

RESSALVA

Atendendo solicitação da autora,
o texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir
de 16/04/2022



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de São José do Rio Preto

Érika Fernanda Rezendes Tada

Cultivo em estado sólido em biorreator de tambor horizontal:
Modelagem, simulação e experimentação

São José do Rio Preto
2021

Érika Fernanda Rezendes Tada

Cultivo em estado sólido em biorreator de tambor horizontal:
Modelagem, simulação e experimentação

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

Financiadoras: CAPES – Proc. 33004153070P-2 e 88887.161386/2017-00; FAPESP – Proc. 2014/23453-3

Orientador: Prof. Dr. João Cláudio Thoméo
Coorientador: Prof. Dr.-Ing. Andreas Bück
Prof^a. Dr^a. Fernanda P. Casciatori

São José do Rio Preto
2021

T121c

Tada, Érika Fernanda Rezendes

Cultivo em estado sólido em biorreator de tambor horizontal: :
modelagem, simulação e experimentação / Érika Fernanda Rezendes
Tada. -- São José do Rio Preto, 2021
237 f. : il., tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto
de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto

Orientador: João Cláudio Thoméo

Coorientador: Andreas Bück

1. Modelos matemáticos. 2. Tambor. 3. Calor Transmissão. 4.
Massa Transferência. 5. Fermentação em estado sólido. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de
Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Érika Fernanda Rezendes Tada

Cultivo em estado sólido em biorreator de tambor horizontal:

Modelagem, simulação e experimentação

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

Financiadoras: CAPES – Proc. 33004153070P-2 e Proc. 88887.161386/2017-00; FAPESP – Proc. 2014/23453-3

Comissão Examinadora

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

Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Ferreira
UFSCar – São Carlos

Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo
UFU – Uberlândia

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

Prof. Dr. Roger Darros Barbosa
UNESP – Câmpus de São José do Rio Preto

São José do Rio Preto
16 de abril de 2020

Dedicatória

*Ao meu orientador, João Cláudio Thoméo.
À minha querida sobrinha, Helena.*

Dedico.

Érika F. Rezendes Tada

AGRADECIMENTOS

A Deus, Criador de todas as coisas, pela minha saúde, pelas boas oportunidades que apareceram no meu caminho, por preenchê-lo com pessoas de bom coração e por cuidar daqueles que eu amo.

À minha família pelo contínuo apoio e por sonharem sonhos que pareciam tão distantes junto comigo. Em especial, agradeço imensamente ao meu irmão, que me inspira e me impulsiona sempre a ser alguém melhor.

Ao Prof. Dr. João Cláudio Thoméo, orientador desta tese, pela amizade, companheirismo e cuidado mesmo quando longe; por me aceitar em seu grupo de pesquisa há alguns anos, por confiar no meu trabalho e por ser exatamente o que se espera de um orientador. Como há quatro anos, continuo a desejar que desfrute de muita saúde para que mais pessoas possam ter a feliz sorte de te encontrar pelo caminho, assim como eu tive.

Ao Prof. Dr.-Ing. Andreas Bück, coorientador desta tese, por aceitar minha estadia durante um ano junto ao seu grupo de pesquisa na Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, e também pelas conversas, por transmitir tranquilidade e pelos incansáveis esclarecimentos.

À Prof^a. Dr^a. Fernanda Perpétua Casciotori, também coorientadora desta tese, pela amizade e por transmitir tranquilidade em muitos momentos de tensão.

Ao Prof. Dr.-Ing. Evangelos Tsotsas, pela ajuda e cooperação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos membros da Comissão Examinadora do Exame Geral de Qualificação desta Tese, Prof^a. Dr^a. Maria Aparecida Mauro e Prof^a. Dr^a. Cristiane Sanchez Farinas, pelas sugestões e valiosas contribuições para as etapas finais deste trabalho. Em especial, agradeço carinhosamente à Prof^a. Maria Aparecida Mauro pela amável ajuda e pacientes esclarecimentos.

Aos membros desta banca, Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Ferreira, Prof^a. Dr^a. Maria Aparecida Mauro, Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo e Prof. Dr. Roger Darros

Agradecimentos

Barbosa, por aceitarem o convite e enriquecerem este trabalho com suas valiosas sugestões.

Àqueles que passaram pelo Laboratório de Engenharia de Processos e Biorreatores durante os últimos quatro anos, agradeço pela ajuda com experimentos e interpretação de dados e também pelos momentos de descontração. Em especial, externo especial gratidão a Carol Perez, Pri, Lucas, Mari, Rê, Gi e Giu pela amizade e ajuda durante o desenvolvimento deste trabalho.

Às amigadas que pude conquistar durante o tempo de estágio na Alemanha e cultivo carinhosamente até hoje. Em especial, agradeço a Pepe, Luís, Lucas, Mig, Loreleyn, Inna, Joshua e Dennis pela atenção e cuidado.

Carinhosamente, agradeço ao André pelo carinho, sinceridade, cuidado e amável companhia durante os últimos meses.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo incentivo financeiro ao Laboratório de Engenharia de Processos e Biorreatores (Proc. 2014/23453-3).

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, à qual agradeço pelo incentivo financeiro durante os três anos no Brasil (Proc. 33004153070P-2) e durante um ano na Alemanha (Proc. 88887.161386/2017-00).



RESUMO

Esta tese apresenta um estudo sobre modelagem a uma fase de leitos estáticos em tambores horizontais construídos para cultivo sólido. Para tanto, balanços de massa foram propostos para leitos isotérmicos sem reação, seguidos de balanços de calor e massa para três dimensões de tambor: 10, 20 e 31 cm de diâmetro e 20, 40 e 74 cm de comprimento, respectivamente. Vazões de ar seco de 5 e 50 L/min foram assumidas para leitos compostos por sílica gel e por fibras de bagaço de cana. Balanços para a fase gasosa escoante foram também propostos e solucionados simultaneamente aos balanços para o leito. Propriedades efetivas de transporte foram determinadas experimentalmente e/ou calculadas. A convergência entre a difusividade efetiva de água em leito de bagaço de cana sugere sua representação preferencialmente através da dependência da umidade de partículas em ensaios com duração superior a dez horas. Para ensaios relativamente curtos, a dependência do parâmetro em relação à posição radial pode ser suficiente. Uma análise de Número de Biot modificado foi apresentada para transporte de massa adotando-se um fator de correção referente à posição no leito. Em sistemas isotérmicos, o transporte de massa é governado pela resistência interna a 50 L/min principalmente nos primeiros instantes de ensaio, evoluindo para resistências equivalentes ao longo do tempo; a resistência externa ao transporte de massa é predominante a 5 L/min. Balanços de calor e massa requereram as condutividades térmicas efetivas dos leitos de partículas, extraída da literatura para o leito de bagaço de cana e determinada experimentalmente com dependência explícita da temperatura e da umidade das partículas para o leito de sílica gel. Correlações foram utilizadas para estimativa das condutividades térmicas efetivas, obtendo-se bons resultados para o leito de sílica e resultados confiáveis apenas para uma faixa de umidade de partículas em leito de bagaço de cana, correspondente a até 0,43 kg/kg de sólido seco. Balanços de massa e energia para a fase gasosa no sobre espaço foram acoplados à solução dos balanços para o leito de partículas. Dentro dos três tambores, a temperatura do gás no sobre espaço pode ser assumida constante a 45 °C, o gás não deixa os tambores em condição de saturação e perfis axiais de umidade são desenvolvidos. Quanto à transferência de calor em sistemas não isotérmicos, a parede do tambor é a principal fronteira através da qual o calor é transferido e as resistências internas ao transporte de calor são desprezíveis em tambor de 10 cm de diâmetro. O número de Biot de massa modificado foi calculado

também para os sistemas não-isotérmicos e acusou ausência de resistências externas somente em leito de sílica gel para todos os tamanhos de tambores em vazão de 50 L/min. Nos demais leitos, tambores e vazões, resistências equivalentes governaram o transporte de massa. Os balanços de calor e massa foram adicionados de um termo que representa a geração de calor pelo microrganismo e foram validados utilizando-se a cinética de liberação de gases pelo fungo *Myceliophthora thermophila* I-1D3b em leito de bagaço de cana e farelo de trigo com suprimento de ar a 5 L/min e 96 e 75 % de umidade relativa, cujos picos de temperatura foram observados em 28 e 42 horas, respectivamente. Durante o cultivo, o controle de temperatura foi eficiente apenas em tambor com 10 cm de diâmetro, com elevações de temperatura de aproximadamente 3,5 e 7 °C em tambores com 20 e 31 cm de diâmetro, respectivamente. Em tambor médio, mais intensa atividade metabólica foi observada quando gás foi inserido a 96 % de UR. As atividades enzimáticas de endoglucanase não foram afetadas pelos aumentos de temperatura, mas pelo ressecamento do leito. A temperatura do gás se aproximou da temperatura da superfície em todos os tambores e calor permaneceu acumulado no leito em tambor de 31 cm de diâmetro ainda ao final do cultivo. A boa concordância entre os perfis experimentais e fornecidos pelos modelos afirmam a sua aplicabilidade na predição de variáveis de interesse e podem ser empregados em estudos de aumento de escala de biorreatores para cultivo sólido.

