

# Avanços Científicos e Tecnológicos em Bioprocessos

**Alberdan Silva Santos**  
(Organizador)



**Atena**  
Editora

Ano 2018

Alberdan Silva Santos  
(Organizador)

# Avanços Científicos e Tecnológicos em Bioprocessos

Atena Editora  
2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

**Editora Chefe:** Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Diagramação e Edição de Arte:** Geraldo Alves e Natália Sandrini

**Revisão:** Os autores

#### **Conselho Editorial**

Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionale delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)**

A946 Avanças científicos e tecnológicos em bioprocessos [recurso eletrônico] / Organizador Alberdan Silva Santos. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-85-85107-47-5

DOI 10.22533/at.ed.475180110

1. Bioprocessos. 2. Bioquímica. 3. Biotecnologia. I. Santos, Alberdan Silva.

CDD 553.7

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

O conteúdo do livro e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

Avanços Científicos e Tecnológicos em Bioprocessos é uma obra que reúne vinte e três capítulos com temas em pesquisas científicas realizadas no campo da biotecnologia, e que envolve agentes biológicos e bioquímicos na geração de produtos ou processos. Nesta obra se concentram diversos avanços descritos nas metodologias e nos resultados, distribuídos em quatro tópicos principais, envolvendo: processos químicos e biotecnológicos no aproveitamento de resíduos; produção de metabólitos e enzimas; métodos analíticos e de simulação; e biotratamentos envolvidos na geração de energias. Esta obra foi escrita por jovens pesquisadores brasileiros que estão desenvolvendo suas teses e/ou dissertações em instituições nacionais. Por este motivo, os aspectos inovadores e o alcance dos resultados apresentados podem ser um grande estímulo para aqueles que visam conhecer com maior amplitude alguns dos aspectos biotecnológicos estudados em algumas das instituições de nosso país.

Alberdan Silva Santos

## SUMÁRIO

### EIXO 1: PROCESSOS BIOTECNOLÓGICOS APLICADOS NA PRODUÇÃO DE ENZIMAS E PROTEÍNAS

#### **CAPÍTULO 1 ..... 1**

AMYLASES IN PROTEIN SECRETOME PROFILE FROM *Aspergillus sp* WITH POTENTIAL TO DECONSTRUCT INTEGRAL STARCH

Patrícia Suelene Silva Costa Gobira  
Rubens Menezes Gobira  
Ricardo Felipe Alexandre de Mello  
Hellen Kempfer Phillippsen  
Nelson Rosa Ferreira  
Alberdan Silva Santos

#### **CAPÍTULO 2 ..... 7**

PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO BIOQUÍMICA DE FRUTOSILTRANSFERASE EXTRACELULAR MICROBIANA PARA A SÍNTESE DE FRUTOOLIGOSSACARÍDEOS EM ESCALA LABORATORIAL

Rafael Firmani Perna  
Josivan de Sousa Cunha  
Sergio Andres Villalba Morales  
Michelle da Cunha Abreu Xavier  
Cristiane Angelica Ottoni  
Elda Sabino da Silva  
Alfredo Eduardo Maiorano

#### **CAPÍTULO 3 ..... 23**

ENZYMATIC COCKTAIL PRODUCED BY *Fusarium sp* WITH POTENTIAL TO DECONSTRUCT CRUDE CASSAVA STARCH (*Manihot esculenta Crantz*).

Patrícia Suelene Silva Costa Gobira  
Elaine Cristina Souza Medeiros  
Rubens Menezes Gobira  
Ricardo Felipe Alexandre de Mello  
Alberdan Silva Santos

#### **CAPÍTULO 4 ..... 28**

THE SYSTEMATIC INVESTIGATION OF L-ASPARAGINASE PRODUCED BY FILAMENTOUS FUNGI

Eliane Silva e Silva  
Alberdan Silva Santos  
Márcia Gleice da Silva Souza  
Rubens Menezes Gobira  
Maria Inez de Moura Sarquis

#### **CAPÍTULO 5 ..... 33**

EVALUATION OF METHYLOCYSTIS HIRSUTA GROWTH ON SUPPLEMENTED MINERAL MEDIA USING METHANE AS CARBON SOURCE

Rodrigo Pimentel Fernandes  
Ana Cristina Pantoja Simões  
Manuela Temtemples de Carvalho  
Camila Ruiz Lopes  
Nei Pereira Jr

**CAPÍTULO 6 ..... 37**

BIOTECHNOLOGICAL PRODUCTION OF ENZYMATIC EXTRACT WITH CELULOLYTICAL ACTIVITY FROM AGROINDUSTRY RESIDUES

Ivanilton Almeida Nery  
Karine Belo Rocha de Lima  
Marlon Castro da Silva  
Edmir Fernandes Ferreira

**EIXO 2: APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS EM PROCESSOS BIOTECNOLÓGICOS E QUÍMICOS**

**CAPÍTULO 7 ..... 41**

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA PALMA DE ÓLEO (*ELAEIS SP*) PARA PRODUÇÃO DE POLISSACARÍDEOS EXTRACELULARES POR *PLEUROTUS OSTREATUS*

Jhonatas Rodrigues Barbosa  
Maurício Madson dos Santos Freitas  
Marcos Enê Chaves Oliveira

**CAPÍTULO 8 ..... 50**

AVALIAÇÃO DO CRESCIMENTO DE *Bacillus subtilis* UFPEDA 86 E DA PRODUÇÃO DE BIOSURFACTANTE UTILIZANDO RESÍDUOS DE FRUTAS COMO SUBSTRATOS

Camylla Carneiro Soares  
Adrielly Silva Albuquerque de Andrade  
Fábio Cirqueira da Silva  
Andréa Farias de Almeida  
Janice Izabel Druzian  
Ana Katerine de Carvalho Lima Lobato

**CAPÍTULO 9 ..... 65**

ESTUDO DO REAPROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DA INDÚSTRIA CACAUEIRA.

