

## RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 07/03/2018.



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

Érika Fernanda Rezendes Tada

**Modelagem e simulação de transferência de calor em leito de  
partículas estacionárias sujeito a agitação intermitente**

São José do Rio Preto  
2016

Érika Fernanda Rezendes Tada

**Modelagem e simulação de transferência de calor em leito de  
partículas estacionárias sujeito a agitação intermitente**

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  
2016

Tada, Érika Fernanda Rezendes.

Modelagem e simulação de transferência de calor em leito de partículas estacionárias sujeito a agitação intermitente / Érika Fernanda Rezendes Tada. -- São José do Rio Preto, 2016  
115 f. : il., tabs.

Orientador: João Cláudio Thoméo

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas

1. Tecnologia de alimentos. 2. Biorreatores. 3. Calor – Transmissão. 4. Fermentação em estado sólido. 5. Superfícies – Modelos. 6. Métodos de simulação. I. Thoméo, João Cláudio. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas. III. Título.

CDU – 66:577.1

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do IBILCE  
UNESP - Câmpus de São José do Rio Preto

Érika Fernanda Rezendes Tada

**Modelagem e simulação de transferência de calor em leito de partículas estacionárias sujeito a agitação intermitente**

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.

Comissão Examinadora

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

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Fernanda Perpétua Casciotori  
UFSCar – Buri

Prof. Dr. Harvey Alexander Villa Vélez  
UNIFEV – Votuporanga

São José do Rio Preto  
07 de março de 2016

Ao meu amado irmão,  
George Felipe,  
e ao nosso inesquecível amigo B.

Dedico.

# Agradecimentos

---

A Deus, Criador de todas as coisas, por ter olhado por mim em todos os momentos, cuidado daqueles que são importantes pra mim e sustentado os meus objetivos.

À minha família, por estar sempre ao meu lado e não repreender as minhas escolhas, mesmo que estas implicassem em distância e ausência. Obrigada em especial ao meu irmão, que é o meu exemplo e a minha inspiração. Serei sempre admiradora de quem você é e de quem me inspira a ser. Obrigada sempre!

Ao meu querido orientador, Prof. Dr. João Cláudio Thoméo, agradeço a Deus por ter lhe concedido o dom de propagar seus conhecimentos de forma incomparável, pela sua saúde e disposição. Ainda tenho muito a aprender com o senhor. Obrigada!

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Fernanda Casciatori, pela amizade, incentivo, pela ajuda concedida durante o desenvolvimento deste trabalho e pela participação na banca. Obrigada sempre, Fer!

Ao Prof. Dr. Harvey Villa, pela amizade e sugestões para melhoria deste estudo. Obrigada!

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria do Carmo Ferreira e à Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Aparecida Mauro, por terem aceitado o convite para participação na comissão examinadora deste trabalho.

Ao Prof. Dr.-Ing. Andreas Bück, pelas valiosas dicas e incansáveis explicações. Muito obrigada!

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão de bolsa de mestrado durante este período.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo incentivo financeiro.

Às amizades carinhosamente cultivadas durante este período, agradeço por tornarem esta jornada mais leve e agradável. Em especial, muito obrigada Eduardo pela paciência em explicar o funcionamento do biorreator.

Aos técnicos Luiz e Ginaldo, obrigada pela atenção sempre e à Natália, pela eficiência e amizade.

Aos colegas do laboratório, com os quais dividi momentos de alegria, sofrimento por antecipação e pude exercitar o dom da paciência. Muitos momentos ainda virão!

Gisandro, obrigada pela atenção, pela companhia e pelo carinho dispensado durante boa parte do desenvolvimento deste trabalho. Meu carinho por você só aumenta!

A todos os professores que me ajudaram na construção de um conhecimento sólido, obrigada.

Aos meus familiares por todo incentivo e àquelas pessoas que, em algum momento, estiveram ao meu lado durante esta caminhada. Obrigada!

Obrigada, com toda a ternura do meu coração!



“Conheça todas as teorias,  
domine todas as técnicas,  
mas ao tocar uma alma  
humana, seja apenas outra  
alma humana.”

Carl Jung

## RESUMO

Esta dissertação apresenta um estudo sobre transferência de calor em leito de esferas de vidro colocado em um tambor horizontal parcialmente preenchido, construído para fermentação em estado sólido, através de modelagem e simulação. Foram analisadas duas situações: aeração sobre a superfície do leito de partículas, e ausência de aeração com presença de resistência elétrica em meio ao leito. Durante os experimentos, a temperatura de operação foi de 45°C e, quando em presença de resistência elétrica, a potência dissipada foi mantida constante. Foram coletados dados de temperatura de diferentes posições no interior do leito para os graus de enchimento 0,2 e 0,4. Os modelos propostos foram escritos em linguagem *Matlab* e validados através do coeficiente  $R^2$  entre os dados experimentais e simulados. Para a situação com aeração sobre a superfície do leito, a transferência de calor no leito de esferas de vidro foi descrita através de um modelo unidimensional a uma fase, com variação de temperatura em função da posição radial, com contornos convectivos na superfície ( $h$ ) e na parede do tambor ( $h_p$ ). Na superfície,  $h$  foi estimado experimentalmente e, na parede,  $h_p$  foi estimado por meio de análise de sensibilidade paramétrica juntamente com o parâmetro  $k$ , tomando  $R^2$  como resposta analisada. Para a situação em presença da resistência elétrica e ausência de aeração, foi validado um modelo bidimensional a uma fase com variação da temperatura em função das posições angular e radial. Os contornos na parede e superfície do leito foram os mesmos da situação anterior mesmo em ausência de introdução de ar no sistema, e a presença da resistência em meio ao leito de partículas foi interpretada como um contorno de fluxo constante. Os parâmetros  $h$  (superfície),  $k$  e  $h_p$  foram estimados através de análise de sensibilidade paramétrica através de  $R^2$  ( $R^2 \geq 0,87$ ). Os perfis de temperatura obtidos através de simulação apresentaram boa concordância com os dados experimentais.

Palavras-chave: Tambor rotativo, Transferência de calor, Fermentação em Estado Sólido, Modelagem e simulação.