Palavras-chave: Modelagem e simulação. Tambor horizontal. Transferência de calor. Transferência de massa. Bagaço de cana. Cultivo em estado sólido.

ABSTRACT

The current work presents a study about one-phase modelling of static beds within horizontal drums built for solid-state cultivation. For this, mass balances were proposed for no-reactional isothermal beds, followed by mass and heat balances for three dimensions of drums: 10, 20 and 31 cm of diameter and 20, 40 and 74 cm of length, respectively. Dry airflow rates of 5 and 50 L/min were assumed for beds composed by silica gel and by fibers of sugar cane bagasse. Balances for the gas phase in the headspace were also proposed and simultaneously solved to the balances for the bed. Effective transport properties were experimentally determined and/or calculated. The convergence between the effective diffusivity of water in the bed of sugar cane bagasse suggests that its representation preferentially by the dependence on the moisture of the particles for experimental assays with duration higher than ten hours. For relatively short experimental assays, the dependence of the parameter on the radial position can be enough. An analysis of modified Biot number was presented for the mass transport adopting a correcting factor referent to the radial position in the bed. In isothermal systems, the mass transport is managed by the internal resistances at 50 L/min mainly in the initial instants of the test, evolving for equivalent resistances over time; the external resistance to the mass transport is predominant at 5 L/min. Mass and heat balances required the effective thermal conductivities of the beds, extracted from the literature for the bed of sugar cane bagasse and experimentally determined as dependence on the temperature and the moisture content of particles for the bed of silica beads. Correlations were used for estimative of effective thermal conductivities, obtaining satisfactory results for the bed of silica and confinable results only a range of moisture of sugar cane bagasse particles corresponding to up 0,43 kg/kg of dry solid. Mass and energy balances for the gas phase in the headspace were coupled to the solution of the balances for the bed of particles. For all the drums, the temperature of gas in the headspace can be assumed constant at 45 °C, the gas does not leave the drums saturated of vapor of water vapor and axial profiles are developed. About the heat transfer in no-isothermal systems, the drum-wall is the main boundary through the heat is transferred and the internal resistances to the heat transfer are neglected within a drum of 10 cm of diameter. The modified Biot number for mass transfer was also calculated for no-isothermal systems and pointed absence of external resistances only for a bed of silica beads at 50 L/min for all the drums. For the

others drums, beds and airflow rates, equivalent resistances managed the mass transport. Mass and heat balances were added of a term which represents the heat generated by the microorganism and validated using the kinetic of gas released by the thermophilic fungus *Myceliophthora thermophila* I-1D3b on a bed of sugar cane bagasse and wheat bran with air supplying of 5 L/min and 75 to 96 % of relative humidity, whose peaks of temperature were observed at 42 and 28 hours, respectively. During the cultivation, the controlling of temperature was efficient only within the drum of 10 cm of diameter, with increase of temperature of 3,5 and 7 °C within drums with 20 and 31 cm of diameter, respectively. In the intermediary sized drum, more intense metabolic activity was observed when the gas was inserted at 96 % of RH. The enzymatic activities of endoglucanase were not be affected by the increase of temperature but the dryness of the bed was considered a critical condition. The temperature of the gas was close to the temperature of the surface in all the drums and energy kept accumulated in the bed of 31 cm of diameter also in the end of the cultivation process. The great agreement between the experimental profiles and those provided by the models affirm their applicability on the prediction of variables of interest and they can be employed in studies of scaling up of bioreactors for solid-state cultivation.

Keywords: Modeling and simulation. Horizontal drum. Heat transfer. Mass transfer. Sugar cane bagasse. Solid-state cultivation.

LISTA DE NOMENCLATURA

a	Distanciamento médio entre duas partículas, m
A_t	Área disponível para troca na superfície do leito, m^2
A_w	Atividade de água, -
A, B	Constantes do modelo de Giese (1998)
b	Sensibilidade da cinética de crescimento do microrganismo aos aumentos de temperatura, -
C_{par}	Calor específico do gás, J/kgK
$C_{p\acute{a}gua}$	Calor específico da água, J/kgK
C_{pbed}	Calor específico do leito, J/Kg $^{\circ}$ C
d	Diâmetro do tambor, m
d^*	Diâmetro da partícula, m
d_p	Diâmetro da partícula, m
d_s	Diâmetro médio das partículas de sílica gel, m
d_{BC}	Diâmetro médio das partículas de bagaço de cana, m
D_{eff}	Coeficiente efetivo de difusão de água no leito de partículas determinado experimentalmente, m^2/s
D_{esfera}	Coeficiente efetivo de transferência de massa por difusão para leito de partículas esféricas, calculado, m
$D_{cilindro}$	Coeficiente efetivo de transferência de massa por difusão para leito de partículas cilíndricas, calculado, m
E_a	Energia de ativação, J/kg de água
f	Capacidade máxima do ar de transportar água, kg de água/kg de ar seco
F^*	Fator de correção, -
$f_1(Pr)$	Constante de Prandtl para a geometria de placa plana, -
$f_3(Pr)$	Constante de Prandtl para a geometria de cilindro, -
g	Aceleração da gravidade, m/s^2
h_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície do leito e o gás no sobre espaço, W/m^2K
h_{conv}	Contribuição convectiva sobre o coeficiente de transferência de calor entre a superfície do leito e o gás no sobre espaço, W/m^2K

h_{evap}	Contribuição evaporativa sobre o coeficiente de transferência de calor entre a superfície do leito e o gás no sobre espaço, W/m^2K
h_m	Coeficiente de transferência de massa por convecção entre a superfície do leito e o ar no sobre espaço, m/s
h_w	Coeficiente de transferência de calor entre a parede do tambor e a primeira camada de partículas nesta região, J/m^2K
K	Coeficiente de partição
K^*	Condutividade térmica molecular da fase gasosa, W/mK
K_{SOL}	Condutividade térmica efetiva do sólido, W/mK
K_0	Condutividade térmica efetiva do leito de partículas, idêntico a K_{exp} , W/mK
K_I	Contribuição das partículas paralelas à direção de referência sobre o parâmetro $K_{bed,cilindro}$, m^2/s
K_{II}	Contribuição das partículas ortogonais à direção de referência sobre o parâmetro $K_{bed,cilindro}$, m^2/s
$K_{1,m}$	Taxa de aumento do parâmetro efetivo com a velocidade de escoamento do ar, -
K_1 e K_2	Constantes do modelo de Peleg
L	Comprimento do tambor, m
l_{BC}	Comprimento médio das fibras de bagaço de cana a 75 % de umidade (b.u.), m
M	Massa molar do gás, g/mol
Nu^*_{esfera}	Número de Nusselt para uma partícula esférica, -
Nu^*_{lam}	Contribuição laminar do número de Nusselt para uma esfera percolada por gás, -
Nu^*_{turb}	Contribuição turbulenta do número de Nusselt para uma esfera percolada por gás, -
$Nu_{cilindro}$	Número de Nusselt para uma partícula cilíndrica, -
Nu^*_{leito}	Número de Nusselt para um leito de partículas, -
$Nu^*_{partícula}$	Número de Nusselt para uma partícula, -
P_{atm}	Pressão atmosférica, Pa
P^*_w	Pressão de saturação de vapor d'água, atm
Pe_0	Número de Peclét calculado a partir de uma velocidade superficial u_0 , -

