoamento preferencial de fluido percolante, sugerindo que pode ser interessante obter coeficientes de transferência de calor específicos para a região da parede, como proposto por Gunn e colaboradores (1987).

A análise dos perfis de temperatura permite presumir que a dificuldade de remoção de calor nos reatores de FES em leito fixo decorre de dois fatores principais: as propriedades do recheio e as condições operacionais. O primeiro fator consiste em que o meio poroso não é propício à transferência de calor por ser um material orgânico, predominantemente celulósico, o que lhe confere baixa condutividade térmica molecular. O segundo fator consiste em que as vazões empregadas nos reatores de FES são muito baixas, o que resulta em baixa taxa de troca térmica devida à contribuição dinâmica da transferência de calor no leito percolado por ar.

4.2.3 Coeficiente global de transferência de calor U

Nas Figuras 4.17a a 4.17c, são apresentados os valores do coeficiente global U, calculados de três formas distintas: com base na temperatura média radial integrada até $r/R =$

0,92; na temperatura integrada até $r/R = 1,00$ (parede); e na temperatura integrada desde $r/R = 0,92$ até $r/R = 1,00$ (parede), respectivamente.

De um modo geral, observou-se que este parâmetro apresentou tendência de queda com o aumento do comprimento do leito, o que se explica com base na própria definição deste parâmetro, baseada na definição clássica de Newton para coeficientes convectivos de transferência de calor para escoamento de fluidos no interior de tubulações (BIRD et al., 2002).

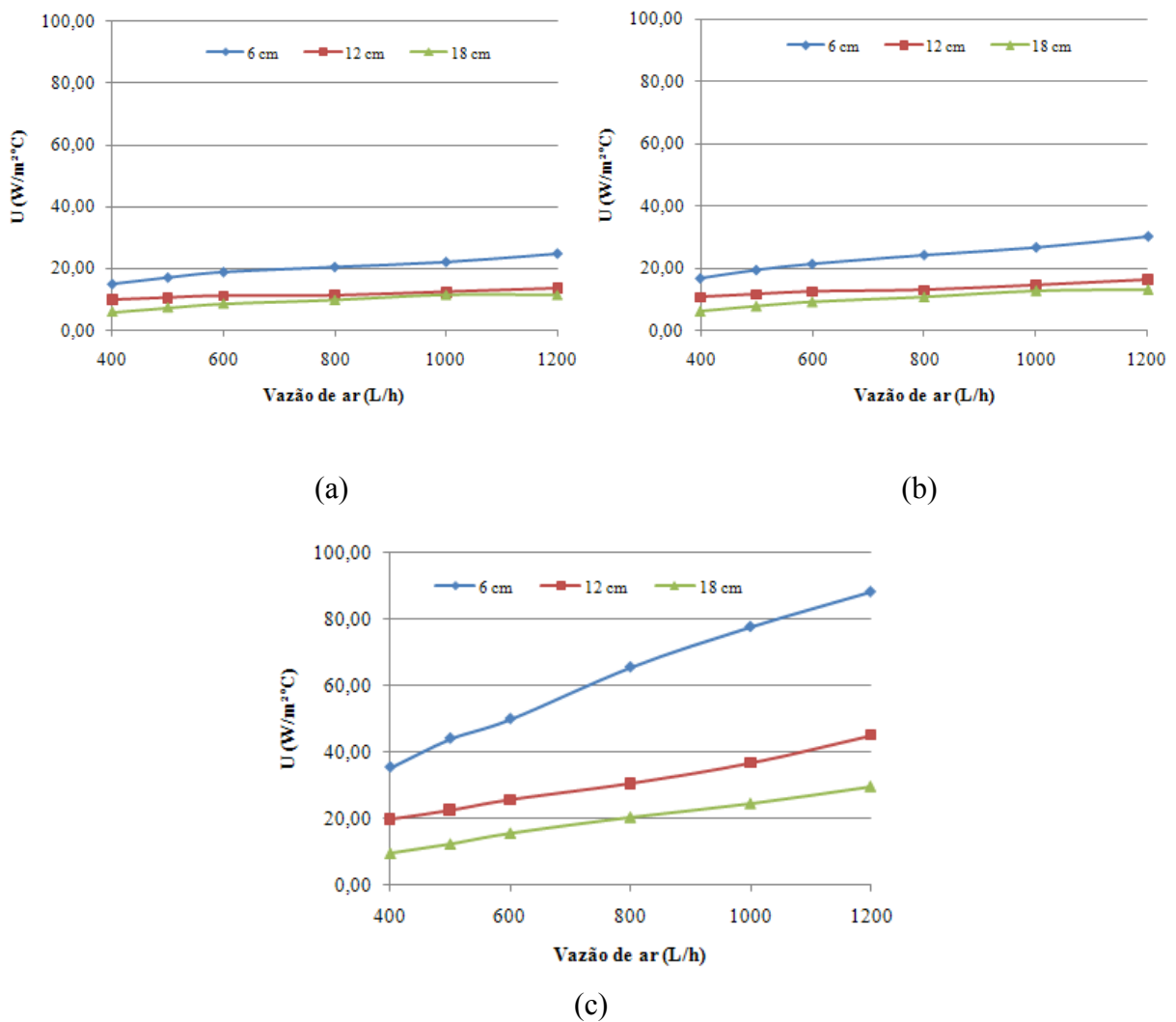


Figura 4.17: Coeficiente global U para leito de bagaço de cana em função da vazão de ar e calculado com base em T_{avg} : (a) até $r/R = 0,92$; (b) até $r/R = 1,00$; (c) de $r/R = 0,92$ até $1,00$.

Quando T_{avg} foi calculada até $r/R = 0,92$, foram usados cinco pontos experimentais de temperatura, enquanto que o cálculo até a parede incluiu apenas um ponto, estimado, a mais. Com isso, os cinco pontos experimentais minimizaram a influência desse sexto ponto, o que

fez com que os valores de U calculados por meio dessas duas formas de obtenção de T_{avg} se tornassem muito próximos, conforme se vê nas Figuras 4.17a e 4.17b.

O coeficiente global de troca de calor U também pode ser calculado através de correlações similares às empregadas para cálculo de coeficientes convectivos de transferência de calor, como se vê na equação (4.4):

$$\frac{U_d}{U_f} = A Re^b Pr^c \quad (4.4)$$

onde U_f é o coeficiente global de troca térmica no tubo vazio; U_d é o coeficiente global dinâmico no leito empacotado; Re é o número de Reynolds; Pr é o número de Prandtl do fluido percolante e A , b e c são constantes de ajuste (BIRD et al., 2002).

Desta forma, se U aumenta quando a vazão (G) aumenta, significa que há influência da vazão sobre U . Neste trabalho, isso só ocorreu de forma marcante para $L = 6$ cm, como visto nas Figuras 4.17a a 4.17c, o que indica que a contribuição dinâmica foi expressiva somente para leitos curtos.

Na Figura 4.17c, é apresentado o coeficiente U calculado para a região da parede. O cálculo foi feito pela substituição de T_{avg} integrada na região de $0,92 \leq r/R \leq 1,00$ na equação (2.2) da *Revisão da Literatura*. Observa-se tendência nitidamente linear crescente de U com o aumento da vazão de percolação, o que denota que os efeitos dinâmicos da transferência de calor foram notadamente mais expressivos nas proximidades da parede do leito. Tal fato resultou em valores dos coeficientes globais de troca térmica na região da parede muito superiores aos calculados para toda a seção transversal, sendo os valores de U nas proximidades da parede em média 2,3 vezes maiores que os valores de U calculados para toda a seção transversal do leito, podendo chegar a ser até quase 3 vezes maior, e sendo novamente essa diferença tão maior quanto maior a vazão de ar e menor o comprimento do leito.

Este resultado reforça a hipótese de que a troca de calor por convecção é de fato mais intensa na região da parede, devido ao efeito de parede, como já discutido. Portanto, fica clara a pertinência de se trabalhar com valores do coeficiente U específicos para a região da parede ou com um modelo de duas regiões para representar melhor a transferência de calor tanto na região central quanto na zona de contorno do leito empacotado.

4.2.4 Parâmetros térmicos do modelo bidimensional

Nas Figuras 4.18a a 4.18c, são apresentados, respectivamente, os parâmetros K_r , K_r/K_0 e h_p do modelo bidimensional em função da vazão de ar, para as três alturas de leito.

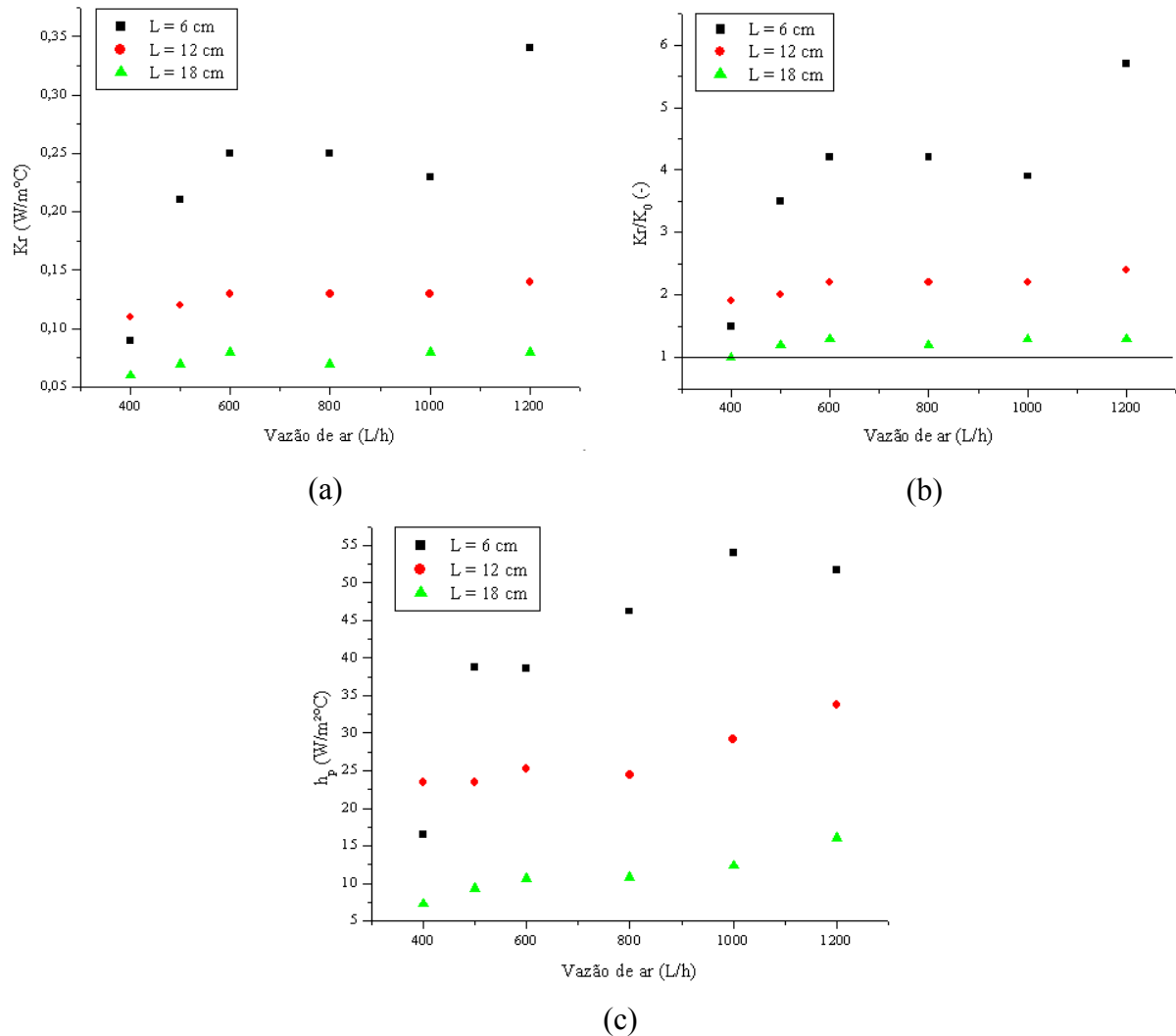


Figura 4.18: Parâmetros térmicos estimados pelo modelo bidimensional para leitos recheados com bagaço de cana: a) K_r ; b) K_r/K_0 ; c) h_p .

Conforme visto na Figura 4.18a, a condutividade térmica efetiva radial apresentou uma tendência de crescimento com a vazão de ar, embora não muito definida, e de queda com o aumento da altura de leito. Tais comportamentos já haviam sido observados na literatura (DE WASH; FROMENT, 1972; DIXON, 1985; THOMÉO, 1995), embora não para o tipo de recheio empregado e com vazões tão baixas de ar.

Na Figura 4.18b, foi possível observar que, para as baixas vazões de percolação empregadas, o valor de K_r tendeu ao valor de K_0 , aproximadamente 0,06 W/m°C (55 °C),

como apresentado no item 4.1.2, para leitos recheados com bagaço de cana seco (5 % de umidade). Tal tendência está particularmente nítida para o leito com comprimento 18 cm, para o qual K_r/K_0 manteve-se em torno de 1 para toda a faixa de vazões aqui avaliadas.

Dixon e colaboradores (1978) e Dixon (1997) separaram a condutividade térmica efetiva radial em duas contribuições, uma estática e outra dinâmica, como pode ser visto na equação (4.5).

$$\frac{K_r}{K_f} = \frac{K_0}{K_f} + \frac{K_d \text{RePr}}{G C_p d_p} \quad (4.5)$$

onde K_f é a condutividade térmica molecular do fluido; K_d é a condutividade térmica efetiva devido à contribuição dinâmica e d_p é o diâmetro da partícula no leito.

Assim, é possível afirmar que, no caso do leito de bagaço estudado neste trabalho e para as condições operacionais empregadas, foi predominante a componente estática sobre K_r na resistência à troca de calor, o que aproxima K_r de K_0 . Para leitos curtos, esse efeito é menos pronunciado, o que se atribui ao fato de que a troca de calor é muito intensa e de que na região da parede há um mecanismo similar ao de uma camada limite sendo formada, perturbando o valor de K_r .

Alguns estudos de modelagem da transferência de calor em processos de FES empregam a equação (2.12) apresentada na *Revisão da Literatura*, onde está incluso o parâmetro K_b (SANGSURASAK; MITCHELL, 1998). Nesse modelo, nota-se que foram feitas as seguintes considerações:

$$K_r = K_a = K_b \quad (4.6)$$

$$K_b = (1 - \varepsilon) K_{\text{sólido úmido}} + \varepsilon K_{\text{ar}} \quad (4.7)$$

onde ε é a porosidade do sistema.

Por comparação entre esta equação e a equação (2.10), apresentada no capítulo *Revisão da Literatura*, nota-se que o cálculo de K_b equivale à definição de K_0 . Tais considerações poderiam ser contestadas, tendo em vista que as componentes axial e radial do tensor condutividade térmica não necessariamente são iguais entre si e tampouco são iguais ao valor na estagnação, uma vez que a contribuição dinâmica sobre K_r estaria sendo desprezada. Entretanto, de acordo com os resultados encontrados no presente trabalho, é possível afirmar

que tal consideração é válida, tendo em vista que, para as baixas vazões de percolação usuais em reatores de FES, foi observado que K_r se aproximava de K_0 .

Quanto ao coeficiente convectivo de troca de calor parede-fluido, h_p , apresentado na Figura 4.18c, foi observado comportamento similar ao de K_r com a vazão de ar e com a altura do leito. Ressalta-se que os valores do coeficiente convectivo encontrados neste trabalho foram muito baixos quando comparados a outros resultados da literatura que empregaram a mesma definição do parâmetro e vazões de ar similares, conforme visto na Tabela 4.4, embora não tenham sido encontrados trabalhos empregando os mesmos recheios aqui estudados. Os baixos valores de h_p reiteram a afirmação de que existe uma resistência convectiva apreciável entre a parede do tubo e o contorno do meio poroso composto pelas fibras do bagaço de cana, conforme já discutido.

Tabela 4.4: Valores do coeficiente h_p encontrados na literatura.

Recheio	G (kg/m ² s)	h_p (W/m ² °C)	Referência
Esferas de porcelana	0,2	65	Legawiec e Ziólkowski (1995)
Esferas de vidro	0,4	302	Thoméo (1990)
	0,9	462	
Bagaço de cana	0,2	12	Este trabalho

Finalmente, quanto à aplicabilidade do modelo tradicional a dois parâmetros ao sistema estudado, tem-se que, de acordo com o estudo de sensibilidade paramétrica de Sklivaniotis e colaboradores (1988) com o modelo adotado, K_r depende dos dados de temperatura obtidos na região central do leito para uma boa estimativa, enquanto que h_p depende de pontos na região da parede. Diante disso, é possível afirmar que o achatamento dos perfis radiais de temperatura no centro do leito prejudicou a obtenção de K_r , enquanto que a convergência dos perfis térmicos para uma mesma temperatura nas proximidades da parede do leito prejudicou a obtenção de h_p . Na Tabela 4.5, são apresentados os valores dos parâmetros K_r e h_p para o leito com $L = 6$ cm percolado pelas vazões de 400 a 800 L/h. Observa-se que os intervalos de confiança dos parâmetros foram da mesma ordem de grandeza dos parâmetros, o que significa que os parâmetros do sistema estudado foram mal estimados pelo modelo tradicional, indicando que sua aplicação não é indicada para leito fixo recheado com bagaço de cana seco e percolado por baixas vazões de ar.

Tabela 4.5: Parâmetros K_r e h_p estimados e seus intervalos de confiança para leitos de bagaço de cana ($L = 6$ cm).

Vazão (L/h)	K_r (W/m°C) (IC 95%)	h_p (W/m²°C) (IC 95%)
400	0,09 ($\pm 0,04$)	16,49 ($\pm 9,94$)
600	0,25 ($\pm 0,12$)	38,66 ($\pm 24,54$)
800	0,25 ($\pm 0,14$)	46,22 ($\pm 37,28$)

Diante do exposto, comparando-se o modelo bidimensional com o unidimensional, conclui-se que uma boa opção para o estudo e a modelagem da transferência de calor em leitos fixos empacotados com resíduos sólidos agroindustriais aplicáveis na FES pode ser empregar o modelo unidimensional com duas regiões, determinando-se os coeficientes de troca térmica na região central do leito e na zona próxima da parede dos reatores. Deste modo, podem-se propor simulações de processos de transferência de calor por meio do uso de uma modelagem simples e de fácil manipulação matemática, mas que fornece resultados satisfatórios para reatores de FES.

4.3 Leito fixo recheado com meio composto percolado por ar

4.3.1 Porosidade

Na Tabela 4.6, são apresentados os resultados de densidade *bulk* (ρ_{bulk}) experimental, densidade aparente das partículas (ρ_{ap}) calculada e de porosidade (ϵ) dos leitos fixos recheados com meio composto. Pelo baixo coeficiente de variação para as médias de porosidade entre as réplicas do experimento, constata-se que os resultados apresentaram boa reprodutibilidade, para ambas as umidades testadas.

Tabela 4.6: Porosidade de leitos recheados com meio composto.