Rhuany de Oliveira Silva  
Iara Rebouças Pinheiro  
Isabela Nascimento Tavares Ferreira

**CAPÍTULO 10 ..... 70**

BIOPRODUCTS FROM *Trichoderma harzianum* AS INDUCER OF RESISTANCE TO ANTHRACNOSE IN BEANS

Emanuele Junges  
Marlove Fátima Brião Muniz  
Ângela Diniz Campos  
Thiarles Brun  
Cleudson José Michelin  
Marcio Antônio Mazutti

**CAPÍTULO 11 ..... 81**

ANALYSIS OF PRE-TREATMENT OF PINEAPPLE WASTE WITH HYDROGEN PEROXIDE IN THE OBTENTION OF TOTAL REDUCING SUGARS

Fernanda Ferreira Freitas  
Lorena Costa Vasconcelos Macedo

Carlos Alberto Galeano Suarez  
Araceli Aparecida Seolato  
Inti Doraci Cavalcanti-Montaño,  
Paula Rubia Ferreira Rosa

## **EIXO 3: MÉTODOS ANALÍTICOS, CINÉTICA, SIMULAÇÃO E MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS EM PROCESSOS**

### **CAPÍTULO 12 ..... 86**

USE OF LINEAR EQUATIONS FOR DETERMINATION OF APPARENT KINETIC PARAMETERS IN CELLULOLYTIC MEDIUM WITH *Trichoderma virens*

Nelson Rosa Ferreira  
Suelem Paixão da Silva  
Rubens Menezes Gobira  
Maria Inez de Moura Sarquis  
Alberdan Silva Santos

### **CAPÍTULO 13 ..... 92**

PRODUCTION OF COMMON ORANGE FERMENTED BEVERAGE: KINECTIC STUDY AND SENSORY ANALYSIS

Jacqueline de Moraes Campêlo  
Olga Martins Marques

### **CAPÍTULO 14 ..... 97**

MATHEMATICAL MODELING OF GLUCOSE ACCUMULATION DURING ENZYMATIC HYDROLYSIS OF CARRAGEENAN WASTE

Samuel Conceição Oliveira  
Fernando Roberto Paz Cedeno  
Fernando Masarin

### **CAPÍTULO 15 ..... 104**

PRODUÇÃO DE ESPOROS DE *Metarhizium anisopliae* POR CULTIVO SÓLIDO EM BIORREATOR DE TAMBOR ROTATIVO COM ROTAÇÃO INTERMITENTE: APLICAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA PREDIÇÃO DE PERFIS DE TEMPERATURA

Érika Fernanda Rezendes Tada  
Lucas Portilho da Cunha  
João Cláudio Thoméo

### **CAPÍTULO 16 ..... 121**

DETERMINAÇÃO DO FATOR DE EFETIVIDADE PARA ENZIMAS IMOBILIZADAS USANDO MÉTODOS DE REGRESSÃO SIMBÓLICA VIA PROGRAMAÇÃO GENÉTICA

Félix Monteiro Pereira  
Luciano Eduardo Gomes Junior  
Fabrício Maciel Gomes  
Messias Borges Silva  
Samuel Conceição Oliveira

### **CAPÍTULO 17 ..... 133**

DEVELOPMENT OF ANALYTICAL METHOD, BY SPECTROSCOPY IN THE MIDINFRARED, AND MULTIVARIATE CALIBRATION FOR ETHANOL QUANTIFICATION IN THE FERMENTED MANGO

PULP (*Mangifera indica* L.) VARIETY BACURI.

Rubens Menezes Gobira  
Patrícia Suelene Silva Costa Gobira  
Ricardo Felipe Alexandre de Mello  
Graziela Cristiane Telles da Silva  
Sanclayton Geraldo Carneiro Moreira  
Alberdan Silva Santos

**CAPÍTULO 18** ..... 138

MÉTODOS DE IMOBILIZAÇÃO PARA ESTABILIZAÇÃO DE ENZIMAS

Anderson dos Santos Barbosa  
Danyelle Andrade Mota  
Lays Carvalho de Almeida  
Juliana Lisboa Santana  
Nayára Bezerra Carvalho  
Sílvia Regina Soares Martins

**CAPÍTULO 19** ..... 156

CINÉTICA DE DEGRADAÇÃO DAS ANTOCIANINAS E DA CORDO EXTRATO DE *Eugênia involucrata* NA PRESENÇA E NA AUSÊNCIA DE AGENTES CONSERVANTES NA TEMPERATURA DE 90°C

Lauren Menegon de Oliveira  
Francine Antelo

**EIXO 4: BIOTRATAMENTOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA E BIOPRODUTOS**

**CAPÍTULO 20** ..... 163

BIOTRATAMENTO DE VINHAÇA SINTÉTICA E GERAÇÃO DE ELETRICIDADE UTILIZANDO UMA CÉLULA A COMBUSTÍVEL MICROBIANA

Cristiane Angélica Ottoni  
Marta Filipa Simões  
Jonas Gomes dos Santos  
Luciana Peixoto  
Rodrigo Fernando Brambilla de Souza  
Almir Oliveira Neto  
António Guerreiro de Brito  
Alfredo Eduardo Maiorano

**CAPÍTULO 21** ..... 172

RECUPERAÇÃO DE BIOPRODUTOS A PARTIR DA GASEIFICAÇÃO DO LODO DE ESGOTO SANITÁRIO

Renan Barroso Soares  
Ricardo Franci Gonçalves

**CAPÍTULO 22** ..... 179

BIOPROSPECTING CAROTENOIDS PRODUCTION IN THREE BRAZILIAN MICROALGAE SPECIES

Sabrina da Silva Mesquita  
Natália Guimarães Figueiredo  
Inaiã Costa Cutrim  
Simone Carvalho Chiapetta  
Cláudia Maria Luz Lapa Teixeira  
Eliana Flávia Camporese Sérvulo