## **ABSTRACT**

*This work presents a study about heat transfer in spheres glass bed put in horizontal drum partially filled, built to solid state fermentation, using modeling and simulation tools. Two situations were analyzed: aeration above the bed surface, and absence of aeration with presence of electric resistance. During the experiments, the operation temperature was 45°C and, when with electric resistance, the dissipated potency was maintained constant. It was collected temperature data at different positions in the bed for filling degree of 0,2 and 0,4. The proposed models were written in Matlab language and the validation occurs by comparison of simulation and experimental data. With aeration above the bed surface, the heat transfer was represented by one-phase and unidimensional model, which temperature varies with radial position, with convective contour on the bed surface ( $h$ ) and wall drum ( $h_p$ ). On surface,  $h$  was experimentally estimated and, on wall drum,  $h_p$  was estimated using parametric sensibility analysis along with parameter  $k$ , with  $R^2$  as response analyzed. When with electric resistance and absence of aeration, was validated a one-phase bidimensional model with temperature in function angular and radial positions. The contours employed on the wall drum and bed surface were the same as previous situation, and the presence of resistance was interpreted as a contour of constant flow. The parameters  $h$  (surface),  $k$  e  $h_p$  were estimated using a parametric sensibility analysis with  $R^2$  ( $R^2 \geq 0,87$ ). The temperature profiles obtained by simulation present good according with experimental data.*

**Keywords:** *Rotary drum, Heat transfer, Solid State Fermentation, Modeling and simulation.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3. 1 - Esquema do biorreator do tipo tambor rotativo de bancada apresentado e desenvolvido por Grajales (2014). .....	8
Figura 4. 1 – Vista longitudinal do tambor rotativo com introdução de ar através de um tubo com configuração em Z. ....	23
Figura 4. 2 – Diagrama esquemático do sistema utilizado para aquecimento de ar.....	24
Figura 4. 3 – Vista longitudinal do tambor rotativo com tubo interno em meio ao leito de partículas.....	24
Figura 4. 4 - Vista horizontal da disposição de termopares no tubo. G1: Grupo 1; G2: Grupo 2; G3: Grupo 3; G4: Grupo 4. S: próximo à superfície do leito; L: centro do leito; P: próximo à parede do tambor.....	25
Figura 4. 5 – Vista frontal do leito de partículas para a situação em que o ar é introduzido sobre o leito de partículas. $\theta_0$ : ângulo inicial 0; $\theta_f$ : ângulo final. ....	26
Figura 4. 6 – Vista frontal do leito de partículas para a situação em que a resistência elétrica cilíndrica foi admitida em meio às partículas. $\theta_0$ : ângulo inicial 0; $\theta_f$ : ângulo final.....	26
Figura 4. 7 – Representação da região a que se aplicam as condições de contorno para a situação em presença de resistência elétrica tubular em meio ao leito de partículas. ....	31
Figura 4. 8 – Diagrama esquemático do ângulo e raio do leito de partículas para grau de enchimento inferior a 0,5.....	38
Figura 4. 9 – Informações calculadas pelo programa para obtenção dos diferentes raios do leito. ....	39

Figura 4. 10 – Diagrama esquemático do aparato utilizado para determinação experimental do coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h$ ).....	42
Figura 4. 11 – Localização dos termopares tipo T na superfície da resistência em placa plana. ....	43
Figura 5.1 – Temperatura do ar para ensaio com tambor vazio para as mesmas posições angulares e radiais S, L e P, onde as posições axiais 1 e 3, e 2 e 4 denotam as mesmas posições angulares e radiais, com temperaturas da parede interna e ar de entrada a 45°C, em regime permanente.....	48
Figura 5.2 - Temperatura nas posições axiais 1 e 3 de termopares, localizadas nas mesmas posições angular e radial ( $f = 0,2$ ; $T_a = 25^\circ\text{C}$ ; $T_p = 25^\circ\text{C}$ ; $T_0 = 41,8^\circ\text{C}$ ; ar a 5 L/min). ....	49
Figura 5. 3 – Temperatura nas posições axiais 2 e 4 de termopares, localizadas nas mesmas posições angular e radial ( $f = 0,2$ ; $T_a = 25^\circ\text{C}$ ; $T_p = 25^\circ\text{C}$ ; $T_0 = 41,8^\circ\text{C}$ ; ar a 5 L/min). ....	50
Figura 5. 4 – Análise de sensibilidade paramétrica do modelo aos parâmetros $k_{st}$ e $h$ ...	51
Figura 5. 5 – Perfis de temperatura gerados através de simulação de transferência de calor em leito de esferas de vidro colocado em tambor horizontal para grau de enchimento de 0,4, $k_{st} = 0,2 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ , $h = 4,4 \text{ W/}^\circ\text{C m}^2$ e $t = 5$ horas de simulação, quando considerada condição de primeira espécie na parede do tambor, a partir de um modelo bidimensional e de um modelo unidimensional. ....	57
Figura 5. 6 – Perfil de temperatura gerado através de simulação de transferência de calor em leito de esferas de vidro colocado em tambor horizontal para grau de enchimento de 0,4, $k_{st} = 0,2 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ , $h = 4,4 \text{ W/}^\circ\text{C m}^2$ e $t = 5$ horas de simulação, utilizando o pacote de soluções de equações diferenciais parciais <i>ToolBox</i> , disponível no Matlab <sup>®</sup> 2015. .	58
Figura 5. 7 – Perfil de temperatura gerado através de simulação de transferência de calor em leito de esferas de vidro colocado em tambor horizontal para grau de enchimento de	

0,4,  $k_{st} = 0,2 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ ,  $h = 4,4 \text{ W}/^\circ\text{C m}^2$  e  $t = 8$  horas de simulação, utilizando o pacote de soluções de equações diferenciais parciais *ToolBox*, disponível no Matlab<sup>®</sup> 2015, com domínio em grids regular e refinado..... 59

Figura 5. 8 – Distribuições de temperatura geradas através de simulação de transferência de calor em leito de esferas de vidro colocado em tambor horizontal para grau de enchimento de 0,3 e 0,4,  $k_{st} = 0,2 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ ,  $h = 4,4 \text{ W}/^\circ\text{C m}^2$  e tempos de 2, 6 e 10 horas de simulação, a partir de um modelo unidimensional a uma fase quando considerado contorno de primeira espécie na parede do tambor. .... 61