Umidade (b.u.)	ρ_{bulk} experimental (g/cm³)	ρ_{ap} calculada (g/cm³)	Porosidade do Leito (ϵ)	Porosidade Média (ϵ)	Coefficiente variação (%)
5 %	0,14	0,98	0,86	0,84	1,9
	0,17		0,83		
	0,17		0,83		
75 %	0,33	1,04	0,68	0,67	1,1
	0,35		0,67		
	0,35		0,67		

Pode-se notar que a porosidade foi inversamente proporcional ao teor de umidade do meio, ou seja, leitos recheados com meio mais úmido foram menos porosos ($\varepsilon = 67\%$), enquanto que os leitos recheados com meio mais seco foram mais porosos ($\varepsilon = 84\%$). Tal resultado foi consequência de que a densidade *bulk* aumentou com o aumento da umidade do meio poroso. Considerando a definição clássica de porosidade (ε):

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{ar}}}{V_{\text{tot}}} \quad (4.8)$$

onde V_{ar} é o volume de ar contido nos espaços vazios entre as partículas no leito e V_{tot} é o volume total do leito, incluindo o volume ocupado pelo ar (V_{ar}) e pelas partículas sólidas (V_{part}), tem-se que, como o V_{tot} do leito é constante, ε diminui se V_{ar} diminui ou V_{part} aumenta. Neste caso, ocorreu que V_{part} aumentou, uma vez que as partículas sólidas constituintes do meio poroso incham com o aumento da umidade, passando a ocupar maior volume e deixando menos espaços vazios no leito, o que justifica a menor porosidade do leito com recheio úmido (CASCIATORI, 2008).

Esse aumento de volume das fibras com o aumento da umidade do bagaço pôde ser evidenciado por Casciatori (2008), que analisou o tamanho das células das fibras de bagaço de cana segundo a metodologia empregada por Santos e Oliveira (2007) na medição de células de testículos de anuros. Casciatori (2008) analisou fibras de bagaço com umidades entre 4 e 75 % (b.u.), as quais foram submetidas a coloração histológica por periodic-Acid & Schiff (PAS). A autora registrou microfotografias dos tecidos por meio do microscópio óptico Olympus, com lente objetiva de aumento de 20 vezes. O microscópio era conectado a uma câmera fotográfica, e esta a um computador provido do programa de captura e análise de imagens *Image Pró Plus 6.0*, que permitiu fazer medições do diâmetro celular, padronizado na distância entre a saída da borda externa da célula até a sua borda interna.

Nas microfotografias das células das fibras de bagaço de cana com 4 e 75 % de umidade, apresentadas nas Figuras 4.19a e 4.19b, respectivamente, nota-se que, para 4 % de umidade, há grande espaço intersticial entre as células, o que não ocorre para 75 %, condição na qual as células mostram paredes íntegras e túrgidas e não se observam espaços intercelulares vazios.

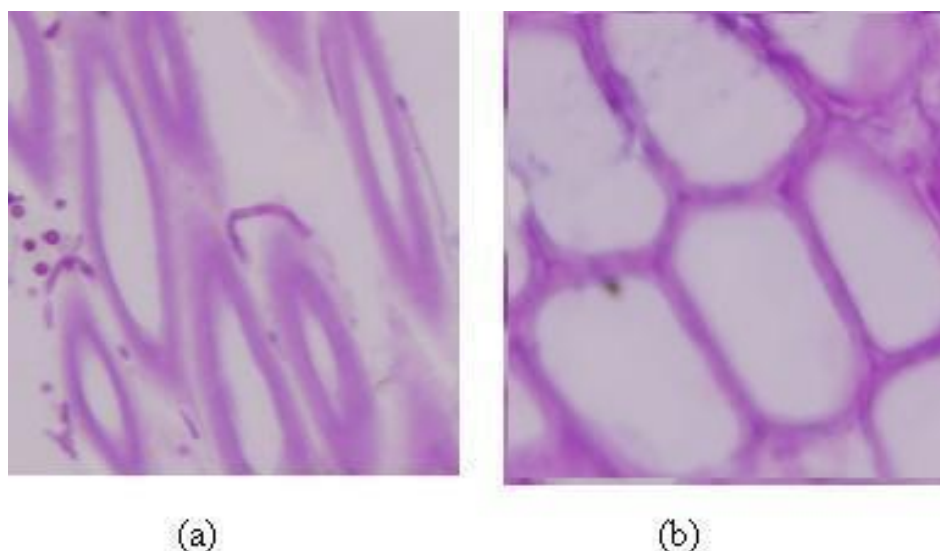


Figura 4.19: Microfotografia das células de bagaço: a) 4 % de umidade; b) 75 % de umidade.

Os dados de porosidade do leito recheado com meio composto foram tratados estatisticamente, para análise da significância da diferença de porosidade entre os leitos seco e úmido. Para tanto, foi aplicada uma análise de variância em blocos ao acaso, sendo as repetições distribuídas nos blocos, enquanto as umidades representaram os tratamentos, tendo-se utilizado o *software* Minitab 15.1 para realização da análise. Os resultados da ANOVA são apresentados na Tabela 4.7. De acordo com os resultados da ANOVA, concluiu-se que a diferença de porosidade entre os leitos seco e úmido foi significativa ao nível de significância $\alpha = 1\%$, o que foi denotado pelo valor $p < \alpha$. Quanto às repetições, tratadas em blocos, não se observa efeito significativo na resposta de porosidade do leito, o que reforça a boa reprodutibilidade dos ensaios.

Tabela 4.7: Análise de variância em blocos ao acaso para porosidade dos leitos ($\alpha = 1\%$).

Fonte de	Graus de	Soma de	Quadrado	Estatística F	Valor P
Umidade	1	0,0416667	0,0416667	625,00	0,002 **
Repetição	2	0,0005333	0,0002667	4,00	0,200
Erro	2	0,0001333	0,0000667		
Total	5	0,0423333			

Na Figura 4.19c, são apresentados *boxplots* da porosidade de leitos recheados com bagaço de cana, extraídos de Casciadori e colaboradores (2007), e com meio composto, obtidos neste trabalho, onde se pode ver o intervalo de confiança a 95 %. Nota-se que os leitos recheados com meio composto, em teores equivalentes de umidade, foram menos porosos que

os leitos de bagaço de cana, sendo essa diferença significativa ao nível de 1 %, de acordo com análise de variância. Além disso, a análise de variância demonstrou que tanto a umidade quanto o tipo de recheio provocam diferença significativa na porosidade média dos leitos. Deste modo, devido às diferenças estruturais, são esperadas diferenças na dinâmica de transferência de calor entre ambos os leitos.

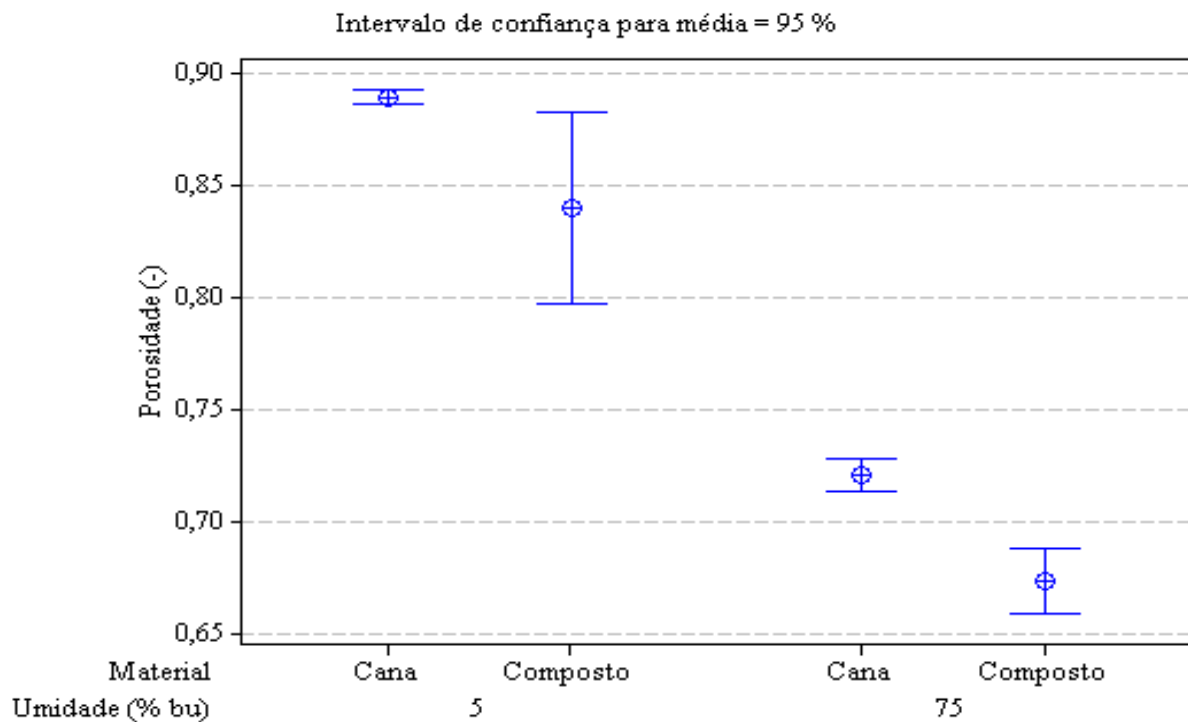


Figura 4.19c: Porosidade de leitos recheados com bagaço de cana e com meio composto.

4.3.2 Ensaio térmicos

Os dados de T_0 aqui empregados foram os mesmos apresentados na Tabela 4.3, uma vez que esses valores foram obtidos na mesma célula não empacotada e nas mesmas temperaturas da camisa e da entrada do ar, não dependendo do recheio.

Nas Figuras 4.20a a 4.20c, são observados os perfis radiais de temperatura nos leitos recheados com meio composto com comprimentos 6, 12 e 18 cm, respectivamente empregando-se os sensores anelares.

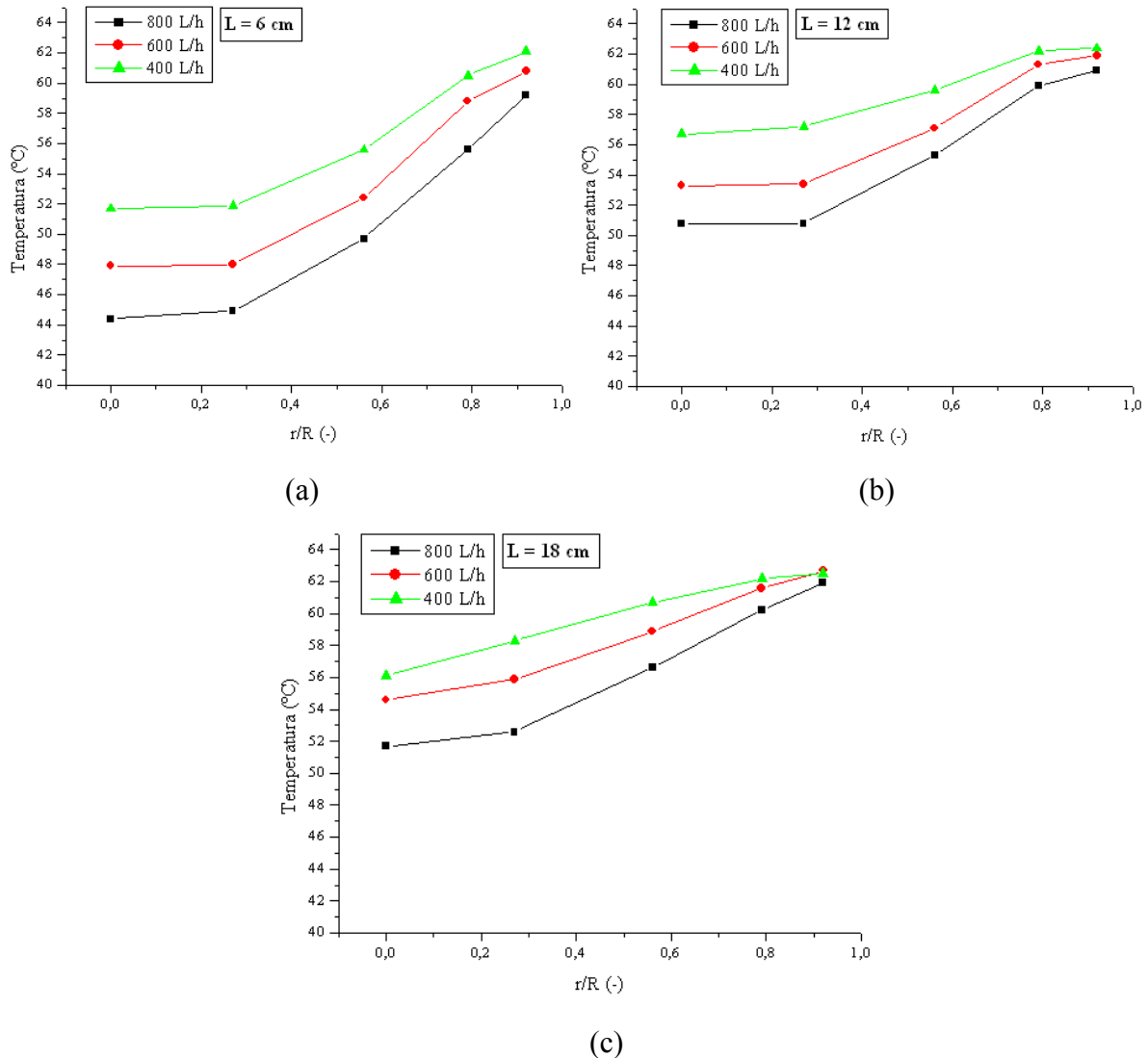


Figura 4.20: Temperatura em função da posição radial no leito fixo recheado com meio composto percolado por diferentes vazões de ar e com alturas: a) 6 cm; b) 12 cm; c) 18 cm.

Em comparação aos perfis observados para leitos recheados somente com bagaço de cana, os perfis radiais de temperatura foram mais pronunciados nos leitos recheados com meio composto, e o efeito devido à vazão foi mais claro e definido, observando-se temperaturas tão maiores quanto menor a vazão de percolação, conforme se esperava, tendo em vista que foi feito aquecimento pela parede e resfriamento pela percolação de ar.

Ainda assim, para os leitos com 6 e 12 cm de comprimento, as variações de temperatura ainda foram muito discretas nas regiões mais centrais do leito. Para o leito com 18 cm de comprimento, o perfil radial de temperaturas foi pronunciado desde o centro até o sensor radial mais externo, observando-se gradientes superiores a $10 \text{ }^\circ\text{C}$ desde o centro até a posição adimensional $r/R = 0,92$.

Entretanto, semelhantemente ao que foi observado para leitos de bagaço de cana, também se observou nos leitos recheados com meio composto que a temperatura nas proximidades da parede ($r/R = 0,92$) tendia, em média, a um valor em torno de $T_R = 61\text{ }^\circ\text{C}$, independentemente da vazão de ar e da altura de leito.

Novamente, observa-se um gradiente de temperatura muito expressivo na região de contorno da matriz porosa, o qual foi de cerca de 3 a 4 $^\circ\text{C}$ em uma distância de pouco mais de 1 mm. Diante disso, considera-se conveniente manter a condição de contorno convectiva em $r = R$ também para o meio composto. Entretanto, neste caso, esse efeito foi menos intenso do que o observado para bagaço de cana, tendo em vista que não se observa uma região nitidamente de menor densidade de partículas na vizinhança da parede do leito, o que se deve à presença das partículas de menor tamanho do bagaço de laranja e do farelo de trigo, proporcionando maior superfície de contato com a parede do tubo, conforme se pode ver na Figura 4.21. Comparando-se à Figura 4.21 a Figura 4.15a, observa-se claramente que, para leito empacotado com bagaço de cana, os espaços vazios nas proximidades da parede do tubo são maiores que no caso do leito empacotado com meio composto.

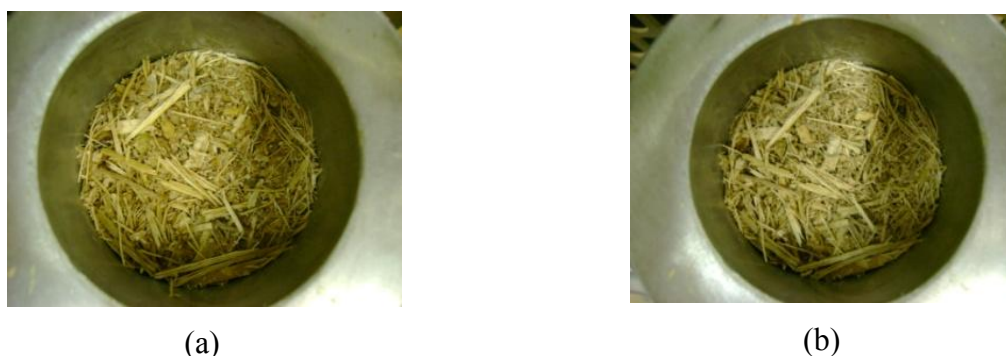


Figura 4.21: Vista superior do leito empacotado com meio composto por bagaços de cana e laranja e farelo de trigo (1:2:2 p/p): (a) Úmido; (b) Seco.

Nas Figuras 4.22a a 4.22c, é apresentada T_{avg} em função de vazão, parametrizada pelo comprimento do leito. Nota-se que houve pequena variação de temperatura entre as alturas de 12 e 18 cm para as posições radiais mais centrais do leito (Figuras 4.22a e 4.22b) e que na região da parede (Figura 4.22c) o comportamento é similar ao observado para leito de bagaço de cana (Figura 4.16c).

Assim, nota-se mais claramente que, de um modo geral, T_{avg} nos leitos recheados com meio composto também foi mais dependente da vazão de percolação que do comprimento do

leito, observando-se novamente tendência decrescente com o aumento da vazão de ar, como esperado, devido ao fato de a percolação de ar ser responsável pelo resfriamento do leito.