**CAPÍTULO 23 ..... 184**

EFFECT OF TEMPERATURE AND SALINITY ON THE PRODUCTION OF CAROTENOIDS AND LIPIDS BY MARINE MICROALGA

Nicéia Chies Da Fré  
Alessandro de Oliveira Rios  
André Jablonski  
Rosane Rech  
Nilson Romeu Marcílio

**SOBRE O ORGANIZADOR..... 193**

## PRODUÇÃO DE ESPOROS DE *Metarhizium anisopliae* POR CULTIVO SÓLIDO EM BIORREATOR DE TAMBOR ROTATIVO COM ROTAÇÃO INTERMITENTE: APLICAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS PARA PREDIÇÃO DE PERFIS DE TEMPERATURA

### Érika Fernanda Rezendes Tada

Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos - DETA

Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas – IBILCE

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP

### Lucas Portilho da Cunha

Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos - DETA

Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas – IBILCE

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP

### João Cláudio Thoméo

Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos - DETA

Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas – IBILCE

Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP

**RESUMO:** Este capítulo apresenta um estudo preliminar sobre o cultivo sólido do fungo *Metarhizium anisopliae* em arroz pré-gelatinizados em um biorreator de tambor rotativo e as possíveis implicações das rotações sobre a produção de esporos. Primeiramente, são discutidos aspectos da operação deste tipo de biorreator e das

condições de cultivo do fungo; o mecanismo de mistura e movimentação das partículas durante a fermentação é discutido como um mecanismo auxiliar para controle da temperatura durante o processo, a ser aplicado antes ou durante os períodos de sobreaquecimento. Os resultados de produção de esporos em tambor rotativo com rotação intermitente são apresentados em comparação com aqueles obtidos em biorreatores de operação estática, e um modelo matemático foi utilizado para predição de elevações de temperatura. A princípio, as rotações não implicaram negativamente sobre a produção de esporos, sendo em biorreator de tambor rotativo com rotação a cada 24 horas a condição com mais elevada produção e a predição da temperatura pelo modelo proposto foi satisfatória em comparação com perfis experimentais.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Metarhizium anisopliae*, fermentação em estado sólido, biorreator de tambor rotativo, temperatura, modelagem e simulação.

## 1 | INTRODUÇÃO

A fermentação em estado sólido (FES) é definida como o crescimento de microrganismos sobre uma matriz sólida porosa, que dispõe de água apenas em quantidades suficientes para

suprir as necessidades metabólicas do microrganismo. Através desta tecnologia, é possível se obter produtos de alto valor agregado, tais como aromas, pigmentos, enzimas, ácidos orgânicos e agentes biocontroladores (BHARGAV et al., 2008). Dentre estes, destaca-se a aplicação de esporos do fungo *Metarhizium anisopliae* como alternativa ao uso de inseticidas de origem química para o controle de diversas pragas (DEL BIANCHI et al., 2001).

*M. anisopliae* é um fungo entomopatogênico classificado como acaricida e que se desenvolve com hifas, nas quais estão micélios e conídios, que são os propágulos ou órgãos de disseminação da espécie em hospedeiros ou em meio de cultura. Quando os propágulos se fixam na cutícula dos hospedeiros, ocorrem diversos fenômenos mecânicos e bioquímicos que consistem na deposição do esporo do fungo na superfície do hospedeiro (cutícula), germinação, penetração, colonização e crescimento do fungo na parte externa do inseto (mumificação do inseto), seguida de esporulação (PEDRINI, 2017; SHIN; BAE; WOO, 2016; ST. LEGER; COOPER; CHARNLEY, 1991) MW 33 kDa. Dentre as principais pragas sobre as quais o fungo atua estão o carrapato de gado *Rhipicephalus microplu*, a mosca dos estábulos (*Stomoxys calcitrans*), o inseto *Alphitobius diaperinus* – uma das principais pragas da avicultura –, os piolhos de aves (*Mallophaga sp.*) e a cigarrinha da folha da cana de açúcar (*Mahanarva posticata*). No Brasil, a principal aplicação do fungo se dá no controle desta última praga em virtude da proibição da queima da palha da cana de açúcar (ALONSO-DÍAZ et al., 2007; ALVES et al., 2004; ARRUDA, 2005; BENELLI et al., 2018; GALINDO-VELASCO et al., 2015; PAULA et al., 2000; POLAR et al., 2005; WASSERMANN et al., 2016; WEBSTER et al., 2017). Segundo pesquisas, o fungo *M. anisopliae* é o fungo mais utilizado para o controle microbiológico na América Latina, seguido pelo emprego do fungo *Beauveria bassiana* (NISHI; SATO, 2017). Porém, a produção industrial dos esporos do fungo *M. anisopliae* ainda é desprovida de tecnologia e processos sofisticados que permitam uma repetição do processo e um controle efetivo durante o cultivo do fungo (CUNHA, 2016).

Como alternativa para melhoria do processo existem diversos estudos que visam a utilização de biorreatores para cultivo sólido. No entanto, o aumento de escala de biorreatores para FES ainda não está totalmente disponível em escala industrial principalmente devido a dificuldades no controle e manutenção de importantes parâmetros de processo, tais como a temperatura e a umidade do substrato. Durante a fermentação, o microrganismo tende a gerar calor proveniente de suas atividades metabólicas. De um modo geral, os substratos utilizados em FES são meios orgânicos com propriedades térmicas relativamente pobres (CASCIATORI et al., 2013), o que dificulta a dissipação do calor gerado, que então permanece acumulado e tende a se manifestar na forma de aumentos de temperatura. Estas elevações na temperatura podem desencadear transportes de massa também indesejáveis, além de efeitos negativos sobre a produção dos compostos de interesse. Neste contexto, os biorreatores devem dispor de mecanismos que auxiliem no controle e manutenção do processo,

tais como introdução de ar, aspersão de água e/ou dispositivos que promovam mistura e movimentação das partículas. Este é um mecanismo muito interessante a ser empregado antes ou durante os períodos de sobreaquecimento do leito, pois promove maiores taxas de transferências de calor e massa, o que minimizaria a ocorrência de gradientes de temperatura.