Figura 5. 9 – Distribuições de temperatura geradas através de simulação de transferência de calor em leito de esferas de vidro colocado em tambor horizontal para grau de enchimento de 0,4,  $k_{st} = 0,2 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ ,  $h_p = 1 \text{ W}/^\circ\text{C m}^2$  e  $h = 4,4 \text{ W}/^\circ\text{C m}^2$  e tempos de 2, 6 e 10 horas de simulação, a partir de um modelo unidimensional a uma fase quando considerado contorno de terceira espécie na parede do tambor. .... 62

Figura 5. 10 – Distribuições de temperatura geradas através de simulação de transferência de calor em leito de esferas de vidro colocado em tambor horizontal para diferentes combinações de  $k_{st}$  e  $h$ , nos instantes 2, 5 e 10 horas de simulação, para grau de enchimento 0,2 e contorno de primeira espécie na parede do tambor..... 64

Figura 5. 11 – Distribuições de temperatura geradas através de simulação de transferência de calor em leito de esferas de vidro colocado em tambor horizontal para  $h = 4,4 \text{ W}/^\circ\text{C m}^2$  e diferentes  $k_{st}$ , no instante 6 horas de simulação, para grau de enchimento 0,2. .... 66

Figura 5. 12 – Distribuições de temperatura geradas através de simulação de transferência de calor em leito de esferas de vidro colocado em tambor horizontal para diferentes  $k$ ,  $h_p$  e tempos de simulação, para grau de enchimento de 0,4, considerando contorno de terceira espécie na parede do tambor e  $h$  de  $4,4 \text{ W}/^\circ\text{C m}^2$  entre a superfície do leito e o ar no sobre espaço..... 68

Figura 5. 13 – Distribuições de temperatura geradas através de simulação de transferência de calor em leito de esferas de vidro colocado em tambor horizontal para diferentes  $k$ ,  $h_p$  e tempos de simulação,  $h = 4,4 \text{ W/}^\circ\text{C m}^2$ , para grau de enchimento de 0,4, considerando contorno de terceira espécie na parede do tambor. .... 69

Figura 5. 14 - Distribuições de temperatura geradas através de simulação de transferência de calor em leito de esferas de vidro colocado em tambor horizontal para  $k_{st}$  de 0,20 W/m  $^\circ\text{C}$  e tempo de simulação de 5 horas para grau de enchimento de 0,2, considerando a presença de resistência elétrica em meio ao leito de partículas como (a) contorno de primeira espécie, (b) contorno de segunda espécie e (c) geração de calor, com contorno de primeira espécie na parede do tambor. .... 71

Figura 5. 15 – Distribuições de temperatura geradas através de simulação de transferência de calor em leito de esferas de vidro colocado em tambor horizontal para grau de enchimento de 0,2,  $k_{st} = 0,2 \text{ W/m }^\circ\text{C}$  e  $t = 5$  horas de simulação, utilizando o pacote de soluções de equações diferenciais parciais *ToolBox*, disponível no Matlab<sup>®</sup> 2015, com contorno de primeira espécie na parede do tambor e presença de resistência elétrica em meio ao leito de partículas como (a) contorno de primeira espécie, (b) contorno de segunda espécie e (c) geração de calor. .... 73

Figura 5. 16 – Distribuições de temperatura geradas a partir de modelo bidimensional a uma fase com resistência elétrica em meio ao leito de partícula como termo de geração de calor adicionado ao modelo (a) e modelo bidimensional a uma fase sem resistência elétrica e com aeração sobre o leito de partículas,  $h = 4,4 \text{ W/}^\circ\text{C m}^2$  (b), para grau de enchimento de 0,2,  $k_{st}$  de 0,20W/m  $^\circ\text{C}$  e tempo de 4 horas, considerando contorno de primeira espécie na parede do tambor em ambos os casos. .... 74

Figura 5. 17 - Distribuições de temperatura geradas através de simulação de transferência de calor em leito de esferas de vidro colocado em tambor horizontal para diferentes  $k_{st}$  e tempo de simulação de 5 horas para grau de enchimento de 0,4, considerando a presença de resistência elétrica em meio ao leito de partículas de diferentes maneiras e contorno de primeira espécie na parede do tambor. .... 75

Figura 5. 18 - Distribuições de temperatura geradas através de simulação de transferência de calor em leito de esferas de vidro colocado em tambor horizontal para diferentes combinações de  $k$  e  $h_p$ , considerando contorno de terceira espécie na parede do tambor, e tempo de simulação de 3 e 8 horas para grau de enchimento de 0,4, com a presença de resistência elétrica em meio ao leito de partículas como (a) contorno de primeira espécie, (b) contorno de segunda espécie e (c) geração de calor..... 77

Figura 5. 19 - Distribuições de temperatura geradas através de simulação de transferência de calor em leito de esferas de vidro colocado em tambor horizontal com a presença de resistência elétrica em meio ao leito de partículas como contorno de primeira espécie e grau de enchimento de 0,4. Situação (\*): contorno convectivo na parede do tambor,  $k = 0,29 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ ,  $h_p = 0,5 \text{ W/}^\circ\text{C m}^2$  e tempo de 8 horas. Situação (\*\*): contorno de primeira espécie na parede do tambor,  $k_{st} = 0,28 \text{ W/}^\circ\text{C m}^2$  e tempo de 5 horas. .... 80

Figura 5. 20 – Perfis de temperatura experimental e simulados a partir de modelos a uma fase bidimensional e unidimensional para transferência de calor em leito de esferas de vidro em tambor horizontal em um ponto localizado próximo à superfície do leito, com condição de primeira espécie na parede do tambor ( $f = 0,2$ ,  $T_0 = 27,2^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 44,9^\circ\text{C}$ ,  $T_p = 45,5^\circ\text{C}$ ). .... 82

Figura 5. 21 – Perfis de temperatura experimental e simulados a partir de modelos a uma fase bidimensional e unidimensional para transferência de calor em leito de esferas de vidro em tambor horizontal com relação a um ponto localizado na região central do leito, com condição de primeira espécie na parede do tambor ( $f = 0,2$ ,  $T_0 = 30,6^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 45,5^\circ\text{C}$ ,  $T_p = 43,9^\circ\text{C}$ ). .... 83

Figura 5. 22 – Perfis de temperatura experimental e simulados a partir de modelos a uma fase bidimensional e unidimensional para transferência de calor em leito de esferas de vidro em tambor horizontal com relação a um ponto localizado na região central do leito, com condição de primeira espécie na parede do tambor ( $f = 0,4$ ,  $T_0 = 24,9^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 43,9^\circ\text{C}$ ,  $T_p = 44,3^\circ\text{C}$ ). .... 84