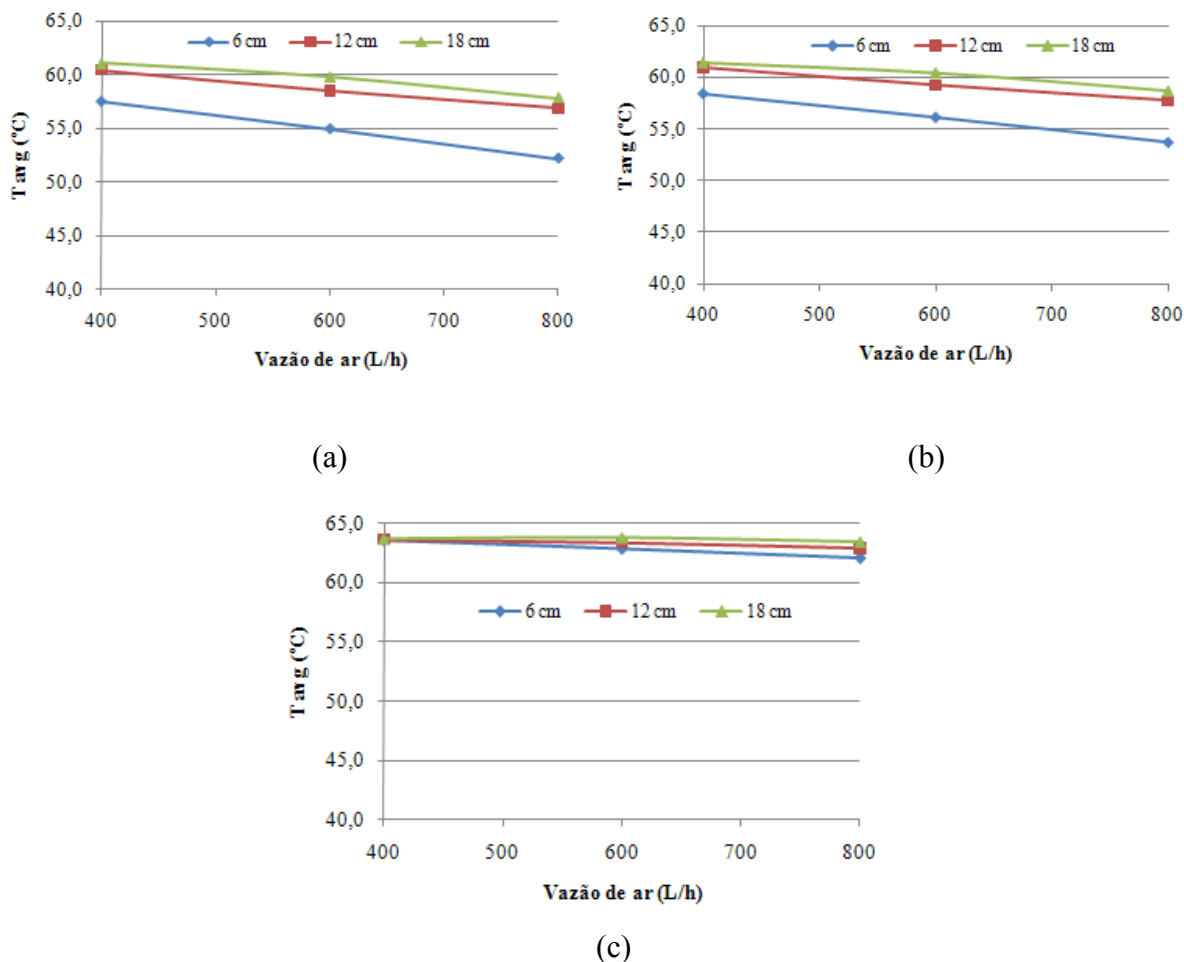


Figura 4.22: Temperatura média radial no topo do leito de meio composto em função da vazão de fluido percolante e calculada de diferentes maneiras: (a) integração até $r/R = 0,92$; (b) integração até $r/R = 1,00$ (parede); (c) integração de $r/R = 0,92$ até $1,00$ (parede).

Observa-se nas Figuras 4.22a e 4.22b que o comportamento dos dados de T_{avg} em função da vazão foi muito semelhante para as integrações do centro até $r/R = 0,92$ e do centro até a parede, sendo os valores obtidos da integração até a parede em média menos de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ maiores que os obtidos da integração até a posição radial do último sensor de temperatura, seguindo o comportamento já observado para o bagaço de cana.

Por outro lado, na Figura 4.22c, foi possível observar que, também no leito recheado com meio composto, os valores de T_{avg} na região da parede foram consideravelmente maiores que os valores de T_{avg} desde o centro até a parede do leito ou até o termopar mais externo, sendo em média $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ maiores que as temperaturas médias calculadas em toda a seção

transversal do leito, podendo essa diferença aproximar-se de 8 °C. Tal observação novamente denota que, também para leitos recheados com meio composto, a dinâmica da transferência de calor é diferenciada na região das proximidades da parede do leito.

No entanto, é possível observar-se que T_{avg} na região da parede para o bagaço de cana é praticamente igual à do meio composto, o que se refletirá no coeficiente U. Apesar de o meio composto contar com pequenas partículas e, visualmente, a porosidade nesta região ser menor do que para o bagaço de cana, a porosidade no leito como um todo e nesta região em particular ainda é muito elevada, de modo que o escoamento preferencial do ar por esta região é pouco perturbado pela presença destas pequenas partículas. Além disso, apesar de os perfis radiais de temperatura com o meio composto terem sido mais pronunciados, as temperaturas médias foram praticamente iguais para os dois recheios, de modo que o coeficiente U também pouco variou com o recheio. Novamente, infere-se que a presença das partículas pouco afetou a estrutura do leito, que fisicamente pouco variou para os dois recheios, como pode ser visto na Figura 4.19c, sendo a permeabilidade do meio ainda muito elevada para o meio composto.

Deste modo, pode-se dizer que de fato há dificuldade de remoção de calor nos reatores de FES em leito fixo, decorrendo tanto das propriedades do recheio quanto das condições operacionais tipicamente empregadas nestes processos. Infere-se, com base nos resultados obtidos para ambos os recheios estudados neste trabalho, que os meios porosos aplicados como substratos na FES de fato não são propícios à transferência de calor, uma vez que se constituem de materiais orgânicos de baixa condutividade térmica molecular. Ademais, as vazões empregadas nos reatores de FES são, na maioria das vezes, até inferiores às empregadas neste trabalho. Umsza Guez (2009) obteve seus melhores resultados de produção de enzimas pectinolíticas por FES em leito fixo empregando vazão de ar de 120 L/h; Milagres e colaboradores (2004) encontraram a vazão de ar de 48 L/h como ótima para produção de xilanase empregando bagaço de cana como substrato. Essas baixas vazões de escoamento do fluido percolante resultam em baixa taxa de troca térmica devida à contribuição dinâmica da transferência de calor nos leitos fixos percolados, o que leva a que os parâmetros de troca térmica de leitos fixos recheados com materiais aplicáveis como substratos em FES tenham valores que, via de regra, são muito baixos, refletindo uma troca de calor muito pobre nesses tipos de bioreatores.

4.3.3 Coeficiente global de transferência de calor U

Nas Figuras 4.23a a 4.23c, são apresentados os valores do coeficiente global U para leito recheado com meio composto, novamente calculados de três formas distintas: com base

na temperatura média radial integrada até $r/R = 0,92$, na temperatura integrada até $r/R = 1,00$ (parede) e na temperatura integrada desde $r/R = 0,92$ até $r/R = 1,00$ (parede), respectivamente. Similarmente ao que foi observado para leitos recheados com bagaço de cana, observa-se que este parâmetro apresentou tendência de queda com o aumento do comprimento para leitos recheados com meio composto, embora, para o meio composto, esta tendência seja mais definida.

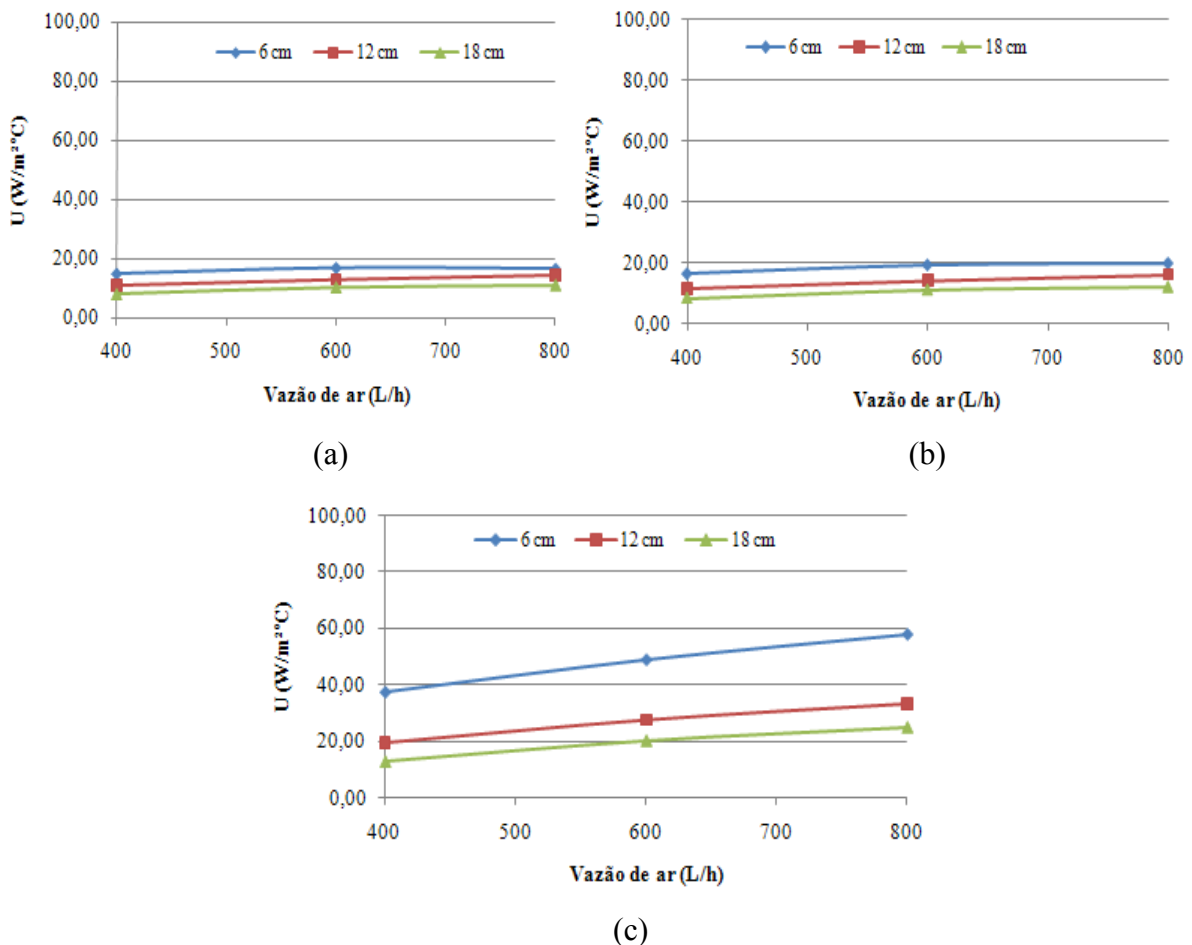


Figura 4.23: Coeficiente global U de leito de meio composto em função da vazão de ar e calculado com base em T_{avg} : (a) até $r/R = 0,92$; (b) até $r/R = 1,00$; (c) de $r/R = 0,92$ até $1,00$.

Na Tabela 4.8, são apresentados os dados de U do meio composto, calculados com base em T_{avg} do centro até a parede do leito, bem como os resultados da análise de variância. De acordo com a ANOVA, a vazão de ar e a altura do leito têm efeito significativo sobre U , ao nível de 5 % de significância. Nas Figuras 4.23a e 4.23b, se observa tendência linear crescente de U com o aumento da vazão de percolação, e nota-se que o efeito da contribuição

dinâmica foi mais intenso do que para o bagaço de cana; mas, ainda assim, pode-se dizer que U variou pouco em função da vazão.

Tabela 4.8: Coeficiente global U para meio composto e análise de variância ($\alpha = 5\%$).

Altura (cm)	Vazão (L/h)	U (r/R = 0,0 até 1,0)	
		1	2
6	400	17,66	15,74
	600	20,56	18,44
	800	21,53	18,58
12	400	11,94	11,42
	600	14,15	14,33
	800	14,99	17,49
18	400	8,20	8,60
	600	11,35	10,89
	800	12,24	11,95

Fonte de variação	Graus de liberdade	Estatística F	Valor P
Altura de leito	2	100,04	0,000 ** (p << $\alpha = 5\%$)
Vazão de ar	2	23,18	0,000 ** (p << $\alpha = 5\%$)
Erro	13		
Total	17		

Analogamente ao que foi observado para os dados de T_{avg} , nota-se nas Figuras 4.23a e 4.23b que os valores do U foram próximos para os cálculos com base em T_{avg} avaliada desde o centro até $r/R = 0,92$ e desde o centro até a parede, sendo os valores de U obtidos através da temperatura integrada até a parede em média cerca de $1,5 \text{ W/m}^2\text{C}$ maiores que os obtidos com base na temperatura integrada até a posição do sensor térmico mais externo. Convém ressaltar que, também para o leito recheado com meio composto, a diferença entre T_{avg} calculada até o sensor mais externo e até a parede foi tão maior quanto maior fosse a vazão de percolação de ar e menor o comprimento do leito, o mesmo valendo para o coeficiente U, o que leva a supor que novamente há uma troca de calor por mecanismo tipicamente convectivo mais intensa na região da parede que no interior desta matriz porosa.

De acordo com a Figura 4.23c, que apresenta o coeficiente U calculado com base na temperatura integrada especificamente na região da parede (desde $r/R = 0,92$ até 1,00), nota-

se que os valores dos coeficientes globais de troca térmica na região da parede foram muito superiores aos calculados para toda a seção transversal, sendo os valores de U nas proximidades da parede em média cerca de 2 vezes maiores que os valores de U calculados para toda a seção transversal do leito, sendo novamente essa diferença tão maior quanto maior a vazão de percolação de ar e menor o comprimento do leito. Este resultado denota novamente que a troca de calor por convecção foi de fato mais intensa na região da parede também para o recheio com meio composto.

Na Tabela 4.9, são apresentados os dados de U para leitos de bagaço de cana e meio composto com $L = 6$ cm, calculados com base em T_{avg} integrada de $r/R = 0,0$ até $1,0$ e de $r/R = 0,92$ até 1 , para comparação entre os recheios, juntamente com resultados da análise de variância.

Tabela 4.9: U de leitos recheados com bagaço de cana e meio composto ($L = 6$ cm) ($\alpha = 5\%$).

Altura (cm)	Vazão (L/h)	U (r/R = 0,0 até 1,0)				U (r/R = 0,92 até 1,0)			
		Bagaço de cana		Meio composto		Bagaço de cana		Meio composto	
		1	2	1	2	1	2	1	2
6	400	18,12	15,94	17,66	15,74	37,17	33,88	38,13	37,17
	600	22,11	21,07	20,56	18,44	50,51	49,49	49,49	48,52
	800	23,70	25,14	21,53	18,58	63,13	68,20	57,86	57,86
Fator	GL	F		Valor P		F		Valor P	
Recheio	1	5,96		0,041 **		1,67		0,233	
Vazão	2	11,73		0,004 **		71,15		0,000 ** (p << $\alpha = 5\%$)	
Erro	8								
Total	11								

Observa-se que, para U do centro até a parede, tanto a vazão quanto o tipo de recheio têm efeito significativo, ao nível de 5 % de significância, sobre o coeficiente global, sendo $U_{\text{meio composto}} < U_{\text{bagaço de cana}}$. Tal efeito decorre do fato de que as diferenças de temperatura para o bagaço de cana são menores do que as diferenças de temperatura para o meio composto; portanto, para representar uma troca de calor mais intensa, $U_{\text{meio composto}}$ deve ser menor que o $U_{\text{bagaço de cana}}$.

Por outro lado, para U calculado somente na região da parede, a análise de variância indicou que o tipo de recheio não interfere significativamente sobre o coeficiente global, de modo que $U_{\text{meio composto}} \approx U_{\text{bagaço de cana}}$, pois as temperaturas em $r/R = 0,92$ são praticamente iguais para os dois recheios. Por outro lado, a vazão de ar passa a interferir mais fortemente sobre U . Para as demais alturas de leito, os resultados da comparação foram os mesmos da altura 6 cm.

Apesar de os perfis radiais de temperatura terem sido um pouco mais pronunciados para leitos recheados com meio composto por bagaço de cana, bagaço de laranja e farelo de trigo nas condições estudadas neste trabalho, o emprego de U ainda pode ser aceitável para prever as quantidades globais de energia a serem adicionadas ou removidas do sistema durante a fermentação. Entretanto, para o leito com $L = 18$ cm e vazão de 800 L/h, a diferença de temperatura entre $r/R = 0,0$ e $r/R = 0,92$ foi de aproximadamente 10 °C, o que torna inconveniente a utilização do U , que assume ausência de perfil radial de temperatura. Além disso, não necessariamente o modelo unidimensional pode ser adequado para os cálculos de simulação dos processos fermentativos, uma vez que se pode ter um ponto de geração de calor no interior do leito, o que pode requerer o conhecimento de K_r e h_p para que se preveja a remoção de calor neste ponto de maior aquecimento.

4.3.4 Parâmetros térmicos do modelo bidimensional

Nas Figuras 4.24a a 4.24c, são apresentados, respectivamente, os valores dos parâmetros K_r , K_r/K_0 e h_p do modelo bidimensional em função da vazão de ar para leito fixo recheado com meio composto.

Conforme visto na Figura 4.24a, à exceção do comprimento 6 cm e vazão 400 L/h, a condutividade térmica efetiva radial no leito recheado com meio composto apresentou tendência decrescente com a altura de leito e crescente com a vazão de percolação. Do mesmo modo que para bagaço de cana, os valores de K_r foram muito baixos nas condições das baixas vazões de percolação empregadas, tendendo ao valor de K_0 encontrado neste mesmo trabalho como aproximadamente 0,06 W/m°C para leitos recheados com meio composto seco, empregando a técnica da sonda linear, na temperatura de 50 °C. A aproximação de K_r para K_0 é denotada na Figura 4.24b, particularmente para a menor vazão de ar e o maior comprimento do leito, em que K_r/K_0 foi aproximadamente igual a 1.

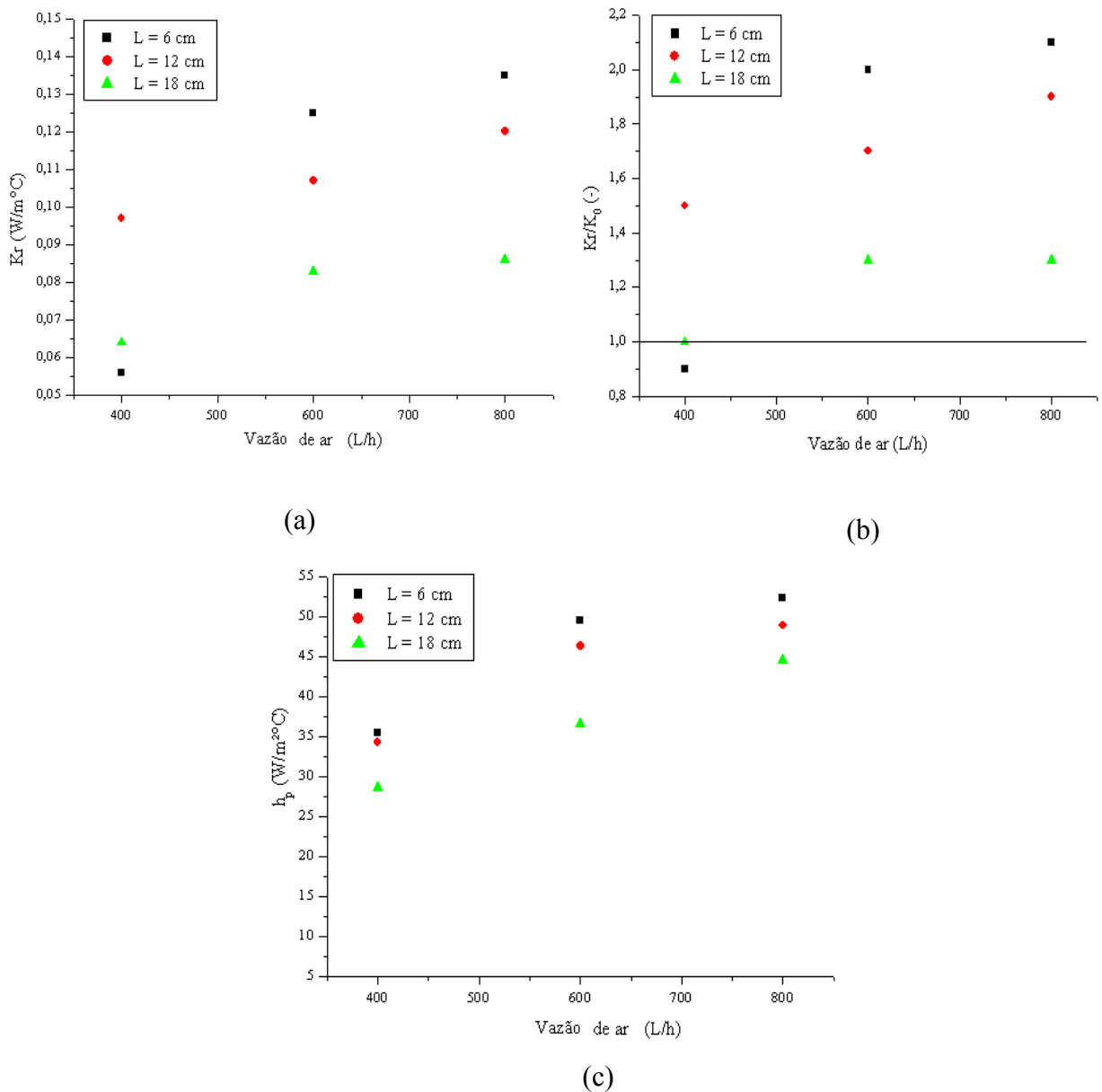


Figura 4.24: Parâmetros térmicos estimados pelo modelo bidimensional para leitos recheados com meio composto: a) K_r ; b) K_r/K_0 ; c) h_p .