Este capítulo tem como objetivo apresentar um estudo preliminar sobre a produção de esporos do fungo *M. anisopliae* em biorreator de tambor rotativo em regime de rotação intermitente, utilizada na tentativa de minimizar possíveis gradientes de temperatura e promover maior homogeneidade térmica do leito durante o processo. A seguir, serão apresentados detalhes sobre as configurações típicas deste tipo de biorreator e sobre as condições de cultivo do fungo, bem como a aplicação de um modelo matemático para predição de períodos de sobre aquecimento do leito de partículas.

## 2 | BIORREADORES DE TAMBOR ROTATIVO: CONFIGURAÇÃO E OPERAÇÃO

Os processos fermentativos ocorrem em reatores biológicos, também conhecidos como biorreatores, que atuam como barreira contra vias de contaminação e possibilitam a manutenção de condições ótimas para o desenvolvimento do microrganismo (THOMAS; LARROCHE; PANDEY, 2013). Particularidades na configuração destes equipamentos permitem a classificação dos biorreatores em dois grandes grupos gerais: de leito fixo e de leito móvel. Brevemente e como o próprio nome sugere, as partículas permanecem estáticas durante todo o processo em biorreatores de leito fixo. Dentre os mais utilizados, destacam-se os biorreatores de bandeja e os de coluna empacotada. Como mecanismo de manutenção da temperatura durante o processo, destacam-se a introdução de ar em condições controladas e a preservação das fronteiras espaciais em temperatura controlada. Dorta e Arcas (1998) e Van Breukelen et al., (2011), que realizaram a produção dos esporos em biorreator de coluna empacotada e demonstraram em seus trabalhos dificuldades com empacotamento do substrato e compactação, e observaram gradientes de temperatura axial e radial. Em biorreatores de bandeja, isso é obtido, em geral, pela acomodação das bandejas em câmara com temperatura constante, enquanto que camisas externas de refrigeração são comumente utilizadas em biorreatores de coluna empacotada. Méndez-González et al., (2018) demonstraram sucesso na produção de esporos utilizando biorreator de bandeja, porém os biorreatores utilizados não ultrapassavam capacidade de 500g de substrato, ou seja, realizaram testes em escala laboratorial.

Dentre os biorreatores de leito móvel, os tambores rotativos têm chamado atenção por apresentar facilidades de operação durante o processo. Dentre elas, destaca-se a possibilidade de que todas as etapas sejam desencadeadas dentro do biorreator, desde a inoculação do substrato até a extração da solução bruta de compostos de

interesse, o que minimizaria a demanda por trabalho manual e o contato com possíveis fontes de contaminação externa. Estes biorreatores consistem em cilindros horizontais encamisados que dispõem de mecanismos auxiliares para mistura e movimentação das partículas. Para que a dinâmica de mistura e movimentação não seja prejudicada, estes equipamentos não operam com todo o volume interno preenchido. Na literatura clássica, a razão entre o volume interno total do tambor e o volume preenchido por partículas é denominada grau de enchimento, que pode ser representada em escala unitária ou em porcentagem. Estudos têm apresentado a utilização de tambores rotativos em investigações em FES com até 60% de seu volume interno preenchido por partículas (WANG et al., 2010; GRAJALES et al., 2012; TADA et al., 2017a; TADA et al., 2017b).

Além da camisa externa para refrigeração, os biorreatores de tambor rotativo apresentam a possibilidade de introdução de ar em condições controladas, que atua como mecanismo de remoção de calor por convecção e no suprimento da demanda de oxigênio pelo microrganismo, além da possibilidade de reposição da umidade perdida durante o processo através da aspersão de água e da mistura e movimentação de partículas. Quanto ao ar de entrada, recomenda-se o emprego de ar saturado de vapor d'água na temperatura ótima de crescimento do microrganismo, pois isto evitaria que o ar capturasse umidade proveniente do leito úmido e, conseqüentemente, que o leito sofresse ressecamento ao longo do processo. No entanto, tratando-se da produção de estruturas de resistência, tais como são os esporos, estudos ainda estão sendo desenvolvidos para avaliar a influência da umidade relativa do ar sobre a produção dos esporos.

Duas configurações principais têm sido reportadas na introdução de ar em biorreatores de tambor rotativo, quais sejam, através do espaço vazio acima da superfície do leito de partículas, também chamado de *headspace*, ou através de um tubo localizado em meio ao leito de partículas e perfurado ao longo de seu comprimento. Na Figura 1 estão ilustradas estas duas configurações. Note que, na primeira (Figura 1.a), o escoamento de ar se dá preferencialmente ao longo do comprimento do tambor, uma vez que o ar adentra o sistema por uma extremidade axial e é recolhido na extremidade oposta; enquanto que na Figura 1.b, o escoamento é preferencialmente radial.