Pe^*	Número de Peclét a partir da velocidade superficial v^* , -
Pr	Número de Prandt, -
Q	Vazão de ar, L/min
Q_g	Calor de geração, J/m ³
R	Direção radial, m
R	Raio do cilindro empacotado ou raio do tambor, m
R^*	Constante universal dos gases ideais, J/kgK
Ra	Número de Rayleigh, -
Re^*	Número de Reynolds a partir da velocidade superficial v^* , -
R_q	Taxa de liberação de dióxido de carbono, mol/s
Sc	Número de Schmidt, -
Sh	Número de Sherwood, -
Sh_{lam}	Contribuição laminar no número de Sherwood, -
Sh_{turb}	Contribuição turbulenta no número de Sherwood, -
T	tempo, s, h ou dias
T	Temperatura do leite, °C ou K
T_g	Temperatura do gás no sobre espaço, °C
T_w	Temperatura da parede do tambor, °C
T_s	Temperatura da superfície do sólido, K
T_{max}	Temperatura máxima de reação, °C
T_{opt}	Temperatura ótima de reação, °C
T_{∞}	Temperatura do meio gasoso, K
V	Velocidade nominal, m/s
v^*	Velocidade intersticial, m/s
v_z	Velocidade superficial de escoamento na direção axial, m/s
V_r	Velocidade superficial de escoamento de gás em meio do leito de partículas na direção radial, m/s
V_s	Volume médio das partículas de sílica gel, m
V_{BC}	Volume médio das fibras de bagaço de cana a 75 % de umidade (b.u.), m
x	Direção transversal, m
X	Umidade do leite, kg de água/kg de sólido seco
X_{abs}	Umidade absoluta do ar, kg de água/kg de ar seco
X_g	Umidade do gás, kg de vapor d'água/kg de ar seco

X_{eq}	Umidades de equilíbrio determinadas experimentalmente, kg de água/kg de sólido seco
X_g^*	Umidade de saturação da fase gasosa, kg de vapor d'água/kg de sólido seco
X_{eq}^*	Umidades de equilíbrio a partir do ajuste do modelo de Peleg, kg de água/kg de sólido seco
X_t	Umidade das partículas no tempo t, kg de água/kg de sólido seco
y	Direção longitudinal, m
Y	Concentração de biomassa, kg de biomassa/kg de sólido seco, ou Quantidade acumulada de mols liberados, mol
Y_{max}	Concentração máxima de biomassa, kg de biomassa/kg de sólido seco, ou Quantidade acumulada máxima de mols liberados, mol
Z	Direção axial, m
a, b, m, n	Constantes da Eq. (4.30) proposta neste trabalho
f(R-r), n_m e $K_{2,m}$	Constantes do modelo de Winterberg et al. (2000)
β	Coeficiente de expansão térmico, K^{-1}
δ	Coeficiente de difusão molecular de água na fase gasosa, m^2/s
δ_{bed}	Coeficiente efetivo de difusão de água no leito de partículas, calculado, m^2/s
$\delta_{bed,cilindro}$	Contribuição estática no coeficiente efetivo de difusão de água no leito de partículas cilíndricas, m^2/s
$\delta_{bed,esfera}$	Contribuição estática no coeficiente efetivo de difusão de água no leito de partículas esféricas, m^2/s
δ_s	Difusão efetiva de água no sólido, m^2/s
$\delta_{bed,S}$	Coeficiente efetivo de difusão de água no leito de partículas de sílica gel, calculado e igual à $\delta_{bed,esfera}$, m^2/s
$\delta_{bed,BC}$	Coeficiente efetivo de difusão de água no leito de fibras de bagaço de cana, calculado e igual à $\delta_{bed,cilindro}$, m^2/s
$\delta_{bed,BC(r)}$	Coeficiente efetivo de difusão de água em leito de fibras de bagaço de cana como função da posição radial, m^2/s
$\delta_{bed,BC(X)}$	Coeficiente efetivo de difusão de água em leito de fibras de bagaço de cana como função da umidade de partículas, m^2/s

δ_I	Contribuição das partículas paralelas à direção de referência sobre o parâmetro $\delta_{bed,cilindro}$, m^2/s
δ_{II}	Contribuição das partículas ortogonais à direção de referência sobre o parâmetro $\delta_{bed,cilindro}$, m^2/s
ΔH	Calor de reação, J/kg
ΔH_{vap}	Entalpia de evaporação da água, J/kg de água
ε	Porosidade do leito, -
ε_c	Porosidade do leito no centro do tubo/cilindro empacotado, -
$\varepsilon(r)$	Porosidade local em função da posição radial r , -
$\varepsilon(x)$	Porosidade local em função da umidade das partículas, -
ε_S	Porosidade média do leito de sílica gel, -
ε_{BC}	Porosidade média do leito de fibras de bagaço de cana, -
λ	Calor latente de vaporização da água, J/kg de água
Λ	Volume do leito, m^3
ϕ	Fator de conversão de CO_2 liberado em energia, J/mol
ρ_{ar}	Massa específica do gás, kg de ar/ m^3
ρ_s	Massa específica do sólido, kg de sólido/ m^3
ρ_{bed}	Massa específica do leito, kg/m^3
μ	Taxa específica de reação, h^{-1}
μ_{opt}	Taxa específica de reação na temperatura ótima, h^{-1}
ν	Viscosidade cinemática, m^2/s
ℓ^*	Comprimento característico na superfície do leito, calculado pela razão entre volume pela área de troca, m

Subíndices

0	Inicial
BC	Bagaço de cana
cilindro	Partículas cilíndricas
esfera	Partículas esféricas
g	Gás
lam	Contribuição laminar
turb	Contribuição turbulenta
S	Sílica gel

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	19
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS GERAIS	21
CAPÍTULO 3. REVISÃO DA LITERATURA	22
3.1. Conceitos em cultivo em estado sólido (CES)	22
3.2. Biorreatores de tambor para CES	24
3.3. Modelagem aplicada a meios porosos	28
3.4. Modelagem e simulação de processos de cultivo sólido em biorreatores.....	38
CAPÍTULO 4. BALANÇOS DE MASSA	51
4.1. Introdução	51
4.2. Objetivos específicos	52
4.3. Materiais e métodos.....	53
4.3.1. Partículas	53
4.3.2. Ensaio de transferência de massa em tambor horizontal	54
4.3.3. Modelo matemático	56
4.3.4. Determinação experimental do coeficiente efetivo de difusão de água no leito de partículas	58
4.3.5. Correlações para cálculo da difusividade efetiva de água em leitos de partículas.....	60
4.3.6. Determinação experimental das umidades de equilíbrio das partículas..	62
4.4. Resultados e discussão	64
4.4.1. Umidades de equilíbrio (X_{eq}) das partículas de sílica e bagaço de cana. 64	
4.4.2. A dependência de D_{eff} em relação à temperatura	67
4.4.3. Cálculo do coeficiente efetivo de difusão em leito de partículas	72
4.4.4. Simulações de transferência de massa em tambor horizontal isotérmico parcialmente preenchido	78
4.4.5. Verificação do modelo	89
4.5. Conclusões parciais	95
CAPÍTULO 5. BALANÇOS DE MASSA E ENERGIA.....	97
5.1. Introdução	97
5.2. Objetivos específicos	98
5.3. Materiais e métodos.....	99
5.3.1. Preparo das partículas	99
5.3.2. Experimentos de calor e massa em tambor horizontal.....	100
5.3.3. Balanços de massa e energia	101

5.3.4. Parâmetros requeridos pelo modelo.....	106
5.3.5. Determinação experimental da condutividade térmica efetiva do leito de sílica gel na estagnação ($K_{0,s}$).....	109
5.3.6. Estimativa de parâmetros efetivos de transporte por meio de correlações	110
5.4. Resultados e discussão	112
5.4.1. Condutividade térmica efetiva do leito de sílica gel ($K_{0,s}$).....	112
5.4.2. Estimativa de parâmetros de transporte de interesse através de correlações.....	114
5.4.3. Simulações	118
a. Introdução de ar inicialmente seco em escoamento paralelo à superfície do leito a 50 L/min	118
b. Introdução de ar inicialmente seco em escoamento paralelo à superfície do leito a 5 L/min	131
c. Introdução do número de Biot de massa.....	143
5.4.4. Validação do modelo	149
5.5. Conclusões parciais	169
CAPÍTULO 6. BALANÇOS PARA CULTIVO SÓLIDO.....	171
6.1. Introdução	171
6.2. Objetivos específicos	173
6.3. Materiais e métodos.....	173
6.3.1. Cultivo em estado sólido em tambor horizontal	173
a. Microrganismo, substrato e solução de esporos	173
b. Tambores horizontais.....	174
c. Inoculação, cultivo e monitoramento das variáveis operacionais de interesse.....	175
d. Extração da solução enzimática bruta.....	178
e. Quantificação de atividade enzimática de endoglucanase (CMCase) ...	178
6.3.2. Balanços de massa e energia	179
6.3.3. Parâmetros cinéticos requeridos pelo modelo.....	181
6.3.4. Simulações e verificação do modelo	181
6.4. Resultados e discussão	182
6.4.1. Ensaios de cultivo sólido de <i>Myceliophthora thermophila</i> I-1D3b em tambores horizontais	182
6.4.2. Simulações.....	191
a. Simulações em biorreatores de diferentes dimensões.....	191
b. Atividades enzimáticas de endoglucanase.....	206
c. Efeito das velocidades superficiais de escoamento sobre a temperatura do leito em tambor grande.....	208

6.4.3. Verificação do modelo	212
6.5. Conclusões parciais	221
CAPÍTULO 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	223
CAPÍTULO 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	224
REFERÊNCIAS.....	225

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Tambores rotativos são comumente empregados nas indústrias química, siderúrgica e metalúrgica em processos como secagem e calcinação de materiais particulados. Em especial, processos de cultivo em estado sólido (CES) têm utilizado biorreatores de tambor rotativo em decorrência de conveniências operacionais, tais como a oferta de mecanismos de controle das condições de processo e menor demanda de trabalho manual, o que evita a possibilidade de contaminação por agentes externos nas etapas iniciais do processo fermentativo.