Na Tabela 4.10, são apresentados valores de K_r para leitos de bagaço de cana e meio composto com $L = 6$ cm, para comparação da condutividade entre os recheios, onde constam também resultados da análise de variância. Como visto, as variáveis vazão de ar e tipo de recheio tiveram efeito significativo sobre K_r , ao nível de 5 % de significância. Como já indicado na Figura 4.24a, K_r tem tendência crescente em função da vazão de percolação. Além disso, a análise de variância permitiu verificar que K_r meio composto $<$ K_r bagaço de cana, pelo mesmo motivo que o coeficiente global U . Os perfis radiais de temperatura foram mais definidos para o meio composto, de modo que a diferença de temperatura entre $r/R = 0,0$ e

0,92 foi maior que para o bagaço de cana; portanto, para representar uma troca de calor mais intensa, K_r meio composto teve de ser menor que K_r bagaço de cana. Para as demais alturas de leito, os resultados da comparação foram similares aos da altura 6 cm.

Tabela 4.10: K_r de leitos recheados com bagaço de cana e meio composto ($L=6\text{cm}$) ($\alpha = 5\%$).

Vazão (L/h)	K_r (W/m ² °C)			
	Bagaço de cana		Meio composto	
	1	2	1	2
400	0,09	0,07	0,06	0,05
600	0,25	0,18	0,13	0,17
800	0,25	0,22	0,14	0,22

Fonte de variação	Graus de liberdade	Estatística F	Valor P
Vazão de ar	2	22,25	0,001 **
Recheio	1	6,99	0,03 **
Erro	8		
Total	11		

Quanto ao coeficiente convectivo de troca de calor parede-fluido, h_p , foram observados valores mais altos nas proximidades da entrada do leito. De um modo geral, os valores de h_p foram maiores para leitos recheados com meio composto que para os recheados apenas com bagaço de cana, o que se acredita ser decorrente das diferenças estruturais entre os dois leitos, ainda que o coeficiente U não tenha sofrido igual elevação. É possível supor que as partículas pequenas do farelo de trigo e do bagaço de laranja preencham os poros da estrutura fornecida pelo bagaço de cana, o que aumenta a condução de calor via partículas e, principalmente, aumenta a turbulência na região da parede, além da quebra da camada limite que tenderia a ser formar, fazendo com que o valor de h_p seja aumentado.

Também para o coeficiente h_p , foi observada tendência crescente em função da vazão de fluido percolante e decrescente em função da altura do leito, como se vê na Figura 4.24c. Os baixos valores de h_p reiteram a afirmação de que, mesmo para o meio composto, ainda existe uma resistência convectiva apreciável entre a parede do tubo e o contorno do meio poroso, conforme já discutido.

Novamente, quanto à aplicabilidade do modelo tradicional a dois parâmetros ao novo sistema estudado, tem-se situação semelhante ao observado para o leito recheado com bagaço

de cana. Também para o meio composto, as pequenas variações de temperatura no centro do leito prejudicaram a obtenção de K_r , enquanto a convergência dos perfis de temperatura na região da parede do leito prejudicou a obtenção de h_p . Na Tabela 4.11, são apresentados os valores dos parâmetros K_r e h_p com seus respectivos intervalos de confiança para o leito com $L = 6$ cm percolado pelas vazões de 400, 600 e 800 L/h. Entretanto, no caso dos leitos recheados com meio composto, observa-se que os intervalos de confiança de K_r foram nitidamente inferiores aos do bagaço de cana, o que indica que K_r foi mais bem estimado pelo modelo para o leito recheado com meio composto, tendo em vista que os perfis de temperatura no centro do leito foram mais pronunciados para o meio composto. Da mesma forma, embora ainda sejam amplos, os intervalos de confiança para o coeficiente convectivo h_p do leito recheado com meio composto foram mais estreitos que no caso do leito recheado apenas com o bagaço de cana. Portanto, tem-se que os parâmetros térmicos do modelo bidimensional foram mais bem estimados para os leitos recheados com meio composto que para os recheados apenas com bagaço de cana. Entretanto, sobretudo para o parâmetro convectivo, pode-se dizer que a estimativa ainda foi pouco satisfatória, tendo em vista que as margens de erro foram superiores a metade do valor estimado do parâmetro.

Tabela 4.11: Parâmetros K_r e h_p estimados e seus intervalos de confiança para leitos de meio composto ($L = 6$ cm).

Vazão (L/h)	K_r (W/m ² °C) (IC 95%)	h_p (W/m ² °C) (IC 95%)
400	0,06 (± 0,01)	35,39 (± 20,26)
600	0,13 (± 0,01)	49,57 (± 25,16)
800	0,14 (± 0,03)	52,25 (± 7,33)

4.4 Programa em MatLab para cálculo do coeficiente global de troca térmica U

O programa em linguagem MatLab para calcular o coeficiente global de troca térmica U para os leitos recheados com bagaço de cana e com meio composto, nas condições operacionais empregadas neste trabalho, facilitava e agilizava o cálculo do parâmetro, eliminando a necessidade da realização de cálculos por etapas, uma vez que era possível calcular U consecutivamente para diferentes condições operacionais dentro de uma mesma execução do programa.

No algoritmo elaborado, as variáveis T_0 , T_p , T_m , R , r , G , C_p , U , T_{avg} , L e z foram definidas como variáveis globais. O raio da célula de medidas (R), o vetor de posições radiais (r) e T_0 foram fixados pelo programador, uma vez que não representavam variáveis de

processo. Entretanto, T_0 foi vinculada às condições de vazão de duas possíveis formas: por meio da equação de ajuste (4.2), que fornece T_0 em função da vazão de ar e da temperatura de referência para condicionamento do ar percolante, ou por meio de uma estrutura *switch case*, como explicado adiante.

As variáveis de processo vazão de ar, altura do leito e número da repetição do experimento foram informadas pelo usuário por meio dos respectivos menus de opções, tal como apresentado nas Figura 4.25a a 4.25c, sendo claramente especificadas ao usuário as devidas unidades de cada variável de entrada.

Uma vez informadas as condições operacionais, o programa importava as temperaturas experimentais a partir de uma planilha do Microsoft Excel®, criada por uma rotina do *software LabView*, por meio do comando *xlsread*, armazenando-as no vetor [Tr].

A planilha de dados experimentais deveria necessariamente ser salva com o seguinte nome: Vazão_Altura_Repetição.xls; por exemplo, a planilha 400_6_1.xls deveria conter os dados experimentais referentes às condições operacionais de vazão de 400 L/h e altura de leito de 6 cm, devendo ser correspondente à primeira repetição do ensaio.

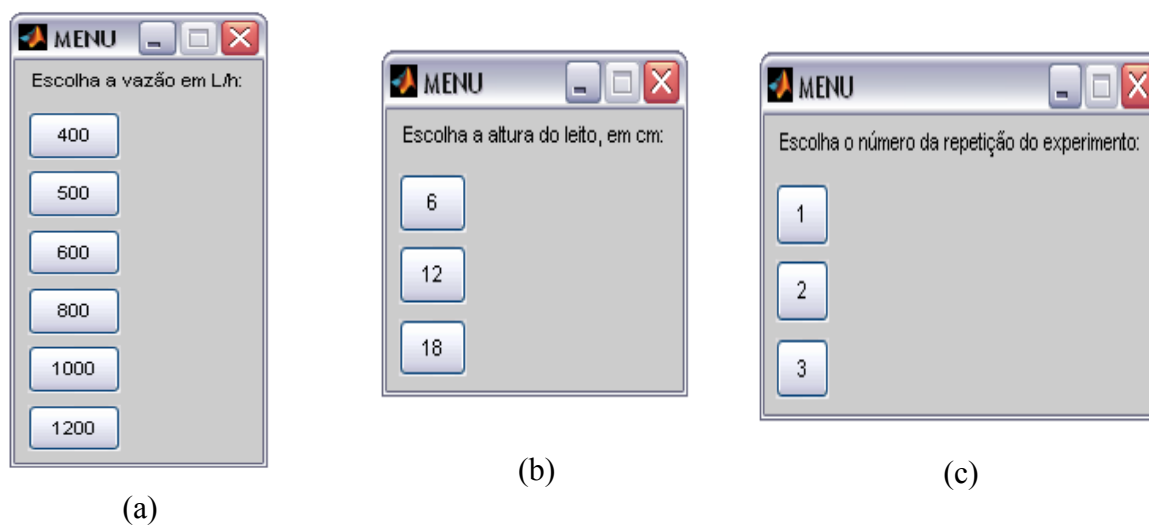


Figura 4.25: Menus de opções para entrada das variáveis operacionais:

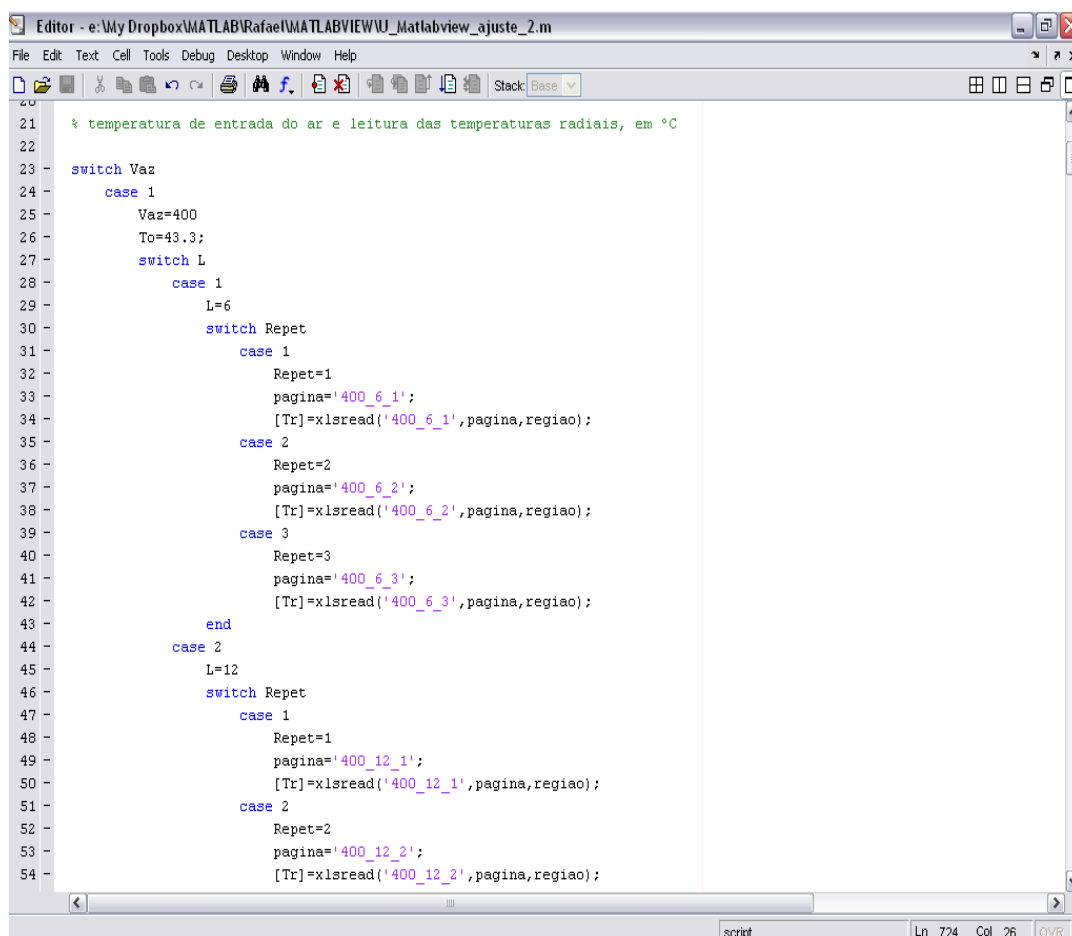
a) Vazão de ar; b) Altura do leito; c) Repetição do experimento.

Os vetores [r] e [Tr] eram de mesma dimensão, possuindo seis elementos. No vetor [r], os cinco primeiros elementos foram as posições radiais dos sensores, enquanto o sexto elemento foi o raio do tubo, sendo seus elementos fixados pelo programador. No vetor [Tr], os cinco primeiros elementos foram as temperaturas indicadas pelos sensores localizados no topo do leito de partículas nas respectivas posições radiais contidas no vetor [r], enquanto o

sexto elemento foi a temperatura da água da camisa de aquecimento do tubo, assumida como a temperatura da parede (T_p).

Na Figura 4.26, é apresentada uma parte da estrutura *switch case*, a qual permitia que o programa escolhesse o valor de T_0 conforme dados da Tabela 4.3 e selecionasse o arquivo para importação dos dados experimentais. Como se observa, foi criada uma cadeia de sentenças condicionais, com base na vazão de ar, altura de leito e repetição do experimento, cujas condições foram dadas pelas combinações das opções abertas nos respectivos menus de opções da Figura 4.25. Por exemplo, nas linhas 23 a 34, ficava definida uma condicional, da seguinte forma: caso a vazão fosse 400 L/h, T_0 receberia o valor de 43,3 °C, além de que, caso a altura de leito fosse 6 cm e a repetição do ensaio fosse a primeira, o programa importaria os dados de temperatura da página 400_6_1 do arquivo 400_6_1.xls.

Caso a opção fosse empregar a equação (4.2) para definição de T_0 , esta deveria ficar fora da estrutura *switch case*. A equação de ajuste deveria ser inserida após a entrada da vazão de ar, sendo necessário também solicitar que o usuário informasse a temperatura de referência para condicionamento do fluido percolante, para que T_0 ficasse definida.



```
21 % temperatura de entrada do ar e leitura das temperaturas radiais, em °C
22
23 switch Vaz
24     case 1
25         Vaz=400
26         To=43.3;
27         switch L
28             case 1
29                 L=6
30                 switch Repet
31                     case 1
32                         Repet=1
33                         pagina='400_6_1';
34                         [Tr]=xlsread('400_6_1',pagina,regiao);
35                     case 2
36                         Repet=2
37                         pagina='400_6_2';
38                         [Tr]=xlsread('400_6_2',pagina,regiao);
39                     case 3
40                         Repet=3
41                         pagina='400_6_3';
42                         [Tr]=xlsread('400_6_3',pagina,regiao);
43                 end
44             case 2
45                 L=12
46                 switch Repet
47                     case 1
48                         Repet=1
49                         pagina='400_12_1';
50                         [Tr]=xlsread('400_12_1',pagina,regiao);
51                     case 2
52                         Repet=2
53                         pagina='400_12_2';
54                         [Tr]=xlsread('400_12_2',pagina,regiao);
```

Figura 4.26: Estrutura *switch case* do programa para cálculo de U .

As propriedades físicas do ar necessárias para o cálculo do U foram seu calor específico (Cp) e sua densidade (dens). Estas foram ajustadas em função da temperatura, tomando por base dados tabelados disponíveis na literatura (PERRY et al., 2008), e foram inseridas no programa para serem calculadas com base numa temperatura média axial no leito (T_m), dada como a média aritmética entre T_0 , vinculada a cada condição operacional, e T_{avg} , que foi calculada conforme a equação (4.9a), enquanto T_m foi calculada pela equação (4.9b).

$$T_{avg} = \frac{2.A_{int}}{(R.100)^2} \quad (4.9a)$$

$$T_m = \frac{T_{avg} + T_0}{2} \quad (4.9b)$$

onde A_{int} é numericamente igual à área sob um gráfico de $r \times T(r).r$, sendo essa integração feita numericamente pela regra do trapézio, por meio da função trapz ($r, T(r).r$) no MatLab. Substituindo A_{int} na equação (4.9a), obtém-se a temperatura média no topo do leito, integrada radialmente em toda a seção transversal, e então T_{avg} foi usada no cálculo de T_m .

As equações (4.10a) e (4.10b) foram as equações obtidas por ajuste dos dados tabelados para o calor específico (Cp) e para a densidade (ρ_a) em função de T_m para cada condição operacional:

$$Cp = 1000 \times (-1 \times 10^{-14} T_m^5 + 7 \times 10^{-12} T_m^4 - 1 \times 10^{-9} T_m^3 + 4 \times 10^{-7} T_m^2 + 3 \times 10^{-5} T_m + 1.005) \quad (4.10a)$$

$$\rho_a = 367,7 \times (T_m + 273,15)^{-1,007} \quad (4.10b)$$

onde Cp é o calor específico do ar em J/kg°C e ρ_a é a densidade do ar em kg/m³.

A partir deste ponto, o cálculo do U podia ser realizado de duas maneiras diferentes. A primeira forma de cálculo, mais simples, consistia em empregar a equação (2.2) do capítulo *Revisão da Literatura* e substituir $z = L$ para cada altura de leito avaliada, de forma que U era calculado por substituição direta.

A outra forma de cálculo consistia em empregar a mesma equação (2.2), porém sem substituir z por L , sendo necessário definir a equação (2.2) numa função do MatLab, em que se inseriam também as seguintes condições térmicas, para cada altura de leito (L) avaliada:

$$\text{Em } z = 0, T = T_0 \quad (4.11a)$$

$$\text{Em } z = L/2, T = T_m = \frac{T_0 + T_{\text{avg}}}{2} \quad (4.11b)$$

$$\text{Em } z = L, T = T_{\text{avg}} \quad (4.11c)$$

Definida a função, o programa principal, ao ser executado, ajustava um valor ótimo de U que melhor satisfizesse a relação entre U , z e T experimentais, o que foi feito através dos comandos *optimset* e *lsqcurvefit*, que empregaram o método dos mínimos quadrados (MMQ) para busca do valor ótimo do parâmetro usando o algoritmo de Levenberg (1944) e Marquardt (1963).