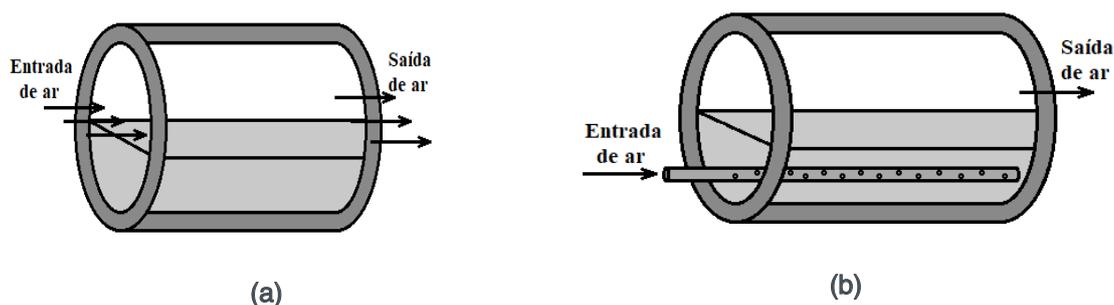


Figura 1 – Configurações para introdução de ar em biorreator de tambor rotativo.

Em processos de origem biológica em que ocorre a elevação da temperatura e, conseqüentemente, a perda das condições ótimas, a movimentação e mistura das partículas apresenta-se como um mecanismo de grande importância para o resfriamento e posterior homogeneização térmica do leito. Durante a rotação do tambor, maiores taxas de transferência de calor e massa entre as fases sólida e gasosa são observadas. A literatura clássica reporta que a convecção é o principal mecanismo de remoção de calor em leitos de partículas úmidas (GRAJEK, 1988).

O movimento das partículas pode ocorrer devido à rotação da parede interna do tambor, ou pelo movimento de dispositivos auxiliares, tais como a presença de pás que descrevem movimento rotacional em torno de seu próprio eixo e, geralmente, são instaladas no centro radial do tambor. Defletores podem ser instalados junto à parede interna do tambor, promovendo a elevação das camadas do leito mais próximas à parede e favorecendo a movimentação e a mistura das partículas. Na Figura 2 estão apresentadas as duas configurações citadas.

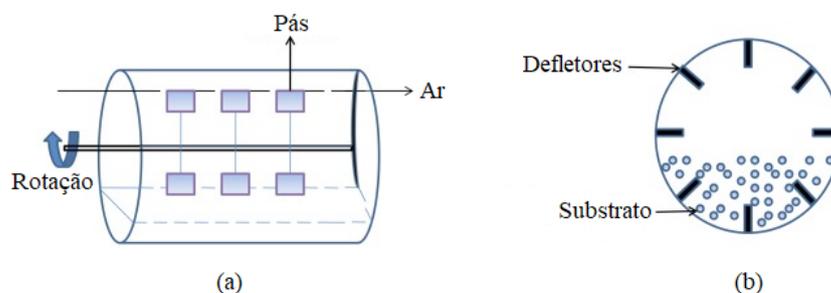


Figura 2 – Configurações de dispositivos auxiliares à mistura de partículas em biorreator de tambor rotativo.

FONTE: Adaptado de Arora, Rani e Ghosh (2018).

O regime de rotação empregado em FES pode variar entre contínuo e intermitente. No primeiro, as rotações são conduzidas durante todo o tempo do processo, enquanto que no segundo, as perturbações são empregadas somente como medida preventiva de controle da temperatura do leito, ou seja, quando elevações de temperatura são esperadas. Assim, o leito é mantido estático e é esporadicamente rotacionado. Em geral, devido à ampla gama de substratos utilizados para FES, cada processo requer o estudo particular do efeito das rotações sobre o rendimento e produtividade dos compostos de interesse, uma vez que, em determinados casos, o cisalhamento excessivo pode promover o rompimento de estruturas de crescimento do microrganismo. Nestes casos, recomenda-se o emprego de rotações em regime intermitente. Nas seções a seguir, serão apresentados um estudo preliminar sobre a influência do cisalhamento sobre a produção de esporos do fungo *M. anisopliae*, seguido de modelagem matemática para predição dos períodos de sobreaquecimento do leito.

### 3 | CULTIVO SÓLIDO EM BIORREATOR DE TAMBOR ROTATIVO

O cultivo sólido do fungo *M. anisopliae* se dá sobre a superfície de partículas de arroz tipo 1, que passam por pré-gelatinização durante processo de autoclavagem a 121 °C, 1,1 atm e 20 minutos. As condições ótimas correspondem a 28 °C, aplicação de ar saturado de vapor d'água também nesta temperatura e vazão de 1 L/min e umidade do substrato na faixa de 56 – 58 %, em base úmida. A vazão de ar refere-se àquela utilizada nos ensaios fermentativos cujos resultados serão mostrados a seguir. No entanto, é evidente que sistemas maiores requereriam maiores vazões de ar.

O fungo é depositado sobre o arroz autoclavado na forma de uma suspensão de esporos em solução de Tween 80 0,1% com concentração de  $10^7$  esporos/g-sólido seco. O cultivo tem duração de 10 dias e, após isso, os esporos são extraídos pela adição de solução de Tween 80 0,1% ao meio cultivado, seguida de constante movimentação para desprendimento dos esporos. A estimativa da produção de esporos é feita através da contagem de uma alíquota da solução em câmara de Neubauer.

A parede interna do tambor pode ser mantida a 28 °C pela circulação de água nesta temperatura, proveniente de um banho com temperatura controlada; e o ar pode ser saturado e mantido nesta temperatura ao escoar através de uma coluna de umidificação mantida também nesta temperatura. Para o uso desta coluna, recomenda-se o preenchimento de seu interior com água e partículas de material inerte, tal como esferas de vidro, pois a presença das partículas auxilia no tempo de retenção do ar em contato com a água e evita que água seja arrastada para dentro do biorreator. Para cultivo do fungo *M. anisopliae* em arroz para produção de esporos, a literatura tem reportado vazões de ar de 1 a 5 L/min (DORTA; ARCAS, 1998; CUNHA, 2016). A utilização do mecanismo de reposição de umidade é empregada unicamente quando gradientes de concentração de água são instalados no leito de partículas para que sejam evitadas as variações no teor de umidade ao final do processo em relação à umidade inicial.