- Figura 5. 23 – Perfis de temperatura experimental e simulados a partir de modelos a uma fase bidimensional e unidimensional para transferência de calor em leito de esferas de vidro em tambor horizontal com relação a um ponto do leito localizado próximo à parede do tambor, com condição de primeira espécie na parede do tambor ( $f = 0,2$ ,  $T_0 = 28,2^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 44,9^\circ\text{C}$ ,  $T_p = 45,5^\circ\text{C}$ ). ..... 85
- Figura 5. 24 – Perfis de temperatura experimental e simulados a partir de modelos a uma fase bidimensional e unidimensional para transferência de calor em leito de esferas de vidro em tambor horizontal com relação a um ponto localizado no centro do leito, com condição de primeira espécie na parede do tambor ( $f = 0,4$ ,  $T_0 = 28,1^\circ\text{C}$ ,  $T_a = 45^\circ\text{C}$ ,  $T_p = 45,5^\circ\text{C}$ ). ..... 86
- Figura 5. 25 – Análise de sensibilidade do modelo a uma fase unidimensional proposto para transferência de calor em leito de esferas de vidro aos parâmetros  $k$  e  $h_p$ , quando empregado contorno de terceira espécie na interface leito-parede, para um ponto localizado na região central do leito, com grau de enchimento 0,2. .... 89
- Figura 5. 26 – Análise de sensibilidade do modelo a uma fase unidimensional proposto para transferência de calor em leito de esferas de vidro aos parâmetros  $k$  e  $h_p$ , quando empregado contorno de terceira espécie na interface leito-parede, para um ponto localizado nas proximidades da parede do tambor, com grau de enchimento 0,2. .... 89
- Figura 5. 27 – Análise de sensibilidade do modelo a uma fase unidimensional proposto para transferência de calor em leito de esferas de vidro aos parâmetros  $k$  e  $h_p$ , quando empregado contorno de terceira espécie na interface leito-parede, para um ponto localizado (a) no centro do leito, e (b) nas proximidades da parede do tambor, para grau de enchimento 0,2. .... 90
- Figura 5. 28 – Perfis de temperatura experimental e simulado para transferência de calor em leito de esferas de vidro a partir de modelo a uma fase unidimensional,  $h$  de  $4,4 \text{ W}/^\circ\text{C m}^2$ ,  $h_p$  de  $1,2 \text{ W}/^\circ\text{C m}^2$ ,  $k$  de  $0,32 \text{ W}/\text{m } ^\circ\text{C}$  e contorno de terceira espécie na parede para uma posição superficial do leito, com grau de enchimento 0,2. .... 91

- Figura 5. 29 – Perfis de temperatura experimental e simulado para transferência de calor em leito de esferas de vidro a partir de modelo a uma fase unidimensional,  $h$  de 4,4 W/°C m<sup>2</sup>,  $h_p$  de 1,2W/°C m<sup>2</sup>,  $k$  de 0,32W/m °C e contorno de terceira espécie na parede para uma posição central do leito, com grau de enchimento 0,2..... 91
- Figura 5. 30 – Perfis de temperatura experimental e simulado para transferência de calor em leito de esferas de vidro a partir de modelo a uma fase unidimensional,  $h$  de 4,4 W/°C m<sup>2</sup>,  $h_p$  de 1,2W/°C m<sup>2</sup>,  $k$  de 0,32W/m °C e contorno de terceira espécie na parede para uma posição central do leito, com grau de enchimento 0,4..... 922
- Figura 5. 31 – Perfis de temperatura experimental e simulado para transferência de calor em leito de esferas de vidro a partir de modelo a uma fase unidimensional,  $h$  de 4,4 W/°C m<sup>2</sup>,  $h_p$  de 1,2W/°C m<sup>2</sup>,  $k$  de 0,32W/m °C e contorno de terceira espécie na parede para uma posição próxima à parede do tambor, com grau de enchimento 0,2..... 92
- Figura 5. 32 – Perfis de temperatura experimental e simulado para transferência de calor em leito de esferas de vidro a partir de modelo a uma fase unidimensional,  $h$  de 4,4 W/°C m<sup>2</sup>,  $h_p$  de 1,2W/°C m<sup>2</sup>,  $k$  de 0,32W/m °C e contorno de terceira espécie na parede para uma posição próxima à parede do tambor, com grau de enchimento 0,4..... 93
- Figura 5. 33 – Perfis de temperatura experimental e simulado obtido por modelo a uma fase unidimensional para transferência de calor em leito de esferas de vidro colocado em tambor horizontal, com grau de enchimento de 0,4,  $k$  de 0,32 W/m °C,  $h$  de 4,4 W/°C m<sup>2</sup> e  $h_p$  de 1,2 W/°C m<sup>2</sup>, com rotação intermitente a cada duas horas e contorno de terceira espécie na parede do tambor..... 96
- Figura 5. 34 – Perfis de temperatura experimental e simulados para transferência de calor em leito de esferas de vidro em tambor horizontal, em presença de resistência tubular considerada como (a) condição de contorno de primeira espécie, (b) condição de contorno de segunda espécie e (c) geração de calor, em uma região próxima à superfície do leito considerando contorno de terceira espécie na parede do tambor ( $f = 0,4$ ;  $T_0 = 26,6^\circ\text{C}$ ;  $T_p = 44,5^\circ\text{C}$ ). ..... 98

Figura 5. 35 – Perfis de temperatura experimental e simulados, obtidos por modelo a uma fase bidimensional para transferência de calor em presença de resistência elétrica em meio ao leito de esferas de vidro, considerada como (a) contorno de primeira espécie, (b) contorno de segunda espécie e (c) geração de calor no modelo, para grau de enchimento de 0,4 e supondo convecção na superfície ( $k = 0,32 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$  e  $h = 4,4 \text{ W/}^\circ\text{C m}^2$ )..... 99

Figura 5. 36 – Perfis de temperatura experimental e simulados para transferência de calor em leito de esferas de vidro em tambor horizontal, em presença de resistência tubular considerada como (a) condição de contorno de primeira espécie, (b) condição de contorno de segunda espécie e (c) geração de calor, na região central do leito considerando contorno de terceira espécie na parede do tambor ( $f = 0,4$ ;  $T_0 = 26,4^\circ\text{C}$ ;  $T_p = 44,5^\circ\text{C}$ )..... 100