Os processos de cultivo em estado sólido têm se mostrado atrativos devido à possibilidade de obtenção de compostos de alto valor agregado através de uma tecnologia de baixo custo. No entanto, esta tecnologia não se encontra totalmente disponível em escala industrial devido às dificuldades relacionadas ao sobreaquecimento proveniente da geração metabólica de calor pelo microrganismo. Aliado a isso, os resíduos agroindustriais comumente utilizados como substratos em CES possuem propriedades térmicas relativamente pobres, o que dificulta a dissipação de energia. Como consequência, o calor permanece acumulado e gradientes de temperatura e umidade são desenvolvidos, o que pode ser prejudicial ao rendimento do processo e dificulta a ampliação de escala de biorreatores para CES.

Dentre os tipos de biorreatores, os de tambor rotativo têm apresentado alternativas adicionais para controle de variáveis de processo, tal como a movimentação das partículas. Em processos de CES, é possível se operar em regime intermitente de rotações, pois o cisalhamento excessivo pode causar efeitos deletérios às estruturas de crescimento do microrganismo, de modo que o leito permanece estático durante longos períodos e é eventualmente rotacionado; portanto, é aceitável a análise de cada um dos períodos separadamente. Este trabalho detém-se ao estudo dos fenômenos de transporte em sistemas particulados em tambores rotativos para cultivo sólido durante as fases totalmente estáticas, o que permite a denominação deste tambor rotativo como um tambor horizontal.

Modelos matemáticos têm sido utilizados como ferramenta em estudos de ampliação de escala de biorreatores para prever possíveis tendências nos perfis de temperatura e umidade do leito de partículas em presença do microrganismo. Tais modelos são representados a partir de balanços de massa e energia, porém algumas

literaturas fazem uso apenas de balanços de energia e, portanto, negligenciam as possíveis variações no conteúdo de água do substrato. Além disso, existe um escasso número de trabalhos de modelagem de CES voltados para a geometria de um cilindro parcialmente preenchido, de modo que grande parte dos modelos disponíveis são aplicáveis à geometria de biorreatores de coluna empacotada. Neste contexto, o presente trabalho apresenta a proposição de um modelo matemático capaz de prever as variações de temperatura e umidade em um leito de partículas de bagaço de cana e farelo de trigo disposto em um tambor horizontal estático durante processo de cultivo sólido.

Para tanto, o trabalho foi dividido em três seções principais apresentadas após a Revisão da Literatura. Cada uma das seções é apresentada em formato de capítulos independentes deste trabalho, com uma breve introdução, objetivos específicos, metodologia, resultados e conclusões parciais. A primeira seção abordará unicamente o transporte de massa a uma fase em leitos de partículas colocados em tambor horizontal isotérmico, com inclusão da determinação experimental e teórica de parâmetros de transporte de interesse. Na segunda seção serão apresentados e solucionados simultaneamente os balanços de massa e energia sem reação, também com parâmetros de interesse calculados ou determinados experimentalmente e discussão de mecanismos de transferências de calor e massa. Até aqui, os modelos serão validados para dois tipos de leitos de partículas: um de partículas de sílica gel e o outro, de bagaço de cana, que é o componente majoritário em massa em ensaios de cultivo sólido do fungo *Myceliophthora thermophila* I-1D3b. A última seção apresentará um modelo matemático aplicável a cultivo sólido em tambores horizontais estáticos, proposto a partir das observações percebidas nas seções anteriores. Pretende-se que as observações e modelos apresentados nesta tese contribuam substancialmente em estudos de aumento de escala de biorreatores de tambor horizontal para cultivo sólido, de modo a caminhar para a utilização desta promissora tecnologia em escala industrial.

CAPÍTULO 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final desta tese, considera-se que as etapas propostas até a proposição de um modelo matemático mais realístico foram fundamentais para o seu êxito na predição de variáveis de processo no estudo de caso de cultivo sólido do fungo termofílico *Myceliophthora thermophila* I-1D3b sobre um leito estático de bagaço de cana e farelo de trigo em tambores horizontais de diferentes tamanhos, com potencial de aplicação em estudos de aumento de escala deste tipo de biorreator.

CAPÍTULO 8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, propõem-se:

- Obter parâmetros de transporte de calor e massa para a mistura entre bagaço de cana e farelo de trigo em presença de microrganismo;
- Verificar os modelos de calor e massa aplicando-se diferentes graus de enchimentos nos diferentes tambores;
- Incluir um termo que represente a possível geração metabólica de água ao longo do cultivo;
- Verificar o modelo proposto para fungos mesofílicos;
- Propor uma relação entre a concentração de biomassa fúngica por métodos indiretos e a liberação de gases;
- Proposição de modelo a duas fases para predição dos perfis de interesse de leitos estáticos e compreensão mais detalhada dos fenômenos envolvidos;
- Apresentar um modelo que descreva a dinâmica das partículas de bagaço de cana e farelo de trigo durante os períodos de agitação, supondo-se que se adote regime intermitente de rotação neste equipamento;
- Estabelecer um critério de homogeneidade de partículas baseado no número de rotações necessárias para que um elemento de volume representativo apresente umidade e/ou temperatura médias do leito de partículas;
- Acoplar as soluções para leitos estáticos e leitos dinâmicos, com vistas à possível utilização dos mecanismos disponíveis no biorreator de tambor rotativo de interesse para remoção de calor e manutenção das condições ótimas de cultivo em escala piloto;
- Apresentar estratégias operacionais que sejam adequadas para realização de cultivo sólido em regime intermitente de rotações em escala industrial.

REFERÊNCIAS

ACHENBACH, E. Heat and flow characteristics of packed beds. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 10, n. 1, p. 17-27, 1995.

ACUÑA-ARGÜELLES, M.; GUTIÉRREZ-ROJAS, M.; VINIEGRA-GONZÁLEZ, G.; FAVELA-TORRES, E. Effect of water activity on exo-pectinase production by *Aspergillus niger* CH4 on solid state fermentation. **Biotechnology Letters**, v. 16, n. 1, p. 23-28, 1994.

ALONSO, E.; GALLO, A.; ROLDÁN, M. I.; PÉREZ-RÁBAGO, C. A.; FUENTEALBA, E. Use of rotary kilns for solar thermal applications: Review of developed studies and analysis of their potential. **Solar Energy**, v. 144, p. 90-104, 2017.

AMORIM, G. M.; SANTOS, T. C.; PACHECO, C. S. V.; BARRETO, I. M. A.; FREIRE, D. M. G.; FRANCO, M. Fermentação de farelo de cacau por *Aspergillus niger* para obtenção de lipases. **Estudos Tecnológicos em Engenharia**, v. 8, n. 1, p. 24-27, 2012.

ARGO, W. B.; SMITH, J. M. Heat transfer in packed beds: prediction of radial rates in gas-solid beds. **Chemical Engineering Progress**, v. 49, n. 8, p. 443-451, 1953.

ARORA, S.; RANI, R.; GHOSH, S. Bioreactors in solid state fermentation technology: Design, applications and engineering aspects. **Journal of Biotechnology**, v. 269, p. 16-34, 2018.

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

BAI, J.; LIU, F.; LI, S.; LI, P.; CHANG, C.; FANG, S. Solid-state fermentation process for gibberellin production using enzymatic hydrolysate corn stalks. **Bioresources**, v. 15, n. 1, p. 429-443, 2020.

BANGA, J. R.; SINGH, R. P. Optimization of air drying of foods. **Journal of Food Engineering**, v. 23, n. 2, p. 189-211, 1994.

BEAVERS, G. S.; SPARROW, E. M.; RONDENZ, D. E. Influence of bed size on the flow characteristics and porosity of randomly packed beds of spheres. **Journal of Applied Mechanics**, v. 40, n. 3, p. 655-660, 1973.