Quanto à dinâmica de partículas de arroz em tambor rotativo, Grajales et al. (2012) apresentou um estudo sobre mistura e movimentação de arroz pré-gelatinizado em graus de enchimento 23, 43 e 60 %. Os autores constataram que a velocidade de rotação não teve influência sobre o número de rotações para se atingir a mistura radial de partículas no tambor, e recomendam a utilização de 5, 9 e 11 revoluções para cada grau de enchimento, respectivamente. Este é um estudo preliminar de dinâmica de movimentação e mistura de partículas, e sua transposição para a real situação de FES deve ser investigada e observada com cautela, uma vez que a presença do microrganismo pode promover alterações nas características estruturais e reológicas do leito de partículas ao longo do tempo.

Na Figura 3 estão apresentadas fotografias capturadas antes e após 10 dias de cultivo sólido de arroz pelo fungo *M. anisopliae*. O fungo possui aspecto esverdeado que, ao longo do cultivo, coloniza boa parte da superfície exposta das partículas.

A imagem do meio fermentado foi capturada após 10 dias de fermentação em um biorreator de bandeja, ou seja, o leito permaneceu totalmente estático.



Arroz inoculado com a suspensão de esporos



Após 10 dias de cultivo

Figura 3 – Aspectos do meio antes e após 10 dias de cultivo sólido de *M. anisopliae* em arroz tipo 1 pré-gelatinizado.

FONTE: CUNHA, 2016.

Após a inoculação com a suspensão de esporos, o arroz pré-gelatinizado mantém a característica de um sistema particulado sem a formação de blocos ou aglomerados. Após os 10 dias de cultivo, nota-se a formação de blocos e aglomerados e a colonização da superfície do meio. O crescimento do microrganismo é indicado por regiões de coloração predominantemente verde. As regiões amareladas e brancas indicam onde não houve colonização. Estas, em geral, surgem quando existe algum fator limitante ao crescimento, tais como o suprimento de oxigênio, temperatura e umidade do leito, ou quando a superfície do grão não se encontra exposta para colonização, estando em contato com as paredes do biorreator ou com outros grãos. Uma vez que o cultivo deste microrganismo se dá na superfície das partículas, a formação de blocos e aglomerados diminui a área superficial disponível, limitando o crescimento do microrganismo, o que pode resultar em queda na produtividade.

Neste contexto, a mistura e movimentação de partículas em tambor rotativo pode contribuir para o não-surgimento de blocos e aglomerados, além de atuar como mecanismo auxiliar de resfriamento do leito em períodos de sobre aquecimento. No entanto, é necessário se verificar a implicação do emprego de rotações sobre a produção de esporos, como será mostrado a seguir.

#### 4 | INFLUÊNCIA DO CISALHAMENTO SOBRE A PRODUÇÃO DE ESPOROS

Na Tabela 1 estão apresentadas as concentrações de esporos obtidas após os 10 dias de cultivo e a massa inicial de substrato seco ( $M_0$ ) utilizado em fermentações conduzidas em embalagens plásticas, em biorreator de coluna empacotada e em biorreator de tambor rotativo, este último em ausência e em presença de rotações. A

concentração inicial de esporos foi de  $10^7$  esporos/g-sólido seco em todos os testes, e o grau de enchimento em biorreatores de tambor rotativo foi de 0,5.

Biorreator		Dimensões (cm)	$M_0$ (g)	Concentração de esporos (esporos/g-ss)
Embalagens plásticas		10 x 20	20	$8,83 \times 10^8$
Coluna empacotada		9,5* x 12,5**	50	$4,56 \times 10^8$
Tambor rotativo	Estático	10* x 20**	500	$7,44 \times 10^8$
	Rotações a cada 24 h		500	$9,40 \times 10^8$

Tabela 1 – Concentração de esporos ao final de 10 dias de cultivo de *M. anisopliae* em arroz pré-gelatinizado em diferentes biorreatores.

\* diâmetro interno; \*\* comprimento.

Dentre os leitos estáticos, maiores concentrações foram verificadas em testes em biorreator de tambor estático, provavelmente devido à oferta de mecanismos de manutenção de temperatura mais efetivos. Bertucci et al. (2017) observou que a estabilidade térmica de um leito de partículas secas de bagaço de cana e de alumina se dá pela predominância da transferência de calor da parede para o interior do leito; então a parede do tambor apresenta grande influência sobre a temperatura do sistema, em comparação com a massa e o volume de partículas envolvidos.

Os testes com rotação a cada 24 horas apresentaram maior concentração de esporos do que o teste controle em embalagens plásticas, o que indica que, aparentemente, o cisalhamento não promoveu danos às estruturas de crescimento do microrganismo. Além disso, estima-se que a periódica movimentação e mistura de partículas tenha evitado a formação de blocos e aglomerados, tornando disponível uma maior área superficial para a colonização do microrganismo.

As fermentações conduzidas em embalagens plásticas são utilizadas para fins de comparação quando os processos ocorrem em biorreatores propriamente ditos. Durante o cultivo, as embalagens plásticas são acondicionadas em câmaras com suprimento e renovação de oxigênio e temperatura controlada. Em geral, considera-se este um resultado-controle devido à pouca quantidade de partículas utilizada e, conseqüentemente, à baixa quantidade de calor gerado durante o processo. Assim, as condições ideais de cultivo são mais facilmente mantidas, enquanto que a eventual queda na produção de esporos quando do processo em biorreatores é atribuída ao funcionamento, operação e atuação do biorreator e seus mecanismos de controle e manutenção das condições ótimas. Evidentemente, existe a possibilidade de se operar com maiores massas de partículas em cultivo em embalagens plásticas, tal como usualmente é feito em uma indústria especializada na produção de esporos em São José do Rio Preto – SP, que utiliza a média 400 g de arroz seco por embalagem. Quando maiores quantidades de substrato são utilizadas, mesmo em embalagens plásticas, aumentos de temperatura podem ser verificados. Na Figura 4 estão apresentados perfis de temperatura obtidos durante o cultivo sólido em embalagens

plásticas com 400 g de substrato seco e em tambor rotativo com rotações a cada 24 horas. A quantidade de partículas secas nos ensaios em tambor rotativo também foi de 400 g.