Uma vez calculado U , por substituição ou por ajuste, seu valor era exibido na janela do programa. Em seguida, o usuário podia optar por realizar novo cálculo de U para o mesmo sistema, sendo necessário informar apenas os novos valores de vazão de ar, altura do leito e número da repetição do ensaio para que o programa importasse as novas temperaturas radiais da planilha de dados experimentais. O programa fornecia então um novo valor de U , referente ao atual conjunto de condições operacionais. Se o usuário optasse por não realizar novo cálculo, o programa informava que o cálculo fora encerrado, sendo finalizado com a exibição de um agradecimento ao usuário na tela do programa.

A execução do programa forneceu os resultados como visto nas Figuras 4.27a e 4.27b, sendo a primeira referente ao cálculo de U por substituição de $z = L$ e a segunda referente ao cálculo de U que fornecia o melhor ajuste de T_{avg} em função de z por meio dos comandos *optimset* e *lsqcurvefit*.

Os programas foram verificados com base nos dados experimentais obtidos neste trabalho. Foram comparados os valores de T_{avg} e U obtidos por cálculos através de planilhas e gráficos dos *softwares* comerciais Excel e Origin e os valores fornecidos pelos programas em MatLab. Para tanto, foi considerado o cálculo de T_{avg} por integração do centro até a parede dos leitos de bagaço de cana, para todas as combinações de altura de leito e vazão de ar.

Os resultados da verificação são apresentados na Tabela 4.12, donde se conclui que o programa do cálculo por substituição foi plenamente satisfatório, tendo em vista que as diferenças entre os resultados obtidos através dos cálculos convencionais e dos cálculos com o programa de substituição foram desprezíveis. O programa de cálculo por ajuste forneceu resultados sistematicamente menores para U , embora T_{avg} fosse a mesma. Mesmo assim, os resultados foram considerados válidos, uma vez que os resultados diferiram, em média, apenas 10 %. Deste modo, pode-se dizer que os comandos *optimset* e *lsqcurvefit* proporcionaram razoável ajuste de U para satisfazer a relação entre z e T_{avg} .

```

Command Window
CÁLCULO DO U - COEFICIENTE GLOBAL DE TROCA TÉRMICA EM LEITO FIXO

Vaz =

    1000

L =

    12

Repet =

    1

Tavg =

    58.6090

Coeficiente global de troca térmica U, em W/m²°C =:

U =

    21.7393

Deseja realizar novo cálculo de U para o mesmo sistema? Se sim, digite 1; se não, digite 0:0

O cálculo de U foi encerrado. Obrigado!
>>
    
```

(a)

```

Command Window
CÁLCULO DO U - COEFICIENTE GLOBAL DE TROCA TÉRMICA EM LEITO FIXO

Vaz =

    1000

L =

    12

Repet =

    1

Tavg =

    58.6090

Chute um valor inicial para U, em W/m²°C: 10

Iteration  Func-count  Residual  Step-size  Directional
           0         2      1607.4      3.66      -33.3      8.94202
           1         9      14.0475      2.95      -0.0734    1.07429
           2        15      3.86382      1.61     -2.44e-009  0.269026
           3        21      3.86237      1.01     -4.43e-015  0.103008
           4        22      3.86237      1.01     -4.43e-015  0.103008

Optimization terminated: directional derivative along
search direction less than TolFun and infinity-norm of
Coeficiente global de troca térmica U, em W/m²°C =:

U =

    18.8118

Deseja realizar novo cálculo de U para o mesmo sistema? Se sim, digite 1; se não, digite 0:0

O cálculo de U foi encerrado. Obrigado!
>>
    
```

(b)

Figura 4.27: Cálculo de U: a) por substituição direta; b) por ajuste.

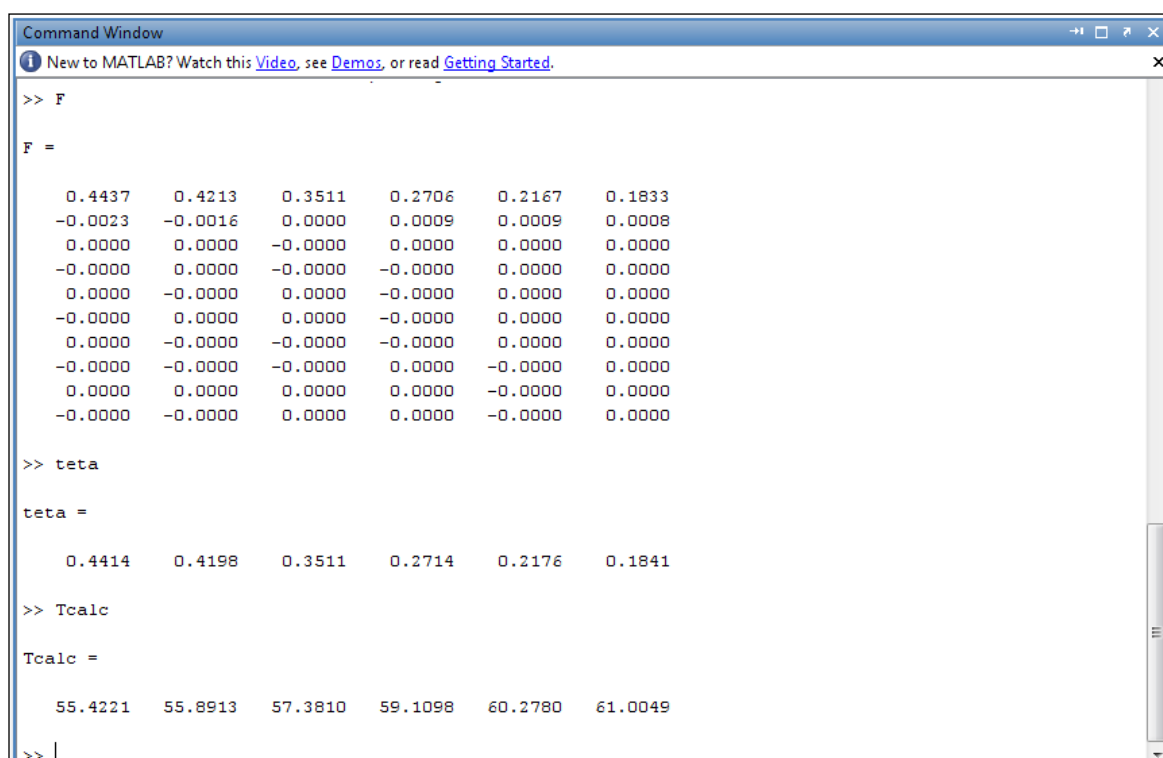
Tabela 4.12: Verificação do programa de cálculo do U em MatLab por substituição e ajuste.

Altura de Leito (cm)	Vazão (L/h)	T _{avg} (°C)		U (W/m ² °C)		
		Excel/Origin	MatLab	Excel	MatLab (subst.)	MatLab (ajuste)
6 cm	400	58,6	58,6	16,99	16,96	15,10
	500	57,9	57,8	19,63	19,56	17,74
	600	57,0	57,0	21,58	21,67	19,98
	800	55,4	55,3	24,41	24,26	23,05
	1000	54,0	54,0	26,84	26,77	25,88
	1200	53,4	53,4	30,35	30,21	29,43
12 cm	400	60,4	60,4	10,79	12,81	8,97
	500	59,3	59,2	11,71	11,66	10,13
	600	58,3	58,2	12,56	12,51	11,19
	800	56,0	55,9	13,10	13,02	12,23
	1000	54,8	54,7	14,65	14,63	13,97
	1200	54,1	54,0	16,38	16,30	15,73
18 cm	400	59,6	59,9	6,45	6,39	5,39
	500	59,5	59,8	8,06	7,85	6,65
	600	59,2	59,5	9,43	9,42	7,99
	800	57,9	58,2	10,98	11,35	9,87
	1000	57,2	57,4	12,93	13,56	11,91
	1200	55,8	56,1	13,34	13,59	12,33

4.5 Programa em MatLab para cálculo dos parâmetros térmicos do modelo bidimensional (K_r e h_p)

O programa em linguagem MatLab para calcular os parâmetros térmicos do modelo bidimensional da transferência de calor em leitos fixos percolados por ar facilitou e agilizou o cálculo dos parâmetros, sobretudo com respeito à entrada de dados experimentais e saída dos resultados calculados, uma vez que a importação e a exportação de dados é mais versátil na linguagem MatLab que na Fortran. Além disso, era possível calcular os parâmetros K_r e h_p consecutivamente para diferentes condições operacionais dentro de uma mesma execução do programa.

Na Figura 4.28, é mostrado um teste realizado para as seguintes condições: 10 termos da série, vazão de ar 400 L/h, altura do leito 6 cm e primeira execução do experimento. Nota-se que a matriz F possui 10 linhas (número de termos) e 6 colunas (elementos do vetor r). Teta (θ) é obtido pela soma dos valores de cada coluna por meio do comando *sum*, que realiza a soma dos elementos das linhas de cada coluna da matriz, de modo que é feita a soma dos n termos calculados da equação (2.4). Por fim, por meio da relação do adimensional teta com a temperatura, obtém-se a T_{calc} , que é a temperatura calculada empregando-se os parâmetros estimados do modelo.



```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> F
F =
    0.4437    0.4213    0.3511    0.2706    0.2167    0.1833
   -0.0023   -0.0016    0.0000    0.0009    0.0009    0.0008
    0.0000    0.0000   -0.0000    0.0000    0.0000    0.0000
   -0.0000    0.0000   -0.0000   -0.0000    0.0000    0.0000
    0.0000   -0.0000    0.0000   -0.0000    0.0000    0.0000
   -0.0000    0.0000    0.0000   -0.0000    0.0000    0.0000
    0.0000   -0.0000   -0.0000   -0.0000    0.0000    0.0000
   -0.0000   -0.0000   -0.0000    0.0000   -0.0000    0.0000
    0.0000    0.0000    0.0000    0.0000   -0.0000    0.0000
   -0.0000   -0.0000    0.0000    0.0000   -0.0000    0.0000

>> teta
teta =
    0.4414    0.4198    0.3511    0.2714    0.2176    0.1841

>> Tcalc
Tcalc =
    55.4221    55.8913    57.3810    59.1098    60.2780    61.0049

>>
```

Figura 4.28: Teste de execução do programa empregando a equação (2.4).

Um ponto relevante a ser observado é que, a partir da terceira linha da matriz F , os valores dos termos calculados são praticamente zero (da ordem de 10^{-21}). Logo, neste caso, apenas dois termos da série seriam suficientes para o cálculo, como comprovado por outro teste do programa. Nas mesmas condições de processo e mesmos valores iniciais dos parâmetros, seriam obtidos os mesmos resultados para os parâmetros estimados e para as respectivas temperaturas calculadas com a estimativa.

No início da execução do programa principal, além das condições operacionais, o usuário deveria informar o número de termos da série desejados para o cálculo e os valores

dos chutes iniciais dos parâmetros. A partir daí, o programa realizava os cálculos empregando a equação (2.4), qual seja:

$$\frac{T_p - T}{T_p - T_0} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 N_i J_0(\gamma_n r/R)}{[N_i^2 + \gamma_n^2] J_0(\gamma_n)} \exp\left[-\frac{K_r \gamma_n^2}{G C_p R^2} z\right] \quad (2.4)$$

onde as n raízes gama (γ) da equação transcendental fornecidas pelo programa estavam contidas no intervalo de busca de *fzero*, satisfazendo a equação transcendental (2.5):

$$N_i J_0(\gamma n) - \gamma n J_1(\gamma n) = 0 \quad (2.5)$$

Para encontrar as raízes da equação transcendental, o comando *fzero* buscava os zeros da função num determinado intervalo ou ponto próximo da raiz (i). O intervalo estipulado para a busca das raízes foi baseado nas raízes das funções de Bessel de 1ª espécie de ordens 0 e 1, as quais também foram calculadas por meio do comando *fzero* aplicado às funções J_0 e J_1 .

O programa foi verificado com base em dados experimentais obtidos neste trabalho para o leito recheado com bagaço de cana. Foram comparados os valores de K_r e h_p calculados com o programa em Fortran, já disponível, aos calculados com o programa em MatLab. Alguns resultados da verificação são apresentados na Tabela 4.13, onde se nota que o programa desenvolvido forneceu resultados próximos aos obtidos com o programa em Fortran. No entanto, há casos em que os resultados dependem fortemente do valor inicial dos parâmetros e do número de termos da série, o que indica que o programa pode requerer alguns ajustes para aprimoramento. Além disso, poderá ser necessário incluir passos no programa para que sejam buscados os mínimos globais, e não os mínimos locais, como normalmente é feito pelos comandos *optimset* e *lsqcurvefit*.

Tabela 4.13: Verificação do programa de cálculo de K_r e h_p .

Altura de Leito (cm)	Vazão (L/h)	K_r (W/m ² °C)		h_p (W/m ² °C)	
		Fortran	MatLab	Fortran	MatLab
6 cm	400	0,09	0,07	16,49	19,20
	800	0,25	0,22	46,22	43,96
	1000	0,23	0,30	53,95	53,78
12 cm	400	0,11	0,09	23,43	23,08
	800	0,13	0,13	24,47	23,95
	1000	0,13	0,13	29,20	26,25
18 cm	400	0,06	0,04	7,26	6,46
	800	0,07	0,05	10,74	8,07
	1000	0,08	0,10	12,34	12,33

4.6 Simulação do processo de FES para obtenção de enzimas pectinolíticas

Programas em linguagem MatLab foram desenvolvidos para simular a condição ótima do processo fermentativo de Umsza Guez (2009), que tinha como substrato o meio composto por bagaços de cana e laranja e farelo de trigo na proporção 1:2:2 (peso) e o fungo termofílico *Thermomucor indicae seudaticae* N-31 como agente fermentativo. Parâmetros físicos e térmicos experimentais obtidos neste trabalho para o leito recheado com o meio composto empregado por Umsza Guez (2009) foram empregados nos modelos. Características de crescimento do fungo *Thermomucor indicae seudaticae* N-31 foram extraídas da literatura (UMSZA GUEZ, 2009). Os resultados experimentais de distribuição de temperatura neste processo fermentativo, apresentados por Umsza Guez (2009) e por Laurentino (2007), foram úteis para verificação das simulações da transferência de calor no bioreator.

Num primeiro momento, foram desenvolvidos programas preliminares para reproduzir os resultados de Fanaei e Vaziri (2009) na simulação do processo fermentativo de farelo de trigo por *Aspergillus niger*. Os programas desenvolvidos permitiram reproduzir com fidelidade os resultados desses autores, indicando que a metodologia de programação empregada estava adequada. Neste contexto, os programas de simulação do processo fermentativo de Umsza Guez (2009) foram obtidos por adaptação dos programas preliminares, substituindo-se os valores das variáveis envolvidas.

Na Tabela 4.14, são apresentados os valores dos parâmetros usados no modelo cinético e nos modelos de transferência de calor a parâmetros concentrados, com dispersão axial e com dispersão axial e radial, considerando-se as condições ótimas do processo de

Umsza Guez (2009). Alguns parâmetros característicos do crescimento do fungo não foram encontrados na literatura; nestes casos, foram empregados dados disponíveis na literatura como aproximação.

Tabela 4.14: Parâmetros empregados nos modelos cinético e de transferência de calor.

Símbolo	Descrição	Valor	Fonte
s	Sensibilidade da taxa de crescimento específico a aumentos da temperatura (--)	6,275	Sangsurasak e Mitchell (1998)
$T_{máx}$	Temperatura máxima para crescimento (°C)	55	Umsza Guez (2009)
T_{opt}	Temperatura ótima para crescimento (°C)	45	
X_0	Concentração de biomassa (kg biomassa/ kg substrato)	0,0071	
X_m	Concentração máxima possível de biomassa (kg biomassa/ kg substrato)	0,22	
μ	Taxa de crescimento específico (1/h)	Eq. (2.13a)	Fanaei e Vaziri (2009)
μ_{opt}	Taxa de crescimento específico ótima (1/h)	0,350	Rodrigues e Sant'anna (2001)
C_{pb}	Calor específico do leite (J/ kg °C)	1831	Este trabalho (item 3.6.3)
C_{pa}	Calor específico do ar úmido (J/ kg °C)	1007	Perry e colaboradores (2008)
f	Capacidade do ar de carregar água (kg água/kg ar °C)	0,003	
k_a	Condutividade térmica do ar úmido (W/m°C)	0,0274	
$K_b = K_0$	Condutividade térmica efetiva do leite na estagnação (W/m°C)	Eq. (4.1) A= 15,65 B = 28,29 C = 0,52	Este trabalho
K_r	Condutividade térmica efetiva radial do leite percolado por ar (W/m°C)	Figura 4.24a	Este trabalho
h_p	Coefficiente convectivo de transferência de calor parede-fluido (W/m ² °C)	Figura 4.24c	
T	Temperatura no leite (°C)	$T_0 = 45$	Umsza Guez (2009)
T_a	Temperatura do ar percolante (°C)	45	
V_z	Velocidade superficial do ar úmido (m/h)	31,18	
Y_Q	Coefficiente de conversão de calor metabólico a células (J/ kg biomassa)	$8,366 \times 10^6$	Saucedo-Castañeda e colaboradores (1990)
L	Altura do leite (m)	0,4	Umsza Guez (2009)
R	Raio do leite (m)	0,035	
ε	Porosidade do leite (--)	0,67	Este trabalho (Tabela 4.6)
λ	Calor latente de vaporização da água (J/ kg)	188.430	Perry e colaboradores (2008)
ρ_a	Densidade do ar úmido (kg/m ³)	1,118	
ρ_b	Densidade do leite (kg/m ³)	350	Este trabalho (Tabela 4.6)
ρ_s	Densidade do substrato sólido (kg/m ³)	1040	

Foram desenvolvidos programas para simular o crescimento do microrganismo e a distribuição de temperaturas no interior do leito. Para simulação da cinética de crescimento, foi empregada a equação logística clássica, representada pela equação (2.13) do capítulo *Revisão da Literatura*, qual seja:

$$\frac{dX}{dt} = \mu X \left(1 - \frac{X}{X_m} \right) \quad (2.13)$$

Para o balanço de energia no bioreator, foram empregadas três formas de modelagem. O primeiro balanço térmico, mais simples, empregou o modelo a parâmetros concentrados de Fanaei e Vaziri (2009), que assume variação da temperatura com o tempo e a diferença de temperatura entre a entrada e a saída do leito, qual seja:

$$\rho_b C_{pb} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \rho_s (1 - \varepsilon) Y \frac{\partial X}{\partial t} + \rho_a C_{pa} \frac{V_z}{Z} (T_a - T) + \rho_a f \lambda \frac{V_z}{Z} (T_a - T) \quad (2.14b)$$

O segundo balanço de energia empregou o modelo com dispersão axial de calor, também proposto por Fanaei e Vaziri (2009), que assumia variação da temperatura com o tempo de processo e também variação da temperatura com a posição axial no leito, qual seja:

$$\rho_b C_{pb} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = \rho_s (1 - \varepsilon) Y \frac{\partial X}{\partial t} - \rho_a C_{pa} V_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho_a f \lambda V_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) + K_b \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.14a)$$

Por fim, o terceiro balanço, mais completo, empregou o modelo com dispersão radial e axial de calor, com variação de temperatura em função do tempo e das posições radial e axial no leito, proposto por Sangsurasak e Mitchell (1998) e representado na equação (2.12) do capítulo *Revisão da Literatura*, qual seja:

$$\rho_b C_{pb} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + \rho_a (C_{pa} + f \lambda) V_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) = \left[\frac{K_b}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + K_b \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \right] + K_b \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \rho_s (1 - \varepsilon) Y \frac{\partial X}{\partial t} \quad (2.12)$$

No primeiro programa de simulação desenvolvido para o processo de Umsza Guez (2009), foram empregados o modelo logístico da cinética de crescimento da biomassa

microbiana ao longo do tempo de fermentação e o modelo de transferência de calor a parâmetros concentrados de Fanaei e Vaziri (2009) da distribuição de temperaturas no interior do leito ao longo do processo.