BEDANE, A. H.; EIC, M.; FARMAHINI-FARAHANI, M.; XIAO, H. Water vapor transport properties of regenerated cellulose and nanofibrillated cellulose films. **Journal of Membrane Science**, v. 493, p. 46-57, 2015.

BEQUETTE, B. W. **Process Dynamics: Modeling, Analysis and Simulation**. Prentice Hall PTR: New Jersey, 1998.

BERTUCCI, V. F.; TADA, É. F. R.; THOMÉO, J. C. Modelagem e simulação de transferência de calor em tambor horizontal parcialmente preenchido com partículas orgânicas. In: **XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação**

Científica, 2017, São Carlos. Anais do XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 2017, disponível on-line.

BIZ, A.; FINKLER, A. T. J.; PITOL, L. O.; MEDINA, B. S.; KRIEGER, N.; MITCHELL, D. A. Production of pectinases by solid-state fermentation of a mixture of citrus waste and sugarcane bagasse in a pilot-scale packed-bed bioreactor. **Biochemical Engineering Journal**, v. 111, p. 54-62, 2016.

BOUYOUCOS, G. J. Effect of temperature on the movement of water vapor and capillary moisture in soils. **Journal of Agricultural Research**, v. 5, p. 141-172, 1915.

BRITO, R. C.; PÁDUA, T. F.; FREIRE, J. T.; BÉTTEGA, R. Effect of mechanical energy on the energy efficiency of spouted beds applied on drying of sorghum [*Sorghum bicolor* (L) moench]. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 117, p. 95-105, 2017.

BRUNAUER, S.; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of gases in multimolecular layers. **Journal of the American Chemical Society**, v. 60, n. 2, p. 309-319, 1938.

CAI, J.; YU, B. A discussion of the effect of tortuosity on the capillary imbibition in porous media. **Transport in porous media**, v. 89, n. 2, p. 251-263, 2011.

CAMERON, I. T.; WANG, F. Y.; IMMANUEL, C. D.; STEPANEK, F. Process system modelling and applications in granulation: A review. **Chemical Engineering Science**, v. 60, n. 14, p. 3723-3750, 2005.

CASCIATORI, F. P. **Obtenção de parâmetros físicos e térmicos para simulação e projeto de bioreactores de fermentação em estado sólido em leito fixo**. 2011. 138 f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2011.

CASCIATORI, F. P. **Produção de celulases fúngicas por fermentação em estado sólido: ampliação de escala de biorreatores de leito fixo**. 2016. 190 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2015.

CASCIATORI, F. P.; BÜCK, A.; THOMÉO, J. C.; TSOTSAS, E. Two-phase and two-dimensional model describing heat and water transfer during solid-state fermentation within a packed-bed bioreactor. **Chemical Engineering Journal**, v. 287, p. 103-116, 2016.

CASCIATORI, F. P.; LAURENTINO, C. L.; LOPES, K. C. M.; SOUZA, A. G.; THOMÉO, J. C. Stagnant Effective Thermal Conductivity of Agro-Industrial Residues for Solid-State Fermentation. **International Journal of Food Properties**, v. 16, p. 1578-1593, 2013.

CASCIATORI, F. P.; LAURENTINO, C. L.; TABOGA, S. R.; CASCIATORI, P. A.; THOMÉO, J. C. Structural properties of beds packed with agro-industrial solid by-products applicable for solid-state fermentation: Experimental data and effects on process performance. **Chemical Engineering Journal**, v. 255, p. 214-224, 2014.

CASCIATORI, F. P.; LAURENTINO, C. L.; ZANELATO, A. I.; THOMÉO, J. C. Hygroscopic properties of solid agro-industrial by-products used in solid-state fermentation. **Industrial Crops and Products**, v. 64, p. 114-123, 2015.

CASSIA-PEREIRA, J.; MARQUES, N. P.; RODRIGUES, A.; OLIVEIRA, T. B.; BOSCOLO, M.; SILVA, R.; GOMES, E.; MARTINS, D. A. B. Thermophilic fungi as new sources for production of cellulases and xylanases with potential use in sugarcane bagasse saccharification. **Journal of Applied Microbiology**, v. 118, p. 928-939, 2015.

CHAUDHURI, B.; MUZZIO, F. J.; TOMASSONE, M. S. Experimentally validated computations of heat transfer in granular materials in rotary calciners. **Powder Technology**, v. 198, p. 6-15, 2010.

CHOI, Y.; OKOS, M. R. **Physical and Chemical Properties of Food**. Martin R. Okos (Ed.). ASAE, St. Joseph, MI, p. 35-77, 1986.

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

COLBURN, A. P. Heat transfer and pressure drop in empty, baffled, and packed tubes. **Industrial & Engineering Chemistry**, v. 23, n. 8, p. 910-913, 1931.

CORONA, A.; SÁEZ, D.; AGOSIN, E. Effect of water activity on gibberellic acid production by *Gibberella fujikuroi* under solid-state fermentation conditions. **Process Biochemistry**, v. 40, p. 2655-2658, 2005.

CUNHA, L. P.; CASCIATORI, F. P.; CENÇO, I. L.; THOMÉO, J. C. Production of conidia of the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae* ICB 425 in a tray bioreactor. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 42, n. 11, p. 1757-1768, 2019.

DESSIE, W.; ZHANG, W.; XIN, F.; DONG, W.; ZHANG, M.; MA, J.; JIANG, M. Succini acid production from fruit and vegetable wastes hydrolyzed by on-site enzyme mixtures through solid state fermentation. **Bioresource Technology**, v. 247, p. 1177-1180, 2018.

DEZAM, A. P. G.; VASCONCELLOS, V. M.; LACAVAL, P. T.; FARINAS, C. S. Microbial production of organic acids by endophytic fungi. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 11, p. 282-287, 2017.

DURAND, A. Bioreactor designs for solid state fermentation. **Biochemical Engineering Journal**, v. 13, p. 113-125, 2003.

EASTMAN, E. D. Theory of the Soret effect. **Journal of the American Chemical Society**, v. 50, n. 2, p. 283-291, 1928.

EDUARDO, M. P. **Desempenho e Homogeneidade de Cultivos em Meio Sólido de *Monascus* sp. Em Biorreator do Tipo Tambor com Agitação Interna: Efeitos do Padrão de Agitação**. 2010. 145 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo, 2010.

ERGUN, S. O.; UREK, R. O. Production of ligninolytic enzymes by solid state fermentation using *Pleurotus ostreatus*. **Annals of Agrarian Science**, v. 15, p. 273-277, 2017.

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

FEDKIW, P. S.; NEWMAN, J. Mass-transfer coefficients in packed beds at very low Reynolds number. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 25, p. 935-943, 1982.

FILLIPIN, A. P.; TADA, É. F. R.; THOMÉO, J. C.; MAURO, M. A. Cinética e modelagem de secagem convectiva de fatias de maçã fuji. In: **XXXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados**. Anais do XXXVIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Maringá/PR, 2017.

FIROUZI, S.; ALIZADEH, M. R.; HAGHTALAB, D. Energy consumption and rice milling quality upon drying paddy with a newly-designed horizontal rotary dryer. **Energy**, v. 119- p. 629-636, 2017.

FREIRE, F. B.; ATXUTEGI, A.; FREIRE, J. T.; AGUADO, R.; OLAZAR, M. An adaptive lumped parameter cascade model for Orange juice solid waste drying in spouted bed. **Drying Technology**, v. 35, n. 5, p. 577-584, 2017.

FUNG, C. J.; MITCHELL, D. A. Baffles increase performance of solid-state fermentation in rotating drum bioreactors. **Biotechnology Techniques**, v. 9, p. 295-298, 1995.

GARCIA, C. **Modelagem e Simulação**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. p.22-26.

GHILDYAL, N. P.; GOWTHAMAN, M. K.; RAGHAVA RAO, K. S. M. S.; KARANTH, N. G. Interaction of transport resistances with biochemical reaction in packed-bed solid-state fermentors: Effect of temperature gradients. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 16, p. 253-257, 1994.

GHOSE, T. K. Measurement of cellulase activities. **Pure and Applied Chemistry**, v. 59, n. 2, p. 257-268, 1987.

GIESE, M. **Strömung in porösen Medien unter Berücksichtigung effektive Viskositäten**. 1998. Dissertação (Mestrado). Technik Universität Munich, Munique, 1998.

GNIELINSKI, V. New equations for heat and mass transfer in the turbulent flow in pipes and channels. **NASA STI/Recon Technical Report A**, v. 75, p. 8-16, 1975.

GNIELINSKI, V. New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow. **International Chemical Engineering**, v. 16, n. 2, p. 359-368, 1976.