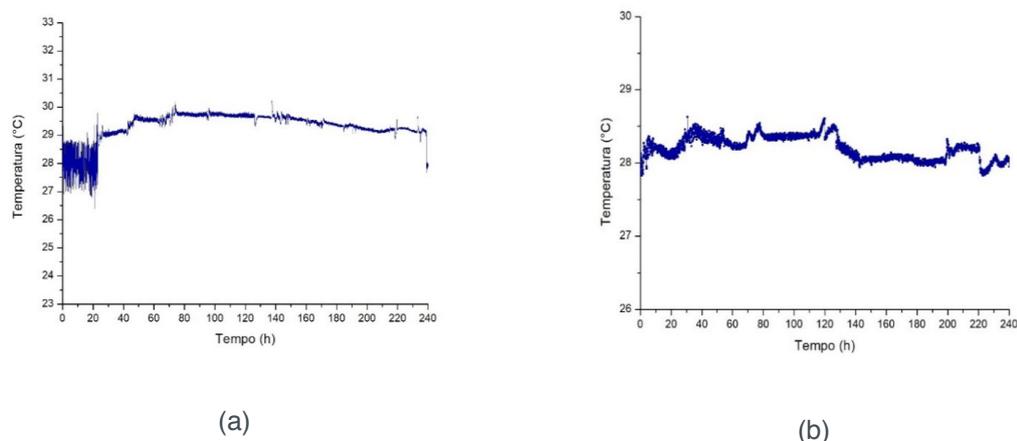


Figura 4 – Perfis de temperatura no centro do leito durante cultivo sólido de *M. anisopliae* em (a) embalagens plásticas e (b) tambor rotativo com rotações a cada 24 horas.

Ao longo das 240 horas de fermentação, nota-se que maiores elevações de temperatura foram verificadas em ensaios em embalagens plásticas em comparação com aqueles em tambor rotativo com rotação intermitente. As temperaturas médias foram de 29,4 °C (Figura 4.a) e 28,3 °C (Figura 4.b), respectivamente. Em relação à produção de esporos, o resultado em embalagens plásticas foi inferior em relação ao obtido em ensaios em tambor rotativo com rotação a cada 24 horas. No entanto, isto pode não estar relacionado somente ao controle da temperatura, mas também à disponibilidade de área superficial para colonização do microrganismo, que é facilitada devido à não formação de blocos e aglomerados em ensaios em tambor rotativo. Superficialmente, pode-se dizer que o aumento de temperatura em 1,4 °C em ensaios em embalagens plásticas não implicou negativamente sobre a produção de esporos, visto que o resultado obtido está entre os mais altos apresentados neste capítulo.

O processo em tambor rotativo apresentou controle da temperatura eficiente, uma vez que a máxima temperatura observada foi de 28,5 °C. Desse modo, entende-se que o emprego de rotações a cada 24 horas foi um mecanismo eficiente para se controlar a temperatura neste sistema. Provavelmente, esta eficiência está relacionada à escala do biorreator em que foi conduzido o experimento (10 cm de diâmetro interno e 20 cm de comprimento). Em escalas maiores, a quantidade de partículas seria também maior, bem como a quantidade de calor gerado. Além disso, o efeito da parede sobre a transferência de calor da parede para o leito de partículas seria minimizado, como reportado por Tada et al. (2017a), ou seja, a parede deixaria de ser um mecanismo tão eficiente no controle da temperatura como é em pequenas escalas (BERTUCCI et al., 2017). Assim, o processo deve ser observado e dimensionado através de estudos de aumento de escala para que os mecanismos adicionais presentes nos biorreatores, tal

como a intermitência de rotações, possam ser utilizados a fim de se conseguir maior estabilidade e homogeneidade térmica ao longo do processo. Modelos matemáticos têm sido aplicados em estudos de aumento de escala de biorreatores para FES, uma vez que a modelagem e simulação destes processos são relativamente mais rápidas e demandam custos inferiores em relação a testes experimentais propriamente ditos.

Especialmente em processos de rotação intermitente, os modelos matemáticos poderiam ser utilizados para prever períodos de sobreaquecimento do leito. Assim, momentos antes ou no momento do sobreaquecimento, rotações poderiam ser empregadas para promover maior contato entre as fases sólida e gasosa no sobre espaço. Modelos clássicos a uma fase têm sido reportados pela literatura para predição de perfis de temperatura (SAUCEDO-CASTAÑEDA et al., 1990; SANGSURASAK; MITCHELL, 1998; FANAIE; VAZIRI, 2009). Na seção a seguir será brevemente apresentada a modelagem das fases estáticas durante o cultivo sólido de *M. anisopliae* em leito de arroz em biorreatores de tambor rotativo com diferentes escalas: 10 e 30 cm de diâmetro interno. Maiores detalhes podem ser consultados em Cunha (2016), Tada et al. (2017b) e na literatura anteriormente mencionada.

## 5 | MODELAGEM E SIMULAÇÃO EM TAMBOR HORIZONTAL PARCIALMENTE PREENCHIDO COM AERAÇÃO PARALELA À SUPERFÍCIE DO LEITO

Os perfis de temperatura durante as fases estáticas em um biorreator de tambor rotativo com rotações intermitentes podem ser previstos através da solução de um balanço de energia escrito para a geometria de um cilindro parcialmente preenchido. Considerando-se que o ar é introduzido totalmente saturado por vapor d'água na temperatura do processo e que as eventuais transferências de massa entre o ar e o leito são desprezíveis, variações no teor de umidade no leito ao longo do tempo podem ser também desprezadas. Assim, considera-se que o teor de umidade do leito permanece uniformemente distribuída e não promove influências sobre a temperatura do leito.