Figura 5. 37 – Perfis de temperatura experimental e simulados para transferência de calor em leito de esferas de vidro em tambor horizontal, em presença de resistência tubular considerada como (a) condição de contorno de primeira espécie, (b) condição de contorno de segunda espécie e (c) geração de calor, em um ponto próximo à parede do leito considerando contorno de terceira espécie na parede do tambor ( $f = 0,4$ ;  $T_0 = 28,1^\circ\text{C}$ ;  $T_p = 44,5^\circ\text{C}$ ). ..... 101

Figura 5. 38 - Perfis de temperatura experimental e simulado para transferência de calor em leito de esferas de vidro em tambor horizontal, em presença de resistência tubular considerada como condição de contorno de segunda espécie em um ponto superficial do leito considerando contorno de terceira espécie na parede do tambor ( $f = 0,4$ ;  $h = 1,5 \text{ W/}^\circ\text{C m}^2$ ,  $k = 0,37 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ ;  $h_p = 1,6 \text{ W/}^\circ\text{C m}^2$ ;  $T_0 = 26,6^\circ\text{C}$ ;  $T_p = 44,5^\circ\text{C}$ ). ..... 103

Figura 5. 39 - Perfis de temperatura experimental e simulado para transferência de calor em leito de esferas de vidro em tambor horizontal, em presença de resistência tubular considerada como condição de contorno de segunda espécie em um ponto central do leito considerando contorno de terceira espécie na parede do tambor ( $f = 0,4$ ;  $h = 1,5 \text{ W/}^\circ\text{C m}^2$ ,  $k = 0,37 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ ;  $h_p = 1,6 \text{ W/}^\circ\text{C m}^2$ ;  $T_0 = 26,4^\circ\text{C}$ ;  $T_p = 44,7^\circ\text{C}$ ). ..... 104

Figura 5. 40 - Perfis de temperatura experimental e simulado para transferência de calor em leito de esferas de vidro em tambor horizontal, em presença de resistência tubular considerada como condição de contorno de segunda espécie em um ponto próximo à parede do tambor considerando contorno de terceira espécie na parede do tambor ( $f = 0,4$ ;  $h = 1,5 \text{ W/}^\circ\text{C m}^2$ ,  $k = 0,37 \text{ W/m }^\circ\text{C}$ ;  $h_p = 1,6 \text{ W/}^\circ\text{C m}^2$ ;  $T_0 = 28,1^\circ\text{C}$ ;  $T_p = 44,5^\circ\text{C}$ ).

..... 104

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Parâmetros físicos requeridos pelo modelo. ....	33
Tabela 5. 1 – Média aritmética das temperaturas lidas nas posições axiais 1 a 4 no interior do tambor vazio, com $T_p$ e $T_a$ a 45°C e vazão de ar de 5L/min. ....	48
Tabela 5. 2 – Parâmetros do fluido utilizados para o cálculo dos diferentes coeficientes convectivos entre o ar no sobre espaço e a superfície do leito. ....	52
Tabela 5. 3 – Valores dos adimensionais utilizados para determinação dos diferentes coeficientes convectivos para as convecções forçada, livre e mista.....	53
Tabela 5. 4 – Temperaturas medidas para determinação experimental do coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície de leito de esferas de vidro e ar no sobre espaço, para grau de enchimento de 0,2. ....	54
Tabela 5. 5 – Valores adotados para os parâmetros $h$ e $k_{st}$ para a etapa de simulação de transferência de calor em leito de esferas de vidro colocado em tambor horizontal.....	55
Tabela 5. 6 – Temperatura média do leito de esferas de vidro em tambor horizontal para diferentes valores de $h$ e $k_{st}$ para 2, 5 e 10 horas de simulação e grau de enchimento de 0,2. ....	65
Tabela 5. 7 – Temperatura média do leito de esferas de vidro em tambor horizontal para diferentes valores de $h_p$ e $k$ para 8 horas de simulação e grau de enchimento de 0,4.....	67
Tabela 5. 8 – Temperatura média de um leito de esferas de vidro em presença de resistência interna em meio ao leito de partículas, considerada como (a) contorno de primeira espécie, (b) contorno de segunda espécie e (c) geração de calor.....	76
Tabela 5. 9 – Temperatura média do leito de esferas de vidro em grau de enchimento de 0,4 e aeração sobre as partículas em leito estático e em leito com rotação intermitente a cada duas horas, com contorno de terceira espécie na parede do tambor. ....	94

Tabela 5. 10 – Temperatura média do leito de esferas de vidro em grau de enchimento de 0,2 e aeração sobre as partículas em leito estático e em leito com rotação intermitente a cada duas horas, com contorno de terceira espécie na parede do tambor.....	95
Tabela 5. 11 – Faixas de valores para os parâmetros $k$ , $h_p$ e $h$ utilizadas para análise de sensibilidade do modelo bidimensional a uma fase com resistência elétrica em meio ao leito de partículas aos parâmetros.....	102
Tabela 5. 12 – Combinações dos valores dos parâmetros $h_p$ , $h$ e $k$ que minimizam os resíduos entre os dados experimentais e simulados em cada região do leito, para grau de enchimento de 0,4.....	102
Tabela 5. 13 – Faixas de valores para estimativa dos parâmetros $k$ , $h_p$ e $h$ através de análise de sensibilidade do modelo aos parâmetros. ....	103

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	1
<b>2. OBJETIVOS</b>	3
2.1 OBJETIVO GERAL	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	4
3.1 FERMENTAÇÃO EM ESTADO SÓLIDO (FES)	4
3.2 BIORREATORES PARA FES	5
3.3 TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM MEIOS POROSOS	8
3.4 MODELAGEM E SIMULAÇÃO APLICADAS À FES	12
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	22
4.1 MATERIAIS	22
4.1.1 Leito de Partículas	22
4.1.2 Tambor rotativo	22
4.2 MÉTODOS	25
4.2.1 Modelagem e simulação de transferência de calor em leito fixo	25
4.2.1.1 Modelo matemático	27
4.2.1.2 Parâmetros do modelo	32
4.2.1.3 Determinação dos coeficientes de transferência de calor por convecção ( $h$ )	35
c. Estimativa 1: convecção livre ( $h_{livre}$ )	35
d. Estimativa 2: convecção forçada ( $h_{forçada}$ )	36
e. Estimativa 3: convecção mista ( $h_{mista}$ )	37
4.2.1.1 Solução numérica e simulação	37
4.2.1.2 Determinação da temperatura média	39
4.2.2 Ensaio experimentais	40
4.2.2.1 Determinação experimental do coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h$ )	42
4.2.2.2 Perda de calor do interior do biorreator através das tampas para o ambiente	43