GOMES, A. C. S. **Cinética de crescimento do fungo termófilo *Myceliophthora thermophila* M.7.7 em cultivo no estado sólido**. 2015. 103 f. Dissertação (Mestrado)

em Microbiologia) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2015.

GOODLING, J. S.; VACHON, R. I.; STELPFLUG, W. S.; YING, S. J.; KHADER, M. S. Radial porosity distribution in cylindrical beds packed with spheres. **Powder Technology**, v. 35, n. 1, p. 23-29, 1983.

GRAJALES, L. M. **Desenvolvimento de um biorreator rotativo para produção de enzimas celulolíticas por fermentação em estado sólido**. 2014. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2014.

GRAJALES, L. M.; XAVIER, N. M.; HENRIQUE, J. P.; THOMÉO, J. C. Mixing and motion of rice particles in a rotating drum. **Powder Technology**, v. 222, p. 167-175, 2012.

GRAJEK, W.; GERVAIS, P. Influence of water activity on the enzyme biosynthesis and enzyme activities produced by *Trichoderma viride* TS in solid-state fermentation. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 9, p. 658-662, 1987.

GRAMINHA, E. B. N.; GONÇALVES, A. Z. L.; PIROTA, R. D. P. B.; BALSALOBRE, M. A. A.; SILVA, R.; GOMES, E. Enzyme production by solid-state fermentation: Application to animal nutrition. **Animal Feed Science and Technology**, v. 144, p. 1-22, 2008.

GU, C.; ZHANG, X.; LI, B.; YUAN, Z. Study on heat and mass transfer of flexible filamentous particles in a rotary dryer. **Powder Technology**, v. 267, p. 234-239, 2014.

HASSOUNI, H.; ISMAILI-ALAOUI, M.; GAIME-PERRAUD, I.; AUGUR, C.; ROUSSOS, S. Effect of culture media and fermentation parameters on phytase production by the thermophilic fungus *Myceliophthora thermophila* in solid state fermentation. **Micologia Aplicada International**, v. 18, n. 2, p. 29-36, 2006.

HENEIN, H.; BRIMACOMBE, J. K.; WATKINSON, A. P. Experimental study of transverse bed motion in rotary kilns. **Metallurgical Transactions B**, v. 14B, n. 2, p.191-205,1983.

HERZ, F.; MITOV, I.; SPECHT, E.; STANEV. Experimental study of the contact heat transfer coefficient between the covered wall and solid bed in rotary drums. **Chemical Engineering Science**, v. 82, p. 312-318, 2012a.

HERZ, F.; MITOV, I.; SPECHT, E.; STANEV. R. Influence of operational parameters and material properties on the contact heat transfer in rotary kilns. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 55, p. 7941-7948, 2012b.

HIMMELBLAU, D. M. **Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering**, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1982.

HÖLKER, U.; HÖFER, M.; LENZ, J. Biotechnological advantages of laboratory-scale solid-state fermentation with fungi. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 64, p. 175-186, 2004.

HÖLKER, U.; LENZ, J. Solid-state fermentation – are there any biotechnological advantages? **Current Opinion in Microbiology**, v. 8, p. 301-306, 2005.

IDRIS, A. S. O.; PANDEY, A.; RAO, S. S.; SUKUMARAN, R. K. Cellulase production through solid-state tray fermentation and its use for bioethanol from sorghum stover. **Bioresource Technology**, v. 242, p. 265-271, 2017.

IGUAZ, A.; SAN MARTÍN, M. B.; MATE, J. I.; FERNANDEZ, T.; VIRSEDA, P. Modelling effective moisture diffusivity of rough rice (*Lido cultivar*) at low drying temperatures. **Journal of Food Engineering**, v. 59, n. 2-3, p. 253-258, 2003.

INAGAKI, S.; FUKUSHIMA, Y.; KURODA, K.; KURODA, K. Adsorption isotherm of water vapor and its large hysteresis of highly ordered mesoporous silica. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 180, p. 623-624, 1996.

KARABELAS, A. J.; WEGNER, T. H.; HANRATTY, T. J. Use of asymptotic relations to correlate mass transfer data in packed beds. **Chemical Engineering Science**, v. 26, n. 10, p. 1581-1589, 1971.

KARNAOURI, A. C.; TOPAKAS, E.; CHRISTAKOPOULOS, P. Cloning, expression and characterization of a thermostable GH7 endoglucanase from *Myceliophthora thermophila* capable of high-consistency enzymatic liquefaction. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 98, p. 231-242, 2014.

KAST, W.; KLAN, H. **Heat transfer by free convection: external flows**. In: VDI Heat Atlas, Abschnitt M7, Auflage. Springer Verlag: Berlin, 2010.

KOUTINAS, A. A.; WANG, R.; WEBB, C. Estimation of fungal growth in complex, heterogeneous culture. **Biochemical Engineering Journal**, v. 14, p. 93-100, 2003.

KRISCHER, O.; ESDORN, H. **Die Wärmeübertragung in feuchten, porigen Stoffen verschiedener Struktur**. Forschung auf dem Gebiet des Ingenieurwesens A, v. 22, n. 1, p. 1-8, 1956.

KWAPINSKA, M.; SAAGE, G.; TSOTSAS, E. Continuous versus discrete modelling of heat transfer to agitated beds. **Powder Technology**, v. 181, p. 331-342, 2008.

LAN, X. K.; KHODADADI, J. M. Fluid-Flow and Heat-Transfer through a Porous-Medium Channel with Permeable Walls. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 36, n. 8, p. 2242-2245, 1993.

LANGMUIR, I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum. **Journal of the American Chemical Society**, v. 40, n. 9, p. 1361-1403, 1918.

LEBEDEFF, A. F. **The movement of ground and soil waters**. 1927.

LU, W.; LI, D.; WU, Y. Influence of water activity and temperature on xylanase biosynthesis in pilot-scale solid-state fermentation by *Aspergillus sulphureus*. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 32, p. 305-311, 2003.

LUIKOV, A. V. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary-porous bodies. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 18, n. 1, p. 1-14, 1975.

LYBAERT, P. Wall-particles heat transfer in rotating heat exchanges. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 30, p. 1663-1672, 1987.

MARQUES, N. P.; PEREIRA, J. C.; GOMES, E.; SILVA, R.; ARAÚJO, A. R.; FERREIRA, H.; RODRIGUES, A.; DUSSÁN, K. J.; BOCCHINI, D. A. Cellulases and xylanases production by endophytic fungi by solid state fermentation using lignocellulosic substrates and enzymatic saccharification of pretreated sugarcane bagasse. **Industrial Crops and Products**, v. 122, p. 66-75, 2018.

MARTIN, H. Low Peclet number particle-to-fluid heat and mass transfer in packed beds. **Chemical Engineering Science**, v. 33, n. 7, p. 913-919, 1978.

MARTINI, W. R.; CHURCHILL, S. W. Natural Convection Inside a Horizontal Cylinder. **American Institute of Chemical Engineers Journal**, v. 6, n. 2, p. 251-257, 1960.

MELIKOGLU, M.; LIN, C. S. K.; WEBB, C. Solid state fermentation of waste bread pieces by *Aspergillus awamori*: Analyzing the effects of airflow rate on enzyme production in packed bed bioreactors. **Food and Bioproducts Processing**, v. 95, p. 63-75, 2015.

MENDES, F. B.; CHAUX, A. M.; THOMÉO, J. C. Efeito da umidade nas propriedades físicas e estruturais do bagaço de cana. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 6401-6408, 2015.

MIKKOLA, V.; PUUPPONEN, S.; GRANBOHM, H.; SAARI, K.; ALA-NISSILA, T.; SEPPÄLÄ, A. Influence of particle properties on convective heat transfer of nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 124, p. 187-195, 2018.

MILLER, G. L. Use of Dinitrosalicylic Acid Reagent for Determination of Reducing Sugar. **Analytical Chemistry**, v. 31, p. 426-428, 1959.

MIRANDA, M. N. N. **Difusividade efetiva de água em misturas de sólidos porosos**. 2007. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

MITCHELL, D. A.; LUZ, L. F. L.; KRIEGER, N.; BEROVIČ, M. **Bioreactors for Solid-State Fermentation**. In: *Comprehensive Biotechnology (Second Edition)*. Academic Press, p. 347-360. 2011.

MITCHELL, D. A.; PANDEY, A.; SANGSURASAK, P.; KRIEGER, N. Scale-up strategies for packed-bed bioreactors for solid-state fermentation. **Process Biochemistry**, v. 35, p. 167-178, 1999.

MITCHELL, D. A.; TONGTA, A.; STUART, D. M.; KRIEGER, N. The potential for establishment of axial temperature profiles during solid-state fermentation in rotating drum bioreactors. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 80, n. 1, p. 113-122, 2002.