De acordo com a modelagem proposta, o crescimento da biomassa ocorre segundo a equação logística apresentada na equação (2.13). O modelo de transferência de calor a parâmetros concentrados foi representado pela equação (2.14b).

Neste contexto, esse primeiro programa de simulação tinha como objetivo integrar numericamente as expressões para a variação da biomassa com o tempo e para o perfil de temperaturas ao longo do processo. Para tanto, foram criados dois programas: o primeiro contendo as funções a serem integradas (denominado Função), e o segundo contendo o programa principal a ser executado pelo MatLab (denominado Programa Principal). Em ambos os programas, algumas variáveis foram declaradas como globais, de modo que a função pudesse reconhecer variáveis declaradas no programa principal e vice-versa.

Na Função, que continha as equações de variação da concentração de biomassa (X) e da temperatura (T) no leito em função do tempo de processo, foi declarado um vetor dy , que recebia a função *ssblumpfun*, na qual y dependia apenas do tempo. A variável y , por sua vez, foi definida como um vetor com dois elementos, os quais representavam a biomassa e a temperatura. As equações de variação da biomassa e da temperatura com o tempo, dX e dT , respectivamente, foram armazenadas no vetor dy .

No programa principal, *ssblump*, foi feita a inicialização de todas as variáveis e parâmetros físicos e térmicos e de crescimento do microrganismo para o bioreator modelado. Em seguida, foi criado um vetor de condições iniciais y_0 , que continha a concentração inicial de biomassa (X_0) e a temperatura inicial no bioreator (T_0), para que o programa pudesse fazer a integração numérica das equações diferenciais ordinárias declaradas na função. Por fim, foi definido o intervalo de tempo de integração desejado, e as funções foram integradas por meio da função *ode45*, que emprega o método de Runge-Kutta de quarta ordem com tamanho de passo variável, definido pelo próprio programa através da função *ode45*. A sintaxe da integração foi dada pela seguinte expressão:

$$[t,y] = \text{ode45}('ssblumpfun',tspan,y_0) \quad (4.12)$$

onde $[t,y]$ representa a função integrada, sendo t a variável independente e y a variável dependente; *ode45* é a função de integração numérica empregada; *ssblumpfun* é o nome da função a ser integrada, conforme declarado no programa auxiliar de definição da função;

$tspan$ é o intervalo de integração no tempo; e y_0 é o vetor de condições iniciais para cada elemento do vetor y , ou seja, $y_0 = [X_0 T_0]$.

Em seguida, as curvas de biomassa e de temperatura no leito foram plotadas em função do tempo por meio do comando *plot*, que forneceu gráficos bidimensionais. Cada curva foi mostrada em uma janela própria, definida pelo comando *figure*. A sintaxe para exibição das curvas foi feita da seguinte forma:

$$figure(1); plot(t,y(:,1)) \quad (4.13)$$

onde o comando *figure* fixa a janela de exibição da curva; e o comando *plot* correlaciona os valores de t aos valores de $y(:,1)$, que representa os valores da biomassa microbiana, uma vez que se havia definido que $X=y(1)$.

Na Figura 4.29, é apresentada a curva prevista de variação da concentração de biomassa fúngica no leito em função do tempo. Observa-se que a curva aqui obtida para o crescimento do fungo *Thermomucor indicae seudaticae* N-31 em meio composto por bagaços de cana e laranja e farelo de trigo tem elevação muito diferente da curva de crescimento do *Aspergillus niger* em farelo de trigo, encontrada por Fanaei e Vaziri (2009), o que provavelmente se deve à diferença da taxa de crescimento e do comportamento térmico de ambos os fungos, uma vez que o *Thermomucor* é termofílico e o *Aspergillus* é mesofílico. Além disso, de acordo com Umsza Guez (2009), o fungo *Thermomucor* apresentava produção enzimática ótima em 24 horas de processo. Sendo assim, a atividade enzimática ótima era obtida antes que se atingisse a máxima concentração de biomassa possível no leito.

Na Figura 4.30, é apresentada a curva prevista de variação da temperatura na saída do reator em função do tempo, de acordo com o modelo a parâmetros concentrados. Tal curva também apresenta comportamento bem diferente da obtida por Fanaei e Vaziri (2009). De acordo com os resultados da simulação, a elevação de temperatura para o processo com o fungo termofílico é muito rápida, e as altas temperaturas se mantêm no leito durante todo o restante do processo fermentativo. No entanto, o pico máximo de temperatura encontra-se a menos de 10 °C acima da temperatura ótima de crescimento, sendo ainda inferior à temperatura máxima tolerada pelo microrganismo, o que, de certo modo, facilita o controle do processo, devido ao menor risco de morte por superaquecimento no reator.

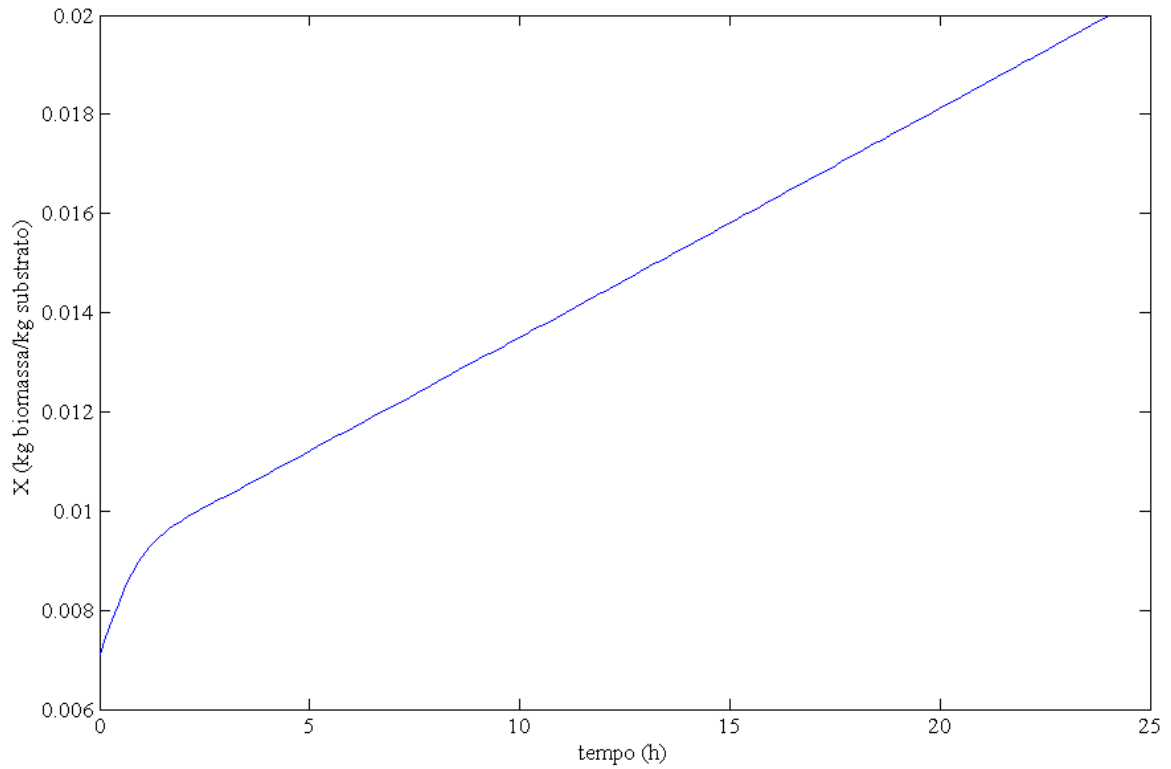


Figura 4.29: Variação da concentração de biomassa com o tempo para o processo fermentativo de Umsza Guez (2009).

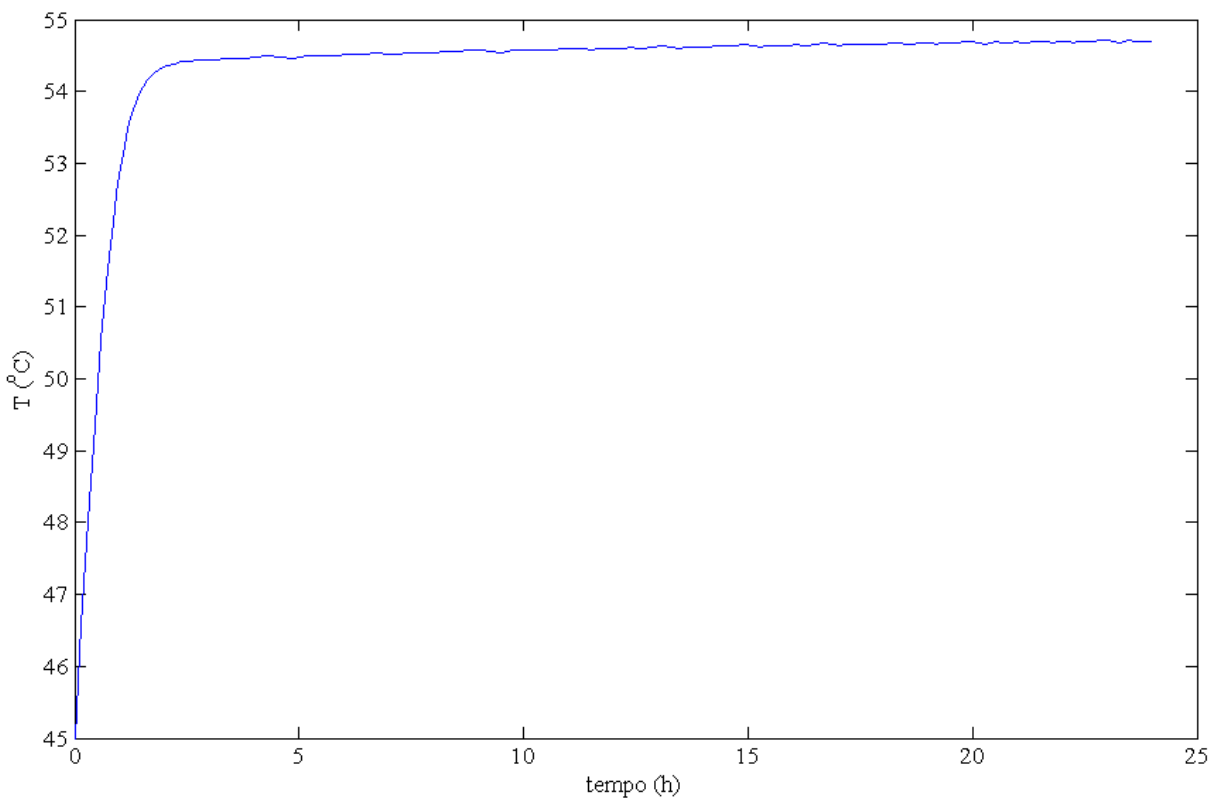


Figura 4.30: Temperatura na saída do bioreator de Umsza Guez (2009) prevista pelo modelo a parâmetros concentrados.

O segundo programa de simulação desenvolvido foi muito semelhante ao primeiro, com diferença na expressão do modelo de distribuição de temperaturas, que levava em conta variação com a posição axial dentro do leito. Portanto, o modelo para a variação da biomassa mantém-se inalterado, enquanto que o modelo da variação da temperatura foi similar ao visto na equação (2.12), sendo desprezados apenas os termos de dispersão térmica radial.

Do mesmo modo como descrito anteriormente, foram criados dois programas: um de declaração da função e outro contendo o programa principal. No arquivo da função, novamente foi declarado um vetor dy , que recebia a função *ssbdistfun*. Entretanto, neste programa, tinha-se variação da temperatura com duas variáveis: tempo e posição axial. Porém, como a função *ode45* é específica para solução de equações diferenciais ordinárias, foi necessário empregar um método de discretização de variáveis. Neste caso, seguindo o exemplo de Fanaei e Vaziri (2009), a variável posição axial (z) foi discretizada no modelo pelo método de diferenças finitas usando a aproximação pela diferença central. Assim, a equação diferencial parcial, dada na equação (4.14), foi discretizada e convertida num conjunto de equações diferenciais ordinárias, como visto na equação (4.15), de modo que foram obtidas equações diferenciais integrais pela função *ode45*.

$$\rho_b C_{pb} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) + \rho_a (C_{pa} + f\lambda) V_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) = K_b \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \rho_s (1 - \varepsilon) Y \frac{\partial X}{\partial t} \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT}{dt}^{(i)} = & \frac{\rho_s (1 - \varepsilon) Y}{\rho_b C_{pb}} \mu X \left(1 - \left(\frac{X}{X_m} \right) \right) - \frac{1}{2h} \frac{\rho_a C_{pa} V_z}{\rho_b C_{pb}} (T_{(i+1)} - T_{(i-1)}) \dots \\ & - \frac{1}{2h} \frac{\rho_a f \lambda \lambda_z}{\rho_b C_{pb}} (T_{(i+1)} - T_{(i-1)}) + \frac{1}{h^2} \frac{K_b}{\rho_b C_{pb}} (T_{(i+1)} - 2T_{(i)} + T_{(i-1)}) \end{aligned} \quad (4.15)$$

onde h é a altura do tamanho do passo da variável z ; $i = 2, 3, \dots, n$; e n é o número de grades de espaços iguais, ou seja, o número de divisões na direção axial do leito.

A equação (4.15) foi então inserida no programa de descrição da função por meio de uma estrutura de repetição *for end* para o índice i variando de 2 até n . No mesmo arquivo, foi mantida a equação do modelo de variação da biomassa, com y passando a ser uma variável matricial, que armazenava dT e dX em suas linhas e colunas, uma vez que a temperatura variava com o tempo e o espaço. As condições de contorno no espaço foram inseridas no programa de declaração da função, tendo-se empregado as condições de perfil plano de temperatura na entrada do leito (em $z = 0$, $T = T_a$, implementada no programa como $T_{(1)} = T_a$,

antes de o programa entrar na estrutura de repetição) e variação nula de temperatura no topo do leito (em $z = L$, $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$, implementada no programa como $T_{(n+1)} = T_{(n)}$, depois de o programa ter saído da estrutura de repetição).

No programa principal, *ssbdist*, novamente foi feita a inicialização de todos os parâmetros fixados e calculados do bioreator de Umsza Guez (2009). Em seguida, foi criada uma matriz de condições iniciais y_0 para que o programa pudesse fazer a integração numérica das equações diferenciais ordinárias declaradas no arquivo de funções. Por fim, foi definido o intervalo de tempo de integração desejado, e as funções eram integradas por meio da função *ode45*. Cada uma das equações $\frac{dT}{dt}$ ⁽ⁱ⁾ foi integrada individualmente no tempo pela *ode45*. A sintaxe de integração foi a mesma do programa anterior, dada na equação (4.12), diferindo apenas o nome da função e o fato de agora se ter uma matriz de condições iniciais e uma matriz de dados simulados, e não mais vetores.

Em seguida, a curva de concentração de biomassa no leito podia ser plotada em função do tempo da mesma forma que no programa anterior, bem como a temperatura para uma posição axial específica, sendo necessário apenas que a posição axial desejada fosse especificada no comando *plot*. Por exemplo, o comando *plot(t,T(:,10))* plotava a temperatura no topo do leito em função do tempo. Para exibir a superfície de temperatura em função do tempo e da posição axial, foi usado o comando *mesh*, cuja sintaxe foi *mesh(z,t,T)* para que a superfície de temperaturas fosse plotada em função de z e t .

Os dados de temperaturas no topo do leito em função do tempo simulados pelo programa empregando o modelo com dispersão axial são apresentados na Figura 4.31. Comparando-se a curva da Figura 4.31 aos dados experimentais de Umsza Guez (2009), apresentados na Figura 2.4d, nota-se que as temperaturas simuladas foram sempre maiores que as experimentais, o que provavelmente seja devido à carência de informações sobre a cinética de crescimento do fungo *Thermomucor indicae seudaticae* N-31.

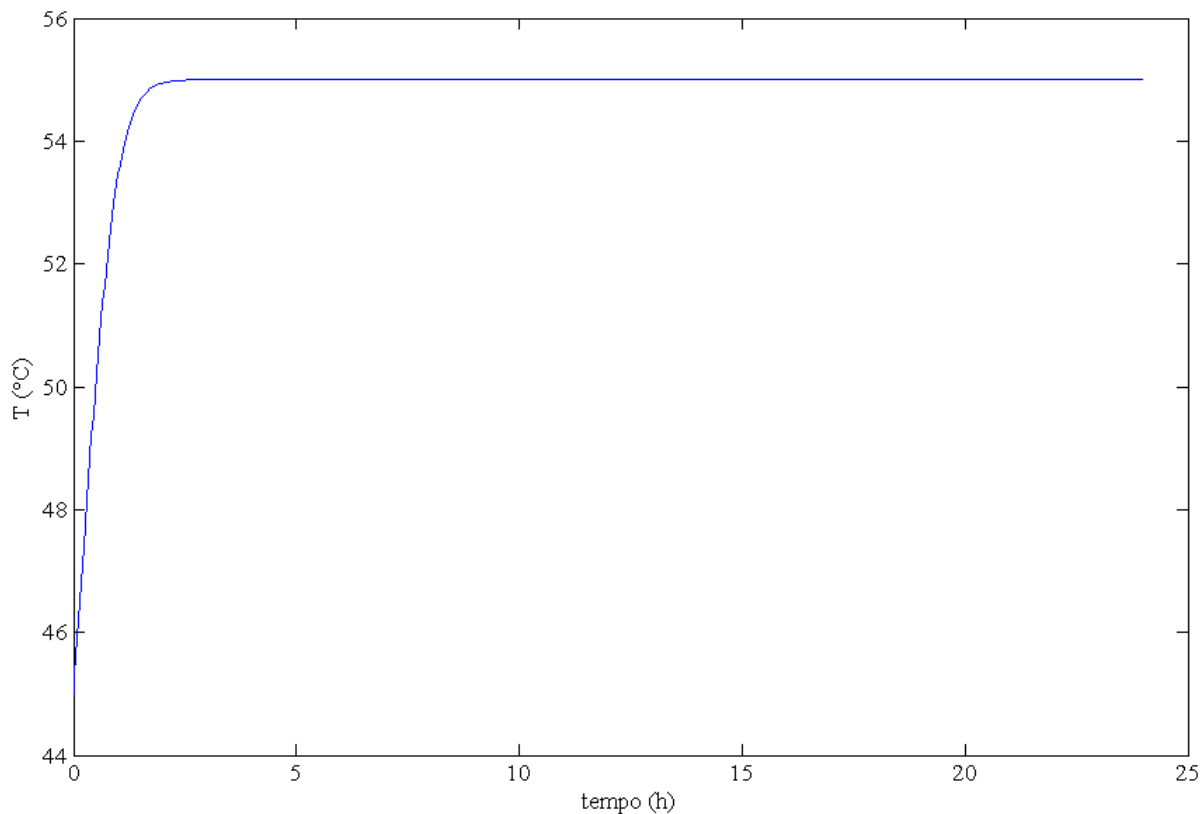


Figura 4.31: Temperatura na saída do bioreator de Umsza Guez (2009) prevista pelo modelo com dispersão axial.