4.2.2.3	Obtenção dos perfis de temperatura experimentais .....	44
4.2.3	Validação do modelo .....	45
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>47</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES ACERCA DAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS .....	47
5.1.1	Análise quantitativa da perda de calor para o ambiente .....	47
5.1.2	Influência da variável axial nos perfis de temperatura .....	49
5.1.3	Análise de sensibilidade paramétrica aos parâmetros $h$ e $k_{st}$ .....	51
5.1.4	Estimativa dos coeficientes de transferência de calor por convecção entre a superfície do leito e o ar no sobre espaço .....	52
5.1.5	Determinação experimental do coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície do leito e o ar no sobre espaço .....	53
5.2	SIMULAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM TAMBOR HORIZONTAL .....	55
5.2.1	Situação com aeração paralela à superfície do leito de partículas estático .....	56
5.2.1.1	Perfil de temperatura em função das posições angulares e radiais .....	56
5.2.1.2	Perfil de temperatura em função dos parâmetros $k_{st}$ e $h$ .....	63
5.2.2	Situação com resistência tubular por entre o leito estático de partículas .....	70
5.3	VALIDAÇÃO DO MODELO .....	81
5.3.1	Situação com aeração paralela à superfície do leito estático de partículas .....	81
5.3.2	Cálculo da temperatura média em ensaios com rotação intermitente .....	93
5.3.3	Situação com resistência tubular entre o leito de partículas .....	977
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>107</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>109</b>



# Introdução

---

Os tambores rotativos consistem em cilindros horizontais que se caracterizam por possibilitar a movimentação e a mistura das partículas em torno do seu eixo central. Este tipo de equipamento tem sido empregado em diferentes processos em indústrias químicas, alimentícias, metalúrgicas e no processamento de minérios para calcinação, sinterização, redução e desidratação de materiais. De um modo geral, a principal vantagem na utilização de tambores rotativos está relacionada às maiores taxas de transferências de calor e massa devido à maior exposição de partículas à fase gasosa em comparação com as obtidas quando com processos totalmente estáticos.

Por este motivo, biorreatores de tambor rotativo têm despertado o interesse de pesquisadores ligados à fermentação em estado sólido (FES), pois apresentam facilidade de operação e maior disponibilidade de mecanismos para controle das condições ótimas de crescimento do microrganismo. Através da tecnologia FES, podem ser obtidos produtos de alto valor agregado utilizando-se uma ou mais culturas de microrganismo apropriadas aplicadas em resíduos agroindustriais. Dentre estes produtos, encontram-se os biocombustíveis, tais como o etanol de segunda geração ou etanol 2G, e enzimas lignocelulósicas necessárias durante a sua produção. Estas enzimas – mas não somente estas – são alvo de estudo do Grupo de Pesquisa em Bioenergia do IBILCE/UNESP, no qual este trabalho está inserido.

A tecnologia FES, apesar das atraentes vantagens e da vasta gama de compostos que pode oferecer, ainda é pouco disponível para utilização em escala industrial devido às dificuldades encontradas na manutenção e no controle de variáveis do processo. Dentre estas variáveis, destaca-se a temperatura, que está diretamente relacionada à produção de compostos de interesse (BELLON-MAUREL; ORLIAC; CHRISTEN, 2003; DALSENTER et al., 2005; SAHIR; KUMAR; KUMAR, 2007). Durante a

## Introdução

fermentação, ocorre geração de calor proveniente das atividades metabólicas do microrganismo. Além disso, as características físicas do substrato empregado, geralmente resíduos da agroindústria, dificultam a dissipação e remoção deste calor adicional ao sistema, o que pode provocar inibição da produção dos metabólitos de interesse.

Os estudos de aumento de escala e projeto de biorreatores apreciam cada vez mais o uso de ferramentas de modelagem e simulação, pois estas permitem que estratégias de desenho e de operação destes equipamentos possam ser avaliadas de forma eficiente. Modelos matemáticos têm sido propostos na tentativa de compreender fenômenos e estimar parâmetros de crescimento durante a fermentação. No entanto, a literatura reporta um número relativamente baixo de modelos aplicáveis a biorreatores rotativos para fermentação em estado sólido, o que motivou o desenvolvimento do presente trabalho. Os resultados aqui obtidos visam a contribuir para estudos de fenômenos no interior de biorreatores e, a longo prazo, para a aplicação de processos de FES em larga escala.

# Conclusões

---

Os modelos a uma fase propostos para a situação de um tambor horizontal parcialmente preenchido foram capazes de prever satisfatoriamente as transferências de calor em um leito poroso composto por partículas inertes, regulares e secas, o que permite dizer que os objetivos apresentados inicialmente foram alcançados com êxito.

Para a situação com aeração sobre o leito de partículas, foi proposto um modelo unidimensional com variação de temperatura em função da posição radial. Para a situação em presença de resistência elétrica em meio ao leito de partículas e sem aeração, propôs-se um modelo bidimensional a uma fase, com variação de temperatura em função das posições radial e angular. Neste caso, o contorno de segunda espécie no entorno da resistência foi o que melhor representou os dados experimentais e a comparação destes dados com dados simulados indicou a presença de um mecanismo convectivo atuante entre a superfície do leito e o ar no sobre espaço mesmo em ausência de introdução de ar no sistema. Os dados simulados apresentaram boa concordância com os dados experimentais ( $R^2 \geq 0,87$ ), o que mostra a capacidade dos modelos propostos para simular a transferência de calor no interior de um tambor horizontal parcialmente preenchido, e potencial futuro para serem tomados como base em estudos de transferências de calor em condições reais de fermentação em estado sólido.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se o desmembramento do tensor condutividade térmica em suas componentes espaciais, com a suspeita de que sua aplicação apresentaria melhoras nos resultados simulados. Além disso, propõe-se um estudo detalhado acerca da influência do regime de rotação intermitente na manutenção das condições operacionais em leitos úmidos inertes e orgânicos, e o estudo das transferências de calor e massa nestes mesmos leitos através de modelos matemáticos e

## Conclusões

ferramentas de simulação, visando a obtenção de resultados para condições mais próximas daquelas empregadas em processos de fermentação em estado sólido.