MITCHELL, D. A.; VON MEIEN, O. F.; KRIEGER, N. Recent developments in modeling of solid-state fermentation: heat and mass transfer in bioreactors. **Biochemical Engineering Journal**, v. 13, n. 2-3, p. 137-147, 2003.

MITCHELL, D. A.; VON MEIEN, O. F.; KRIEGER, N.; DALSENTER, F. D. H. A review of recent developments in modeling of microbial growth kinetics and intraparticle

phenomena in solid-state fermentation. **Biochemical Engineering Journal**, v. 17, p. 15-26, 2004.

MOHSENI, M.; PETERS, B. Effects of particle size distribution on drying characteristics in a drum by XDEM: A case study. **Chemical Engineering Science**, v. 152, p. 689-698, 2016.

MORTIMER, R. G.; EYRING, H. Elementary transition state theory of the Soret and Dufour effects. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 77, n. 4, p. 1728-1731, 1980.

MUELLER, G. E. Radial porosity in packed beds of spheres. **Powder Technology**, v. 203, n. 3, p. 626-633, 2010.

NAFSUN, A. I.; HERZ, F. Experiments on the temperature distribution in the solid bed pf rotary drums. **Applied Thermal Engineering**, v. 103, p. 1039-1047, 2016.

NAGEL, F. J. I. **Process control of solid-state fermentation: Simultaneous control of temperature and moisture content**. 2002. 191 f. PhD. Thesis – Wageningen Universiteit, 2002.

NAGEL, F. J. J. I.; TRAMPER, J.; BAKKER, M. S. N.; RINZEMA, A. Model for On-Line Moisture-Content Control During Solid-State Fermentation. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 72, n. 2, p. 231-243, 2001.

ORIOLE, E.; RAIMBAULT, M.; ROUSSOS, S.; VINIEGRA-GONZALES, G. Water and water activity in the solid state fermentation of cassava starch by *Aspergillus niger*. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 27, p. 498-503, 1988.

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

PANDEY, A.; ASHAKUMARY, D.; SELVAKUMAR, P.; VIJAYALAKSHMI, K. S. Influence of water activity on growth and activity of *Aspergillus niger* for glycoamylase production in solid-state fermentation. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 10, n. 4, p. 485-486, 1994.

PANDEY, A.; SOCCOL, C. R.; NIGAM, P.; SOCCOL, V. T. Biotechnological potential of agro-industrial residues. I: sugarcane bagasse. **Bioresource Technology**, v. 74, p. 69-80, 2000.

PELEG, M. An empirical model for the description of moisture sorption curves. **Journal of Food Science**, v. 53, n. 4, p. 1216-1217, 1988.

PENGNOI, P.; MAHAWAN, R.; KHANONGNUCH, C.; LUMYONG, S. Antioxidant properties and production on Monacolin K, citrinin, and red pigments during solid state fermentation of purple rice (*Oryzae sativa*) varieties by *Monascus purpureus*. **Czech Journal of Food Sciences**, v. 35, p. 32-39, 2017.

PEREZ, C. L. **Avaliação da viabilidade técnica da ampliação de escala da produção de enzimas celulolíticas e hemicelulolíticas por FES em biorreatores de leite empacotado**. 2017. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de

Alimentos) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São José do Rio Preto, 2017.

PEREZ, C. L.; CASCIATORI, F. P.; THOMÉO, J. C. Strategies for scaling-up packed-bed bioreactors for solid-state fermentation: The case of cellulolytic enzymes production by a thermophilic fungus. **Chemical Engineering Journal**, v. 361, p. 1142-1151, 2019.

PERRY, R. H.; CHITON, C. H. **Chemical Engineer's Handbook**, McGraw-Hill, 1973

PESARAN, A. A.; MILLS, A. F. Moisture Transport in Silica Gel Packed Beds: Experimental Study. II. **Solar Energy Research Institute**, 1986.

PHILLIP, J. R.; DE VRIES, D. A. Moisture movement in porous materials under temperature gradients. **Transactions American Geophysical Union**, v. 38, n. 2, p. 222-232, 1957.

PIA, G.; CASNEDI, L. Heat transfer in high porous alumina: Experimental data interpretation by different modelling approaches. **Ceramics International**, v. 43, n. 12, p. 9184-9190, 2017.

PIETSCH, W. B. **Agglomeration processes: phenomena, technologies, equipment**. John Wiley & Sons, 2008.

PRIETO, M. G. S. **Alternativas de cogeração na indústria sucro-alcooleira: estudo de caso**. 2003. 282 f. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

RAGHAVARAO, K. S. M. S.; RANGANATHAN, T. V.; KARANTH, N. G. Some engineering aspects of solid-state fermentation. **Biochemical Engineering Journal**, v. 13, p. 127-135, 2003.

RAHARDJO, Y. S. P.; SIE, S.; WEBER, F. J.; TRAMPER, J.; RINZEMA, A. Effect of low oxygen concentrations on growth and α -amylase production of *Aspergillus oryzae* in model solid-state fermentation systems. **Biomolecular Engineering**, v. 21, p. 163-172, 2005.

RAITHBY, G. D.; HOLLANDS, K. G. T. **A general method of obtaining approximate solutions to laminar and turbulent free convection problems**. In: Advances in heat transfer. Elsevier, 1975. p. 265-315, 1975.

RAJAGOPALAN, S.; MODAK, J. M. Heat and mass transfer simulation studies for solid-state fermentation processes. **Chemical Engineering Science**, v. 49, n. 13, p. 2187-2193, 1994.

RAJAGOPALAN, S.; MODAK, J. M. Modeling of heat and mass transfer for solid state fermentation process in tray bioreactor. **Bioprocess Engineering**, v. 13, p. 161-169, 1995.

REU, J. C.; ZWIETERING, M. H.; ROMBOUTS, F. M.; NOUT, M. J. R. Temperature control in solid substrate fermentation through discontinuous rotation. **Applied Microbiology and Technology**, v. 40, p. 261-265, 1993.

RICKEN, T. **Transport of fluids in capillary porous solids**. PAMM, v. 2, n. 1, p. 384-385, 2003.

ROBLEE, L. H. S.; BAIRD, R. M.; TIERNEY, J. W. Radial porosity variations in packed beds. **AIChE Journal**, v. 4, n. 4, p. 460-464, 1958.

ROCHA, G.J.M.; MARTIN, C.; SOARES, I.B.; SOUTOMAIOR, A. M.; BAUDEL, H. M.; de ABREU, C. A. M. Dilute mixed-acid pretreatment of sugarcane bagasse for ethanol production, **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 1, p. 663–670, 2011.

ROCHA, G. J. M.; NASCIMENTO, V. M.; GONÇALVES, A. R.; SILVA, V. F. N.; MARTÍN, C. Influence of mixed sugarcane bagasse samples evaluated by elemental and physical-chemical composition. **Industrial Crops and Products**, v. 64, p. 52-58, 2015.

RODRÍGUEZ-ZÚÑIGA, U. F.; FARINAS, C. S.; BERTUCCI NETO, V.; COURI, S.; CRESTANA, S. Produção de celulases por *Aspergillus niger* por fermentação em estado sólido. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 8, p. 912-919, 2011.

SAITHI, S.; BORG, J.; NOPHARATANA, M.; TONGTA, A. Mathematical modeling of biomass and enzyme production kinetics by *Aspergillus niger* in solid-state fermentation at various temperatures and moisture contents. **Journal of Microbial & Biochemical Technology**, v. 8, p. 123-130, 2016.

SANGSURASAK, P.; MITCHELL, D. A. Incorporation of death kinetics into a 2-dimensional dynamic heat transfer model for solid state fermentation. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 64, n. 3, p. 253-260, 1995b.

SANGSURASAK, P.; MITCHELL, D. A. The investigation of transient multidimensional heat transfer in solid state fermentation. **The Chemical Engineering Journal and The Biochemical Engineering Journal**, v. 60, p. 199-204, 1995a.

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, 1998.

SAUCEDO-CASTAÑEDA, G.; GUTIÉRREZ-ROJAS, M.; BACQUET, G.; RAIMBAULT, M.; VINIEGRA-GONZÁLEZ, G. Heat transfer simulation in solid substrate fermentation. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 35, n. 8, p. 802-808, 1990.

SAXTON, R. L.; DOUGHERTY, E. L.; DRICKAMER, H. G. Thermal diffusion in binary liquid mixtures of molecules of simple symmetry. **The Journal of Chemical Physics**, v. 22, n. 7, p. 1166-1168, 1954.

SCHLÜNDER, E. U. **Einführung in die Wärme-und Stoffübertragung**, 2nd Edn. p. 74, Vieweg, Braunschweig, 1975.