Na Figura 4.32, encontra-se a superfície de temperatura em função do tempo e da posição axial no leito, obtida pelo programa de simulação aqui desenvolvido. Nota-se novamente que a temperatura se eleva bruscamente logo no início do processo, e se mantém num patamar em torno de 55 °C durante todo o tempo restante da fermentação. Observa-se ainda que a temperatura se eleva de 45 °C até aproximadamente 55 °C já nos primeiros 10 cm de comprimento do bioreator, mantendo-se elevada nos módulos superiores. Novamente, o comportamento térmico previsto para esse reator foi bastante diferente da previsão de Fanaei e Vaziri (2009) para o reator por eles simulado. Por outro lado, a tendência de distribuição de temperatura em função do tempo apresenta-se similar ao perfil térmico experimental do processo aqui simulado (vide Figura 2.4d), que também indica elevação rápida da temperatura, seguida de manutenção das temperaturas no leito nesse patamar mais elevado. Porém, o pico de temperatura simulado é mais elevado que o pico experimental.

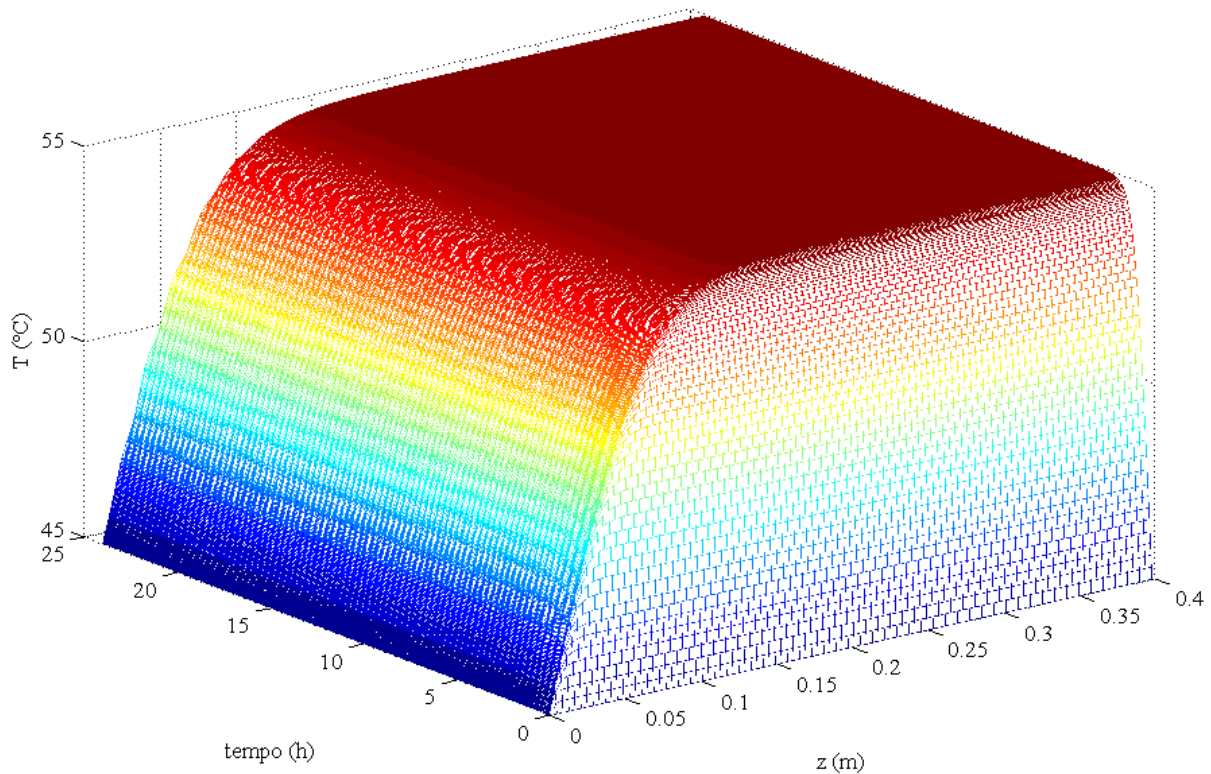


Figura 4.32: Superfície de temperatura em função do tempo e da posição axial para o processo de Umsza Guez (2009) pelo modelo com dispersão axial.

Por fim, foi desenvolvido um terceiro programa para simulação da distribuição de temperaturas no processo de Umsza Guez (2009), o qual empregava a equação (2.12) completa, considerando que a temperatura poderia variar em função do tempo e das posições axial e radial dentro do leito. O modelo para a variação da concentração de biomassa microbiana no leito novamente manteve-se inalterado, sendo ainda representado pela equação logística.

Neste caso, não foi criada uma função, tendo-se trabalhado apenas com o programa principal. Como se tinha variação da temperatura com três variáveis (tempo, posição axial e posição radial), não foi possível empregar a função *ode45*, uma vez que a *ode45* é específica para solução de equações diferenciais ordinárias, e não parciais. Portanto, foi necessário empregar um método de discretização de variáveis para as três variáveis envolvidas, empregando-se o método de diferenças finitas usando a aproximação pela diferença central, conforme descrito anteriormente.

As expressões para as três variáveis discretizadas foram então inseridas no programa por meio de uma estrutura de repetição *for end*. No mesmo arquivo, foi mantida a equação do modelo de variação da biomassa, com y passando a ser uma variável matricial, que

armazenava dT e dX em suas linhas e colunas, uma vez que a temperatura variava com o tempo e duas dimensões no espaço. Novamente, as condições de contorno já adotadas para a direção axial foram inseridas no programa ($z = 0, T = T_a$ e $z = L, \frac{\partial T}{\partial z} = 0$). As condições de contorno para a direção radial agora também foram inseridas no programa, tendo-se empregado as condições de simetria cilíndrica do perfil de temperatura (em $r = 0, \frac{\partial T}{\partial r} = 0$, implementada no programa como $T_{(i,1)} = T_{(i,2)}$, antes de o programa entrar na estrutura de repetição para a variável r) e troca de calor por convecção na parede (em $r = R, -K_r \frac{\partial T}{\partial r} = h_p (T_p - T_R)$), implementada no programa depois da saída da estrutura de repetição da coordenada radial da seguinte forma:

$$T(:, m) = \frac{1}{\left(1 - \frac{h_p h_r}{K_r}\right) \left(T(:, m-1) - \frac{h_p h_r}{K_r} T_p\right)} \quad (4.16)$$

onde h_r é o tamanho do passo da variável r ; $j = 2, 3, \dots, m$; e m é o número de grades de espaços iguais, ou seja, o número de divisões na direção radial do leito.

Além disso, foi feita a inicialização dos parâmetros fixados e calculados do bioreator modelado, e novamente foi criada a matriz de condições iniciais y_0 . Executando o programa, a curva de concentração de biomassa no leito podia ser traçada em função do tempo, da mesma forma que nos programas anteriores, e os resultados foram idênticos. A superfície de temperaturas em função de r e z para um tempo específico podia ser obtida por meio do comando *mesh*, cuja sintaxe foi *mesh(z,r,T)*, para cada tempo desejado.

Nas Figuras 4.33a a 4.33c, são apresentadas as superfícies de temperatura no início do processo, na metade do tempo total e no final do processo fermentativo. Nota-se que os perfis previstos seguem a mesma tendência observada para os demais modelos, concordando também com os perfis experimentais de Umsza Guez (2009).

No início do processo (Figura 4.33a), a temperatura prevista em todos os pontos no interior do leito é em torno de 45 °C, o que está de acordo com as condições experimentais do processo fermentativo simulado. Após 12 horas de fermentação, que corresponde à metade do tempo total do processo (Figura 4.33b), as temperaturas previstas em todos os pontos do interior do leito são aproximadamente iguais ou superiores a 45 °C, o que se justifica pela geração de calor metabólico pelo fungo no interior do bioreator. No final do processo

fermentativo (Figura 4.33c), as temperaturas simuladas permaneceram em torno de 55 °C no topo do bioreator, chegando a 57 °C na parede do leito.

A variação da temperatura na direção axial mostrou-se expressiva, sendo menos pronunciada na direção radial. Na direção radial, observa-se elevação da temperatura somente na região de contorno do leito, isto é, nas proximidades da parede do reator, o que também foi reportado no trabalho experimental de Umsza Guez (2009). Ressalta-se que, ao contrário da simulação de Fanaei e Vaziri (2009), uma vez que as temperaturas tenham aumentado, o bioreator permanece praticamente estável no patamar de temperatura atingido, não havendo resfriamento nem superaquecimento, conforme já havia sido observado experimentalmente por Umsza Guez (2009).

De maneira geral, os três programas de simulação previram picos de temperatura sempre superiores aos resultados experimentais apresentados por Umsza Guez (2009), sendo que os picos simulados foram de 55 °C, enquanto que os experimentais foram de aproximadamente 50 °C. Entretanto, os perfis de distribuição de temperaturas experimentais e simulados foram similares para as três modelagens empregadas. Deste modo, acredita-se que os programas foram adequados, mas não forneceram resultados tão próximos dos experimentais devido à escassez de informações a respeito do crescimento do fungo e consequentemente da geração de calor metabólico.

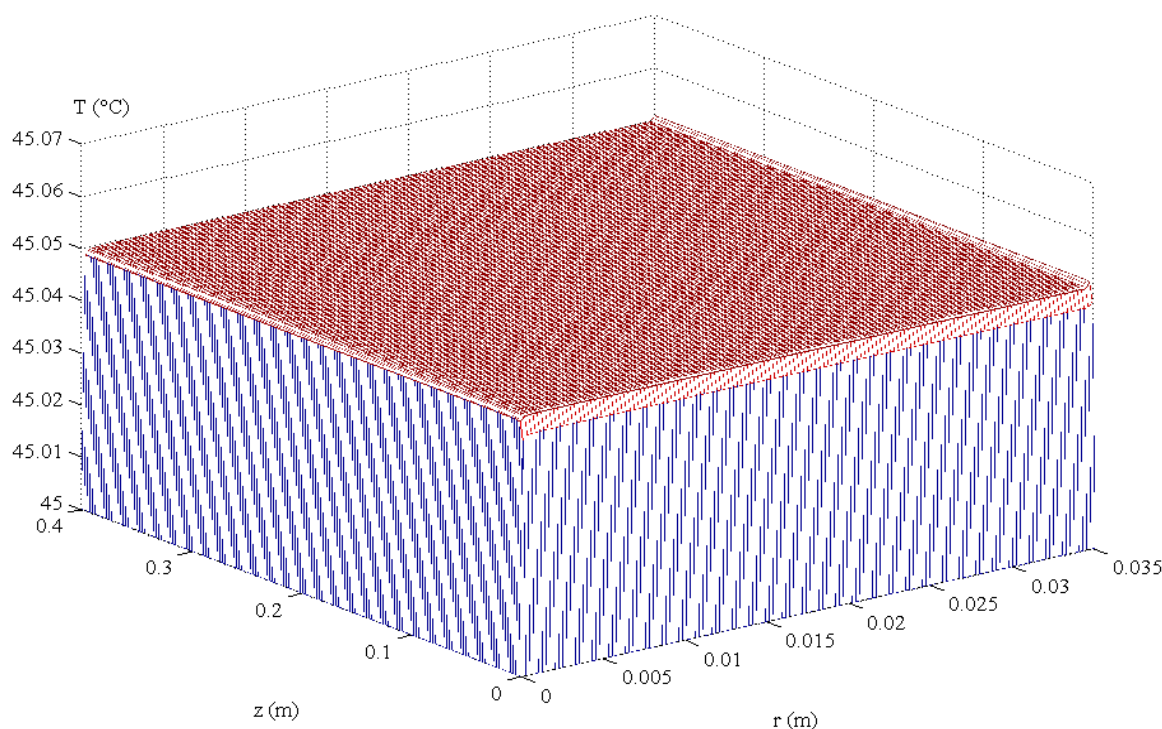


Figura 4.33a: Superfície de temperatura em função das posições axial e radial no bioreator de Umsza Guez (2009) no início do processo ($t = 0$ horas).

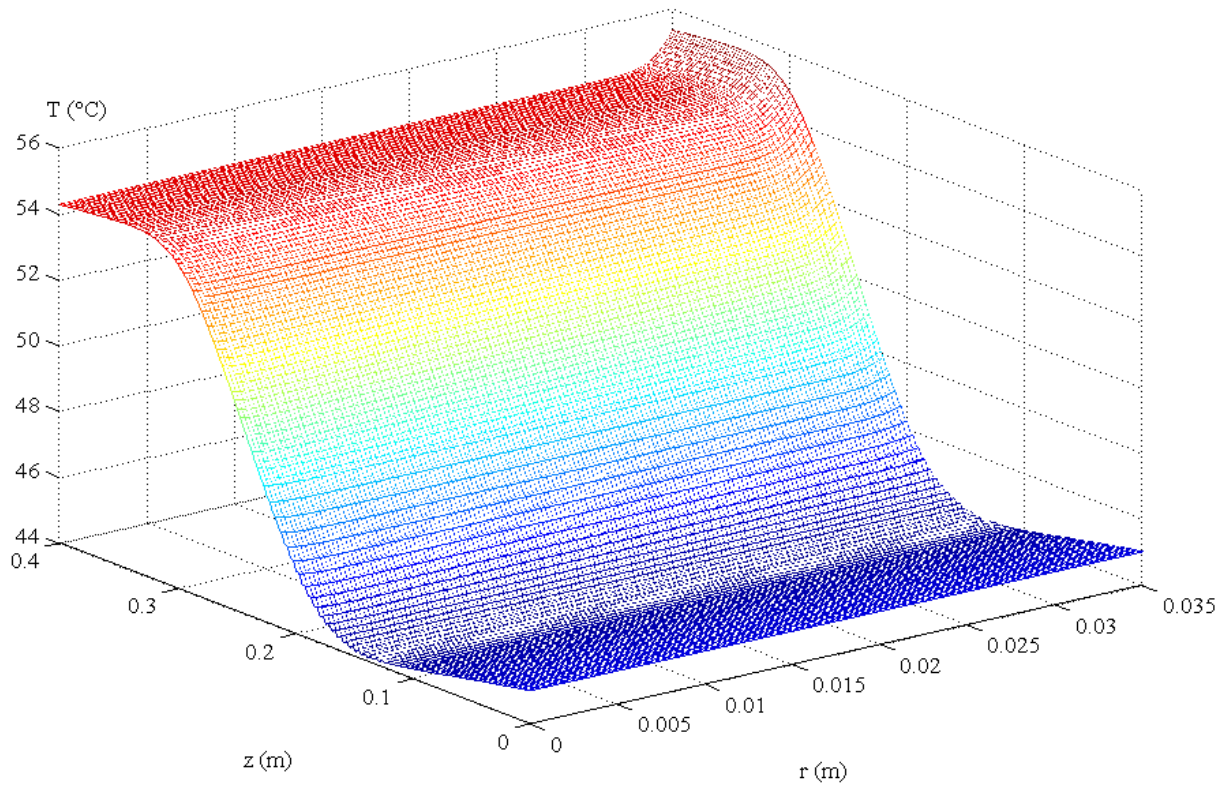


Figura 4.33b: Superfície de temperatura em função das posições axial e radial no bioreator de Umsza Guez (2009) na metade do processo ($t = 12$ horas).

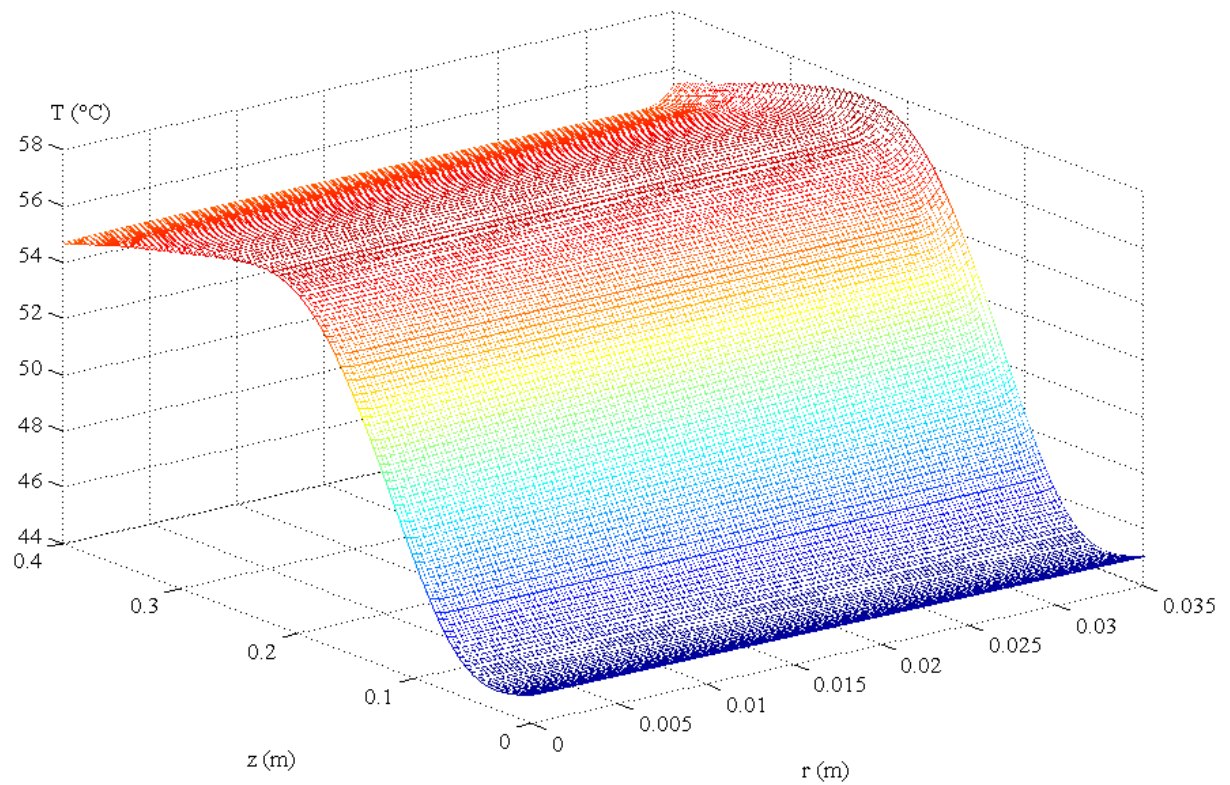


Figura 4.33c: Superfície de temperatura em função das posições axial e radial no bioreator de Umsza Guez (2009) no final do processo ($t = 24$ horas).

CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Os resultados obtidos permitem inferir as seguintes conclusões:

- A condutividade térmica na estagnação (K_0), obtida pelo método da sonda linear, apresentou valores muito baixos para os recheios secos, devido às características estruturais e de composição dos mesmos, mas aumentava bruscamente para os recheios úmidos, devido à condução de calor através de um filme de água livre;
- Para ambos os recheios, o coeficiente global de troca térmica (U) do modelo unidimensional aumentou com a vazão de ar e diminuiu com a altura do leito; de um modo geral, $U_{\text{meio composto}} < U_{\text{bagaço de cana}}$, devido às menores diferenças de temperatura para o bagaço;
- Para leitos fixos aplicáveis à FES, a possibilidade de trabalhar com um modelo de duas regiões pode ser interessante, já que U é baixo quando calculado para toda a seção transversal na saída do leito, mas aumenta significativamente quando calculado somente para a região da parede;
- A condutividade térmica efetiva radial (K_r) apresentou valores muito baixos, tendendo ao valor da estagnação, devido às características intrínsecas dos materiais empregados na FES, que os tornam muito pobres em conduzir calor, e à fraca componente convectiva;
- De um modo geral, $K_{r \text{ meio composto}} < K_{r \text{ bagaço de cana}}$, pelo mesmo motivo que o U ;
- O coeficiente convectivo de transferência de calor parede-fluido (h_p) apresentou valores muito inferiores aos encontrados na literatura, devido às baixas vazões de ar empregadas na FES;
- $h_{p \text{ meio composto}} > h_{p \text{ bagaço de cana}}$, devido à maior turbulência na região da parede para o meio composto, provocada pelas partículas de farelo e bagaço de laranja;

- Os programas desenvolvidos para aquisição de dados experimentais e para cálculo dos parâmetros térmicos facilitaram a obtenção de dados e dos parâmetros dos sistemas de interesse;
- Os programas de simulação numérica desenvolvidos permitiram simular com relativo êxito o crescimento do fungo termofílico *Thermomucor indicae seudaticae* N31 e o comportamento térmico do processo de FES conduzido por Umsza Guez (2009) em bioreator de leito fixo recheado com meio composto por bagaços de cana e laranja e farelo de trigo, através de modelos disponíveis na literatura, apesar de os picos de temperatura simulados terem sido mais elevados que os experimentais.

5.2 Sugestões

Como sugestões para futuros trabalhos na área, propõem-se:

- Propor novos métodos e modelos para determinação da condutividade térmica efetiva na estagnação dos materiais empregáveis na fermentação em estado sólido;
- Melhorar a caracterização dos materiais e das condições operacionais empregadas na fermentação sólida;
- Aprimorar a metodologia e a modelagem para obtenção dos parâmetros térmicos dos sistemas compostos por leitos fixos percolados por ar aplicados em processos de fermentação sólida;
- Melhorar e validar experimentalmente os modelos para a cinética de crescimento e a distribuição de temperaturas no processo fermentativo de Umsza Guez (2009);
- Simular a cinética de crescimento e a distribuição de temperaturas de outros processos de fermentação em estado sólido da literatura;
- Ampliar a escala de processos de fermentação em estado sólido e fazer com que sejam técnica e economicamente viáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAZARD, D.; RAIMBAULT, M. Comparative study of amylolytic enzyme production by *Aspergillus niger* in liquid and solid-state fermentation. **European Journal of Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 12, p. 113-117, 1981.

ASHLEY, V. M.; MITCHELL, D. A.; HOWES, T. Evaluating strategies for overcoming overheating problems during solid-state fermentation in packed beds bioreactors. **Biochemical Engineering Journal**, n. 3, p. 141-150, 1999.

AUGIER, F.; IDOUX, F.; DELENNE, J. Y. Numerical simulations of transfer and transport properties inside packed beds of spherical particles. **Chemical Engineering Science**, v. 65, p. 1055–1064, 2010.

BADHAN, A. K. et al. Production of multiple xylanolytic and cellulolytic enzymes by thermophilic fungus *Myceliophthora sp.* IMI 387099. **Bioresource Technology**, v. 98, p. 504-510, 2007.

BEAR, J. **Dynamics of fluids in porous media**. New York: Dover Pub, 1972.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos de Transporte**. 2ed., Rio de Janeiro: LTC Editora, 2002.

BLACKWELL, J. H. Radial-axial heat flow in regions bounded internally by circular cylinders. **Canadian Journal of Physics**, v. 31, n. 4, p. 472-479, 1953.

BLACKWELL, J. H. A transient-flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk. 1. Theory. **Journal of Applied Physics**, v. 25, n. 2, p. 137-144, 1954.

BLACKWELL, J. H. The axial flow error in the thermal conductivity probe. **Canadian Journal of Physics**, v. 34, n. 4, p. 412-417, 1956.

BLACKWELL, J. H.; MISENER, A. D. Approximate solution of a transient heat flow problem. **Proceedings of the Physical Society of London Section A**, v. 64, n. 384, p. 1132-1133, 1951.

CASCIATORI, F. P. **Análise da Transferência de Calor em Leito Fixo Empacotado com Bagaço de Cana-de-Açúcar Percolado por Ar**. DETA/ IBILCE/ UNESP. (Iniciação Científica). Relatório final de bolsa FAPESP. 2008.

CASCIATORI, F. P.; LAURENTINO, C. L.; THOMEIO, J. C. Estudo do empacotamento de leitos fixos recheados com bagaço de cana-de-açúcar. In: VII Congresso Brasileiro de Engenharia Química – Iniciação Científica, 2007, São Carlos. **Anais do VII Congresso Brasileiro de Engenharia Química - Iniciação Científica**, 2007. v. 1.

CHOI, Y.; OKOS, M. R. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. In: LE MAGUER, M.; JELEN, P. (Ed.). **Food Engineering and Process Applications**. UK: Elsevier App. Sci. Pub., 1986. v. 1, p. 93-101.

COBERLY, C. A.; MARSHALL, W. R. Temperature gradients in gas streams flowing through fixed granular beds. **Chemical Engineering Progress**, New York, v. 47, n. 3, p. 141 – 150, 1951.

COLBURN, A. P. Heat transfer in packed tubes. **Ind. Eng. Chem.**, v. 32, p. 910 – 913, 1931.

CREMASCO, M. A. **Fundamentos de transferência de massa**. 1ed., Campinas: Unicamp, 728p. 2008.

DESHPANDE, S. D.; BAL, S.; OJHA, T. P. Bulk Thermal conductivity and diffusivity of soybean. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 20, p. 177-189, 1996.

DE WASH, A. P.; FROMENT, G. F. Heat-transfer in packed-beds. **Chemical Engineering Science**, New York, v. 27, n. 3, p. 567 – 576, 1972.

DIXON, A. G. The length effect on packed-bed effective heat-transfer parameters. **Chemical Engin. Journal and Biochemical Engin. Journal**, Lausanne, v. 31, n. 3, p. 163 – 173, dec. 1985.

DIXON, A. G. Heat transfer in fixed beds at very low (< 4) tube-to-particle diameter ratio. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 36, n. 8, p. 3053 – 3064, Aug. 1997.

DIXON, A. G.; PATERSON, W. R.; CRESWELL, D. L. Heat transfer in packed beds of low tube/particle diameter ratio. **ACS Symposium Series**, v. 65, p. 238-253, 1978.

EL-HAWARY, F. I.; MOSTAFA, Y. S. Factors affecting cellulose production by *Trichoderma koningii*. **Acta Alimentaria**, v. 30, p. 3-13, 2001.

FANAEI, M. A.; VAZIRI, B. M. Modeling of temperature gradients in packed-bed solid-state bioreactors. **Chemical Engineering and Processing**, v. 48, p. 446–451, 2009.

FANG, Q.; LAN, Y. B.; KOCHER, M. F.; HANNA, M. A. Thermal Conductivity of granular rice starches. **International Journal of Food Properties**. p. 283 – 293, 2000.

FREEDONIAN GROUP. World enzymes. Disponível em: http://www.piribo.com/publications/biotechnology/world_enzymes.html. Acesso em: 10 Ago. 2008.

FREIRE, J. T. **Transferência de calor em meios porosos**. 1979. 223p. Tese (Doutorado em Engenharia Química), COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1979.

FRYDRYCH, I.; DZIWORSKA, G.; BILSKA, J. Comparative Analysis of the Thermal Insulation Properties of Fabrics Made of Natural and Man-Made Cellulose Fibres. **Fibres & Textiles in Eastern Europe**, p. 40-44, October/December, 2002.

GHILDYAL, N. P. et al. Interaction of transport resistances with biochemical reaction in packed-bed solid-state fermentors: effect of temperature gradients. **Enzyme Microb. Technol**, n. 16, p. 253-257, 1994.

GILAT, A. **MatLab[®]: An Introduction with Applications**. 2 ed., New York: Wiley & Sons, 2004.

GIUDICI, R. **Modelagem de reator de oxidação de etileno: estudo de parâmetros térmicos e estratégia de diluição de catalisador**. 1990. 183p. Tese (Doutorado) – EPUSP, São Paulo – SP, 1990.

GOEDEKEN, D. L. et al. True Thermal Conductivity Determination of Moist Porous Food Materials at Elevated Temperatures. **Journal of Food Science**, v.63, n.6, p. 1062-1063, 1998.

GUARDO, A. et al. Influence of the turbulence model in CFD modeling of wall to fluid heat transfer in packed beds. **Chemical Engineering Science**, v. 60, p. 1733–1742, 2005.

GUNN, D. J.; AHMAD, M. M.; SABRI, M. N. Radial heat transfer to fixed beds of particles. **Chemical Engineering Science**, v. 42, n. 9, p. 2163-2171, 1987.

HAMEL, S.; KRUMM, W. Near-wall porosity characteristics of fixed beds packed with wood chips. **Powder Technology**, v. 188, p. 55–63, 2008.

HOOPER, F. C.; LEPPER, F. R. Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivities. **Transactions American Society of Heat and Ventilating Engineers**, n. 56, p. 309-326, 1950.

INSULATION SOLUTIONS. 2004. **General purpose glass wool**: Industrial insulation blanket. URL: <www.insulationsolutions.com.au/pdf/GlassWool-GP.pdf> Acesso em: 05 Jun. 2007.

KASHYAP, D. R. et al. Applications of pectinases in the commercial sector: a review. **Bioresource Technology**, v. 77, 215-227, 2001.

KUNII, D.; SUZUKI, M. Particle to fluid heat and mass transfer in packed beds of fine particles. **Int. J. Heat Mass Transfer**, v. 10, p. 845 – 852, 1967.

KUSTERMANN, M. The effect of physical properties of grain on processing. *apud* RAHMAN, S. **Food properties handbook**. Boca Raton: CRC Press, 1995. 500p.

LAURENTINO, C. L. **Transferência de calor em leitos fixos com aplicação em reatores de fermentação em estado sólido**. 2007. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – PPG-ECA/UNESP, São José do Rio Preto, 2007.

LEGAWIEC, B.; ZIÓLKOWSKI, D. Mathematical simulation of heat transfer within tubular flow apparatus with packed bed by a model considering system inhomogeneity. **Chemical Engineering Science**, v. 50, n. 4, p. 673-683, 1995.

LEVENBERG, K. A Method for the Solution of Certain Problems in Least Squares. **Quart. Appl. Math**, v. 2, p. 164-168, 1944.

MARQUARDT, D. W. An algorithm for least squares estimation of nonlinear parameters. **SIAM - J. Appl. Math.**, v. 11, p. 431-441, 1963.

MARTIN, N. **Isolamento de linhagens fúngicas termofílicas produtoras de pectinases termoestáveis: Produção, caracterização e purificação parcial da poligalacturonase**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas), Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.

MARTINS, E. S. et al. Solid state production of thermostable pectinases by thermophilic *Thermoascus aurantiacus*. **Process Biochemistry**, v. 37, p. 949-954, 2002.

McTAGGART, R. B.; UNDERWOOD, W. M. The thermal conductivity of several plastics, measured by an unsteady state method. **Chem. Eng. Prog. Symp. Series**, v. 56, n 3, p. 261-268, 1960.

MILAGRES, A. M. F. et al. Production of xylanase by *Thermoascus aurantiacus* from sugar cane bagasse in an aerated growth fermentor. **Process Biochem.**, v.39, p. 1387–1391, 2004.

MITCHELL, D. A. et al. New developments in solid-state fermentation. II. Rational approaches to the design, operation and scale up of bioreactors. **Process Biochemistry**, n. 35, p. 1211-1225, 2000.

NEGRINI, A. L. et al. Fluid dynamics of air in a packed-bed: velocity profiles and the continuum model assumption. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, São Paulo, v. 16, n. 4, p. 421-432, Dec. 1999.

OSWIN, C. R. The kinetics of package life. III. The isotherm. **J. Chem. Ind.**, n.65, p.419-421, 1946.

PANDEY, A. Recent process-developments in solid-state fermentation. **Process Biochemistry**, London, v. 27, n. 2, p. 109 – 117, Mar. 1992.

PANDEY, A. Solid-state fermentation. **Biochemical Engineering J.**, v. 13, p. 81 – 84, 2003.

PERRY, R. H., BENSCHOW, L. R., BEIMESCH, W. E. et al. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 8ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 2008.

PRATT, A. W. Heat transmission in low conductivity materials. In: TYE, R. P. (Ed.). **Thermal conductivity**. London: Academic Press Inc. (London) LTD, 1969. v. 1, p. 301-405.

RAHMAN, S. **Food properties handbook**. Boca Raton: CRC Press, 1995. 500p.

RIDGWAY, K.; TARBUCK, K. J. Voidage fluctuations in randomly-packed bed of spheres adjacent to a containing wall. **Chemical Engineering Science**, v. 23, n. 9, p. 1147-&, 1968.

RODRIGUES, A. M.; SANT'ANNA, E. S. Efeito do cloreto de sódio na produção de proteínas (*Saccharomyces cerevisiae*) em fermentação semi-sólida. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 21, n. 1, p. 57-62, jan./abr. 2001.

ROMKES, S. J. P. et al. CFD modelling and experimental validation of particle to fluid mass and heat transfer in a packed bed at very low channel to particle diameter ratio. **Chemical Engineering Journal**, v. 96, p. 3–13, 2003.

ROUILLER, C. O. **Análise, via modelação pseudo-homogênea, da transferência de calor em leito fixo e escoamento monofásico.** 2000. 215p. Tese (Doutorado) – UFSCar, São Carlos – SP, 2000.

RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. R. **Cálculo Numérico: aspectos teóricos e computacionais.** São Paulo: Makron Books, 2. ed.1996.

SAKIYAMA, T.; YANO, T. Effects of air and water contents on the effective thermal conductivity of air impregnated gels. **Agric. Biol. Chem.**, n. 54, p. 1375-1380, 1990.

SANGSURASAK, P.; MITCHELL, D. A. Incorporation of death kinetics into a 2-D dynamic heat transfer model for solid state fermentation. **J. Chem. Technol. Biotechnol.**, v. 64, p. 253–260, 1995.

SANGSURASAK, P.; MITCHELL, D. A. Validation of a model describing two-dimensional heat transfer during solid-state fermentation in packed bed bioreactors. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 60, n. 6, p. 739 – 749, Dec. 1998.

SANTOS, R. L. S.; OLIVEIRA, C. Morfometria testicular durante o ciclo reprodutivo de *Dendropsophus minutus* (Peters) (Anura, Hylidae). **Revista Brasileira de Zoologia**, v. 24, n. 1, p. 64-70, mar. 2007.

SAUCEDO-CASTAÑEDA, G. et al. Heat transfer simulation in solid substrate fermentation. **Biotechnology and Bioengineering**, n. 35, p. 802-808, Oct. 1990.

SCHMIDELL, W. et al. **Biotecnologia Industrial.** São Paulo: Edgard Blucher, v. 2, 2001.

SILVA, D. et al. Production of pectinase by solid-state fermentation with *Penicillium viridicatum* RFC3. **Process Biochemistry**, v. 40, p. 2885-2889, 2005.

SKLIVANIOTIS, M. et al. Characteristic features of parametric sensitivity in a fixed bed heat exchanger. **Chemical Engineering Science**, v. 43, p. 1517 – 1522, 1988.

SMIRNOV, E. I. et al. Radial heat transfer in packed beds of spheres, cylinders and Rashig rings – Verification of model with a linear variation of λ_{er} in the vicinity of the wall. **Chemical Engineering Journal**, v. 91, p. 243–248, 2003.

SMITH, J. M. Interpretative review heat-transfer in fixed bed. **Chem. Eng. J.**, v. 5, p. 109 – 116, 1973.

SOCCOL, C. R. Aplicações da fermentação no estado sólido na valorização de produtos e resíduos agroindustriais. **Integração pesquisa – indústria no setor agroalimentar**, 1995. Disponível em: <www.cendotec1.org.br/ffantigos/ff04a.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2006.

SOCCOL, C. R. **Physiologie et métabolisme de *Rhizopus* en culture solide et submergée en relation avec la dégradation d'amidon et la production d'Acide L(+) Lactique**. 1992. 218 p. Thèse de Doctorat. Mention Génie enzymatique, Bioconversion et Microbiologie, Université de Technologie de Compiègne. Compiègne-France, 1992.

SREENARAYANAN, V. V.; SUBRAMANIYAN, V.; VISWANATHAN, R. Physical and thermal properties of soybean. **Proceeding of Indian Society of Agricultural Engineers Convention**, Bhopal, India, 1985.

SWEAT, V. E. **Effects of temperature and time postmortem on the thermal conductivity of chicken meat**. 1971. 59p. Thesis (Doctorate in Philosophy). Purdue University, United States, 1971.

THOMÉO, J. C. **Análise experimental dos efeitos de entrada térmicos sobre os coeficientes de transferência de calor em leito fixo**. 1990. 117p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, 1990.

THOMÉO, J. C. **Transferência de calor em leito fixo: o modelo a dois parâmetros tradicional revisitado**. 1995. 146p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - PPG-EQ/UFSCar, São Carlos, 1995.

THOMÉO, J. C.; ROUILLER, C. O.; FREIRE, J. T. Experimental analysis of heat transfer in packed beds with air flow. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, Washington, v. 43, n. 15, p. 4140 – 4148, July 2004.

UENOJO, M.; PASTORE, G. M. Isolamento e seleção de microrganismos pectinolíticos a partir de resíduos provenientes de agroindústrias para produção de aromas frutais. **Ciência e Tecnologia Alimentar**, v. 26, n. 3, p. 509-515, 2006.

UMSAZ GUEZ, M. A. **Produção de poligalacturonase em fermentação em estado sólido pelo fungo *Thermomucor indicae-seudaticae* N31 em escala de frascos e bioreator de leito fixo**. 2009. 106f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – PPG-ECA/UNESP, Ibilce, São José do Rio Preto – SP, 2009.

UMSAZ GUEZ, M. A. et al. Effect of pectinolytic enzymes on the physical properties of cajá-manga (*Spondias cytherea* Sonn.) juice. Submetido à revista **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, aceito para publicação, 2010.

VAN der HELD, E. F. M.; VAN DRUNEN, F. G. A method of measuring the thermal conductivity of liquids. **Physica**, v. 15, n. 10, p. 865, 1949.

ZACH, Lorna. Heat Transfer. In: HUI, Y. H. (Org). **Handbook of Food Science, Technology and Engineering**. Volume 3. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006, cap. 107.

ZANELATO, A. I. **Produção de Enzimas Celulolíticas por Fermentação em Estado Sólido em Bioreator de Leito Fixo**. PPG-ECA/ UNESP. (Dissertação de Mestrado). Relatório final de bolsa FAPESP. 2010.

ZOTIN, F. M. Z. **O efeito parede em colunas de recheio**. 1985. 85p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - PPG-EQ/UFSCar, São Carlos – SP, 1985.