# Referências

---

AGUILAR, L. J. Programação em c++: Algoritmos, estruturas de dados e objetos. 2 ed. Bookman Editora, 2008.

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.

BATES, P. D., LANE, S. N., FERGUSON, R. I. Computational Fluid Dynamics: Applications in Environmental Hydraulics. 531 p. John Wiley & Sons, 2005.

BELLON-MAUREL, W.; ORLIAC, O.; CHRISTEN, P. Sensors and measurements in solid state fermentation: a review. **Process Biochemistry**, v. 38, n. 6, p. 881-896, 2003.

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

BHARGAV, S., PANDA, B. P., ALI, M., JAVED, S. Solid-state fermentation: An overview. **Chemical and Biochemical Engineering Quarterly**, v. 22, n. 1, p. 49-70, 2008.

BÜCK, A., CASCIATORI, F. P., THOMÉO, J. C., TSOTSAS, E. Model-based Control of Enzyme Yield in Solid-state Fermentation. **Procedia Engineering**, v. 102, p. 362-371, 2015.

CASCIATORI, F. P. Produção de celulases fúngicas por fermentação em estado sólido: ampliação de escala de biorreatores de leito fixo. 2015. 177 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos) Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP).

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.

CAVALCANTI, J. R. A., CARVALHO, F. O. Comparação entre o método da colocação ortogonal e o método das diferenças finitas na simulação da dispersão de um

## Referências

poluente em um rio. VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Uberlândia, 2009.

ÇENGEL, Y. A., GHAJAR, A. J. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**. 3 ed. McGraw-Hill Interamericana do Brasil Ltda: São Paulo, 2009.

CHEN, H. Z.; XU, J.; LI, Z. H. Temperature control at different bed depths in a novel solid-state fermentation system with two dynamic changes of air. **Biochemical Engineering Journal**, v. 23, n. 2, p. 117-122, 2005.

CHENG, P., HSU, C. T. Heat Conduction. **Transport Phenomena in Porous Media**, p. 57-76, 1998.

COUTO, S. R.; SANROMAN, M. A. Application of solid-state fermentation to food industry - A review. **Journal of Food Engineering**, v. 76, n. 3, p. 291-302, 2006.

CUNHA, R. D. Programação Científica em Fortran 95. Clube dos Autores: 2ª ed. 414 p. 2007.

DALSENTER, F. D. H., VICCINI, G., BARGA, M. C., MITCHELL, D. A., KRIEGER, N. A mathematical model describing the effect of temperature variations on the kinetics of microbial growth in solid-state culture. **Process Biochemistry**, v. 40, n. 2, p. 801-807, 2005.

DURAND, A. Bioreactor designs for solid state fermentation. **Biochemical Engineering Journal**, v. 13, n. 2-3, p. 113-125, 2003.

EBENNETT, C., EASTWICK, C., WALKER, G. Effect of a varying effective thermal conductivity term on heat conduction through a physical model of a hydride bed. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, p. 1692-1701, 2013.

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. 144p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

FANAEI, M. A.; VAZIRI, B. M. Modeling of temperature gradients in packed-bed solid-state bioreactors. **Chemical Engineering and Processing**, v. 48, n. 1, p. 446-451, 2009

FERNÁNDEZ-FERNÁNDEZ, M., PÉREZ-CORREA, J. R. Realistic modelo f a solid substrate fermentation packed-bed pilot bioreactor. **Process Biochemistry**, v. 42, p. 224-234, 2007.

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

## Referências

- GARCIA, C. **Modelagem e Simulação**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. p.22-26.
- GRAJALES AGUDELO, L. M. **Desenvolvimento de um biorreator rotativo para produção de enzimas celulolíticas por fermentação em estado sólido**. 2014. 148 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos) Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP).
- GRAJEK, W. Cooling Aspects of Solid-State Cultures of Mesophilic and Thermophilic Fungi. **Journal of Fermentation Technology**, v. 66, n. 6, p. 675-679, 1988.
- GRATTON, L. J., TRAVKIN, V. S., CATTON, I. **Transport Coefficient Dependence Upon Solid Phase Morphology for single Phase Convective Transport in Porous Media**. In: FAGHRI, M., BURMEISTER, L. C. Heat Transfer in Porous Media. The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1993. vol.240. p. 11-22.
- HAWKES, G. L. **Three-Dimensional Model of Heat Transport During In situ Verification With Melting and Cool Down**. In: FAGHRI, M., BURMEISTER, L. C. Heat Transfer in Porous Media. The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1993. vol.240. p. 23-28.
- HERZ, F., MITOV, I., SPECHT, E., STANEV, R. 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, 2012.
- HIMMELBLAU, D. M. **Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering**. 5 ed., Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1982.
- INCROPERA, F. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6ª ed. Rio de Janeiro: Editora LTC. p.599-600.
- KOMOSSA, H., WIRTZ, S., SCHERER, V., HERZ, F., SPECHT, E. Heat transfer in indirect heated rotary drums filled with monodisperse spheres: Comparison of experiments with DEM simulations. **Powder Technology**, v. 286, p. 722-731, 2015.
- KREITH, F. **Princípios da Transmissão de Calor**. 3 ed. Editora Edgard Blücher Ltda: São Paulo, 1977. p.3-11.
- KUMAR, D., JAIN, V. K., SHANKER, G., SRIVASTAVA, A. Citric acid production by solid state fermentation using sugarcane bagasse. **Process Biochemistry**, v. 38, n. 12, p. 1731-1738, 2003.
- 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, May 1993.