SCHLÜNDER, E. U. Wärme- und Stoffübertragung zwischen durchströmten Schüttungen und darin eingebetteten Einzelkörpern. **Chemie Ingenieur Technik**, v. 38, n. 9, p. 967-979, 1966.

SCHUTYSER, M. A. I.; PADDING, J. T.; WEBER, F. J.; BRIELS, W. J.; RINZEMA, A.; BOOM, B. Discrete particle simulations predicting mixing behavior of solid substrate particles in a rotating drum fermenter. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 75, n. 6, p. 666-675, 2001.

SCHUTYSER, M. A. I.; WEBER, F. J.; BRIELS, W. J.; RINZEMA, A.; BOOM, R. M. Heat and water transfer in a rotating drum containing solid substrate particles. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 82, n. 5, p. 553-563, 2003.

SILVA, G. F. A. **Influência dos macronutrientes no crescimento de *Myceliophthora thermophila* I-1D3b em cultivo submerso**. 2017. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. 2017.

SIMAL, S.; DEYA, E.; FRAU, M.; ROSSELLO, C. Simple modelling of air drying curves of fresh and osmotically pre-dehydrated apple cubes. **Journal of Food Engineering**, v. 33, n. 1-2, p. 139-150, 1997.

SINGHANIA, R. R.; PATEL, A. K.; SOCCOL, C. R.; PANDEY, A. Recent advances in solid-state fermentation. **Biochemical Engineering Journal**, v. 44, p. 13-18, 2009.

SMITS, J. P.; RINZEMA, A.; TRAMPER, J.; CAN SONSBECK, H. M.; HAGE, J. C.; KAYNAK, A.; KNOL, W. The influence of temperature on kinetics in solid-state fermentation. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 22, p. 50-57, 1998.

SOARES, L. C. S. R. **Destoxificação biológica do hidrolisado hemicelulósico de bagaço de cana-de-açúcar para utilização em processos fermentativos**. 2012. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia Industrial na Área de Microbiologia Aplicada) – Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, Lorena, 2012.

SOCCOL, C. R.; COSTA, E. S. F.; LETTI, L. A. J.; KARP, S. G.; WOICIECHOWSKI, A. L.; WANDENBERGHE, L. P. S. Recent developments and innovations in solid state fermentation. **Biotechnology Research and Innovation**, v. 1, p. 52-71, 2017.

SRIANTA, I.; ZUBAIDAH, E.; ESTIASIH, T.; YAMADA, M.; HARIJONO. Comparison of *Monascus purpureus* growth, pigment production and composition on different cereal substrates with solid state fermentation. **Biocatalysis and Agricultural Biotechnology**, v. 7, p. 181-186, 2016.

STUART, D. M.; MITCHELL, D. A. Mathematical model of heat transfer during solid-state fermentation in well-mixed rotating drum bioreactors. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 78, p. 1180-1192, 2003.

STUART, D. M.; MITCHELL, D. A.; JOHNS, M. R.; LITSTER, J. D. Solid-state fermentation In rotating drum bioreactors: Operating variables affect performance through their effects on transport phenomena. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 63, n. 4, p. 382-391, 1999.

SZEWCZYK, K. W.; MYSZKA, L. The effect of temperature on the growth of *A. niger* in solid state fermentation. **Bioprocess Engineering**, v. 30, p. 123-126, 1994.

TADA, E. F. R.; BÜCK, A.; CASCIATORI, F. P.; TSOTSAS, E.; THOMÉO, J. C. Investigation of heat transfer in partially filled horizontal drums. **Chemical Engineering Journal**, v. 316, p. 988-1003, 2017a.

TADA, É. F. R.; BÜCK, A.; TSOTSAS, E.; THOMÉO, J. C. Mass transport in a partially filled horizontal drum: Modelling and experiments. **Chemical Engineering Science**, v. 214, p. 1-18, 2020.

TADA, É. F. R.; GRAJALES, L. M.; LEMOS, Y. P.; THOMÉO, J. C. Mixture and motion of sugar cane bagasse in a rotating drum. **Powder Technology**, v. 317, p. 30-309, 2017b.

TADA, É. F. R.; GRAJALES, L. M.; THOMÉO, J. C. Water holding capacity and heat transfer aspects of a mixture of sugar cane bagasse and wheat bran in a partially filled rotating drum. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 36, p. 1131-1141, 2019.

TADA, É. F. R.; LUCAS, G. T.; ONOFRE, L. A. G. C.; PEREZ, C. L.; THOMÉO, J. C. Influence of scale up on endoglucanase production in solid cultivation in horizontal drum bioreactor. In: **XXI Simpósio Nacional de Bioprocessos e XII Simpósio de Hidrólise Enzimática de Biomassas**, 2017, Aracaju. Anais do XXI Simpósio Nacional de Bioprocessos e XII Simpósio de Hidrólise Enzimática de Biomassas, 2017c, disponível on-line.

TARHAN, S.; TELCI, I.; TUNCAY, M. T.; POLATCI, H. Product quality and energy consumption when drying peppermint by rotary drum dryer. **Industrial Crops and Products**, v. 32, p. 420-427, 2010.

THOMÉO, J. C. **Análise experimental dos efeitos de entrada térmicos sobre os coeficientes de transferência de calor em leito fixo**. 1990. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1990.

THOMÉO, J. C., FREIRE, J. T. **Transferência de calor em leitos fixos: avanços a partir da década de 90**. In: Fenômenos de transporte em sistemas particulados. J. T. Freire, Ed. Suprema, 2009.

VAFI, K.; KHALED, A. R. A. Analysis of flexible microchannel heat sink systems. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 48, n. 9, p. 1739-1746, 2005.

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

VICINI, G.; MITCHELL, D. A.; BOIT, S. D.; GERN, J. C.; ROSA, A. S. da; COSTA, R. M.; DALSENTER, F. D. H.; VON MEIEN, O. F.; KRIEGER, N. Analysis of growth kinetic profiles in solid-state fermentation. **Food Technology and Biotechnology**, v. 39, p. 271-294, 2001.

VON MEIEN, O. F.; MITCHELL, D. A. A two-phase model for water and heat transfer within an intermittently-mixed solid-state fermentation bioreactor with forced aeration. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 79, p. 416-428, 2002.

WANG, E. Q., LI, S., TAO, L., GENG, X., LI, T. Modeling of rotating drum bioreactor for anaerobic solid-state fermentation. **Applied Energy**, v. 87, n. 9, p. 2839-2845, 2010.

WES, G. W. J., DRINKENBURG, A. A. H., STEMERDING, S. Heat transfer in a horizontal rotary drum reactor. **Powder Technology**, v. 13, p. 185-192, 1976.

WIEGNANT, W. M. Growth characteristics of the thermophilic fungus *Scytalidium thermophilum* in relation to production of mushroom compost. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 58, n. 4, p. 1301-1307, 1992.

WIEGNANT, W. M.; WERY, J.; BUI THENHUIS, E. T.; BONT, J. A. M. Growth-promoting effect of thermophilic fungi on the mycelium of the edible mushroom *Agaricus bisporus*. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 58, n. 8, p. 2654-2659, 1992.

WINTERBERG, M.; TSOTSAS, E. Correlations for effective heat transport coefficients in beds packed with cylindrical particles. **Chemical Engineering Science**, v. 55, p. 5937-5943, 2000.

WINTERBERG, M.; TSOTSAS, E.; KRISCHKE, A.; VORTMEYER, D. A simple and coherent set of coefficients for modelling of heat and mass transport with and without chemical reaction in tubes filled with spheres. **Chemical Engineering Science**, v. 55, p. 967-979, 2000.

WOLF, C.; GUILLARD, V.; ANGELLIER-COUSSY, H.; SILVA, G. G. D.; GONTARD, N. Water vapor sorption and diffusion in wheat straw particles and their impact on the mass transfer properties of biocomposites. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 133, n. 16, 2016.

YAGI, S.; WAKAO, N. Heat and mass transfer from wall to fluid in packed beds. **AIChE Journal**, v. 5, n. 1, p. 79-85, 1959.

ZANELATO, A. I.; SHIOTA, V. M.; GOMES, E.; SILVA, R.; THOMÉO, J. C. Endoglucanase production with the newly isolated *Myceliophthora* sp. I-1D3b in a packed bed solid state fermentor. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 43, p. 1536-1544, 2012.

ZEHNER, P.; SCHLÜNDER, E. U. Wärmeleitfähigkeit von Schüttungen bei mäßigen Temperaturen. **Chemie Ingenieur Technik**, v. 45, n. 14, p. 933-941, 1970.