## Referências

- LEITE, M. Técnicas de Programação – Uma Abordagem Moderna. 436 p. Brasport. 2006.
- LI, S., LI, G., ZHANG, L., ZHOU, Z., HAN, B., HOU, W., WANG, J., LI, T. A demonstration study of ethanol production from sweet sorghum stems with advanced solid state fermentation technology. **Applied Energy**, v. 102, p. 260-265, 2013.
- LI, W., EBADIAN, M. A., WHITE, T. L., GRUBB, R. G., FOSTER., D. **The Effect of Steel Reinforcement on Temperature and Pressure Within a Porous Concrete Slab Subjected to Microwave Heating**. In: FAGHRI, M., BURMEISTER, L. C. Heat Transfer in Porous Media. The American Society of Mechanical Engineers, New York, 1993. vol.240. p. 1-10.
- MASAMUNE, S., SMITH, J. M. Thermal conductivity of beds of spherical particles. **Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 2, n. 2, 1963.
- MELIKOGLU, M., LIN, C. S. K., WEBB, C. Solid state fermentation of wasre bread pieces by *Aspergillus awamori*: Analysing the effects of airflow rate on enzyme production in packed bed bioreactors. **Food and Bioproducts Processing**, v. 95, p. 63-75, 2015.
- MITCHELL, D. A., LIMA LUZ, L. F., KRIEGER, N. BEROVIC, M. Bioreactors for Solid-State Fermentation. In: MOO-YOUNG, M. (Ed.). **Comprehensive Biotechnology (Second Edition)**. Burlington: Academic Press, 2011. p.347-360.
- MITCHELL, D. A., KRIEGER, N., STUART, D. M., PANDEY, A. New developments in solid-state fermentation II. Rational approaches to the design, operation and scale-up of bioreactors. **Process Biochemistry**, v. 35, n. 10, p. 1211-1225, 2000.
- 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.; 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.
- MOHANA, S., SHAH, A. R., DIVECHA, J., MADAMWAR, D. Xylanase production by *Burkholderia* sp DMAX strain under solid state fermentation using distillery spent wash. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 16, p. 7553-7564, 2008.
- NARRA, M., DIXIT, G., DIVECHA, J., MADAMWAR, D. SHAH A. R. Production of cellulases by solid state fermentation with *Aspergillus terreus* and enzymatic hydrolysis of mild alkali-treated rice straw. **Bioresource Technology**, v. 121, p. 355-361, 2012



## Referências

- NEVES, C. E. V. Comportamento de materiais granulares usando o método dos elementos discretos. 2009. 183 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia), Universidade de Brasília.
- NIELD, D. A.; BEJAN, A. **Convection in Porous Media**. Springer, 2012.
- OOSTRA, J.; TRAMPER, J.; RINZEMA, A. Model-based bioreactor selection for large-scale solid-state cultivation of *Coniothyrium minitans* spores on oats. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 27, n. 9, p. 652-663, 2000.
- ÖZISIK, N. Finite Difference Methods in Heat Transfer. 432 p. CRC Press, 1994.
- PERRY, R. H., CHILTON, C. H. **Chemical Engineers' Handbook**. 5 ed. McGraw-Hill, 1973.
- 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.; TRAMPER, J.; RINZEMA, A. Modeling conversion and transport phenomena in solid-state fermentation: A review and perspectives. **Biotechnology Advances**, v. 24, n. 2, p. 161-179, 2006.
- RAMSHAW, J. D. Elements of Computational Fluid Dynamics. 127 p. World Scientific, 2011.
- SAHIR, A. H.; KUMAR, S.; KUMAR, S. Modelling of a packed bed solid-state fermentation bioreactor using the N-tanks in series approach. **Biochemical Engineering Journal**, v. 35, n. 1, p. 20-28, 2007.
- SAHNOUN, M., KRIAA, M., ELGHARBI, F., AYADI, D. Z., BEJAR, S., KAMMOUN, R. *Aspergillus oryzae* S2 alpha-amylase production under solid state fermentation: Optimization of culture conditions. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 75, p. 73-80, 2015.
- 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, 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, 1998.
- SAUCEDO-CASTAÑEDA, G. et al. Heat transfer simulation in solid substrate fermentation. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 35, n. 8, p. 802-808, 1990.

## Referências

- SCHMIDELL, W., FACCIOTTI, M. C. R. **Biorreatores e Processos Fermentativos**. In: SCHMIDELL, W., LIMA, U. de A., AQUARONE, E., BORZANI, W. *Biotecnologia Industrial*. 1. ed. Editora Edgard Blücher Ltda, 2001. vol. 2, p.179-190.
- SHI, D., VARGAS, W. L., MCCARTHY, J. J. Heat transfer in rotary kilns with interstitial gases. **Chemical Engineering Science**, v. 63, p. 4506-4516, 2008.
- SHÖN, J. Propriedades físicas das rochas aplicadas à engenharia de petróleo: *Fundamentos teóricos e práticos*. Elsevier Brasil, 2014.
- SUN, D. *Computational Fluid Dynamics in Food Processing*. 760 p. CRC Press, 2007.
- THOMAS, L.; LARROCHE, C.; PANDEY, A. Current developments in solid-state fermentation. **Biochemical Engineering Journal**, v. 81, p. 146-161, 2013.
- 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.
- THOMÉO, J. C.; COSTA, M. V. A.; LOPES FILHO, J. F. Effective Thermal Conductivity of Beans via a Steady-State Method. **International Journal of Food Properties**, v. 7, n. 1, p. 129-138, 2004.
- TSOTSAS, E.; MARTIN, H. Thermal-Conductivity of Packed-Beds - a Review. **Chemical Engineering and Processing**, v. 22, n. 1, p. 19-37, 1987.
- TU, J., YEOH, G. H., LIU, C. *Computational Fluid Dynamics: A Partical Approach*. 440 p. Butterworth-Heinemann, 2012.
- UMPIERRE, A. *Introdução à termodinâmica do não-equilíbrio clássica*. Elsevier Brasil, 2015.
- VAFAI, 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.
- 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.

## Referências

YEBOAH, S. K., DARKWA, J. A critical review oh thermal enhancement of packed beds for water vapour adsorption. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 1500-1520, 2016.

YU, J.; ZHANG, X.; TAN, T. An novel immobilization method of *Saccharomyces cerevisiae* to sorghum bagasse for ethanol production. **Journal of Biotechnology**, v. 129, n. 3, p. 415-420, 2007.

ZANELATO, A. I., SHIOTA, V. M., GOMES, E., SILVA, R., THOMÉO, J. C. Endoglucanase production with the newly isolated *Myceliophthora sp.* L-1D3b in a packed bed solid state fermentation. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 43, n. 4, p. 1536-1544, 2012.