O balanço de energia está apresentado na Eq. (1). Esta é uma equação diferencial parcial, em que o primeiro termo à esquerda representa a variação de entalpia no leito ao longo do tempo, o segundo termo à direita representa a condução de calor na direção radial e o último termo representa a geração de calor metabólico pelo microrganismo.

$$\rho_1 C_{p1} \frac{\partial T}{\partial t} = K_0 \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] + \dot{g}_c \quad (1)$$

em que  $\rho_1$  e  $C_{p1}$  são a densidade e o calor específico do leito,  $K_0$  é a condutividade térmica do leito na estagnação,  $T$  é a temperatura,  $r$  é a coordenada radial,  $t$  é o tempo e  $\dot{g}_c$  é o termo que representa a geração de calor. Note que este modelo utiliza

de propriedades diretas do leito de partículas. Considerando que o leito poroso é composto pelas fases sólida úmida e gasosa, estas propriedades incluem as contribuições das referidas fases. Este tipo de modelo é chamado de modelo a uma fase ou pseudo-homogêneo, pois considera que o meio poroso pode ser entendido como um corpo sólido pseudo-homogêneo. As propriedades do leito  $\rho_l$ ,  $C_{p_l}$  e  $K_0$  podem ser determinadas experimentalmente (Casciadori et al., 2013; Casciadori et al., 2014; Prieto, 2003) ou estimadas através das equações a seguir (Fanaei e Vaziri, 2009; Tada et al., 2017a).

$$\rho_l = \varepsilon\rho_a + (1 - \varepsilon)\rho_s \quad (2)$$

$$C_{p_l} = \varepsilon C_{p_a} + (1 - \varepsilon)C_{p_s} \quad (3)$$

$$K_0 = \varepsilon K_a + (1 - \varepsilon)K_s \quad (4)$$

A geração de calor  $\dot{q}_c$  relaciona-se com a cinética de crescimento do microrganismo e com o calor liberado durante o crescimento. Na Eq. (5) está apresentado modelo logístico, amplamente utilizado pela literatura em modelagem e simulação de processos de FES (SANGSURASAK; MITCHELL, 1998; FANAEI; VAZIRI, 2009).

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \mu_g X \left( 1 - \frac{X}{X_m} \right) \quad (5)$$

em que  $X$  é a concentração de biomassa,  $X_m$  é a máxima concentração de biomassa e  $\mu_g$  é a taxa específica de crescimento. A dependência de  $\mu_g$  com a temperatura está apresentada nas Eqs. (6) a (8), conforme proposto por Sangsurasak e Mitchell (1998).

$$\text{Para } T \leq T_{\text{ótima}}, \quad \mu_g = \mu_{g,\text{ótima}} \quad (6)$$

$$\text{Para } T_{\text{ótima}} \leq T \leq T_{\text{máx}}, \quad \mu_g = \left[ \frac{b + (T_{\text{máx}} - T_{\text{ótima}})}{(T_{\text{máx}} - T_{\text{ótima}})} \right] \left[ \frac{\mu_{g,\text{ótima}} (T_{\text{máx}} - T_{\text{ótima}})}{b + (T_{\text{máx}} - T)} \right] \quad (7)$$

$$\text{Para } T \geq T_{\text{máx}}, \quad \mu_g = 0 \quad (8)$$

em que  $T_{\text{ótima}}$  é a temperatura do processo,  $T_{\text{máx}}$  é a temperatura máxima em que ainda se verifica atividade do microrganismo,  $\mu_{g,\text{ótima}}$  é a taxa de crescimento ótima e  $b$  é a sensibilidade do crescimento aos aumentos de temperatura.

A Eq. (1) pode ser escrita da seguinte forma, em atenção ao termo de geração de calor :

$$\rho_l C_{p_l} \frac{\partial T}{\partial t} = K_0 \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] + \rho_l R_q \frac{\partial X}{\partial t} \quad (9)$$

em que  $R_q$  é a energia liberada por massa de biomassa produzida.

As condições inicial e de contorno para solução da Eq. (9) estão apresentadas a seguir. Esta consiste na solução mais simples para a simulação de transferência de calor em um tambor horizontal parcialmente preenchido por partículas com aeração

paralela à superfície do leito.

$$t = 0, \quad T = T_0 \quad (10)$$

$$r = r_{i(\theta)}, \quad K_0 \frac{\partial T}{\partial r} = h(T - T_a) \quad (11)$$

$$r = R, \quad T = T_p \quad (12)$$

em que as posições  $r_{i(\theta)}$  e  $R$  representam a superfície do leito e a parede do tambor, respectivamente,  $h$  é um coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície do leito e o ar no sobre espaço e  $T_0$  e  $T_p$  são as temperaturas inicial e da parede, respectivamente.

Na Tabela 2 estão apresentados os parâmetros requeridos pelo modelo. Os parâmetros de crescimento do fungo *M. anisopliae* não serão explicitamente divulgados neste capítulo.

Símbolo	Valor	Fonte
Parâmetros termo físicos		
$C_{p_s}$	2174 J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	Calculado por Choi e Okos (1986)  Perry et al. (2008)
$K_s$	0,31 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	
$\rho_s$	1684,3 kg m <sup>-3</sup>	
$C_{p_a}$	1005 J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	
$K_a$	0,21 W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	
$\rho_a$	1,14 kg m <sup>-3</sup>	
Parâmetros operacionais		
$T_0$	28 °C	
$T_a$	28 °C	
$T_p$	28 °C	
$v_a$	1 L min <sup>-1</sup>	
UR	100%	
X	56 – 58 %	

Tabela 2 – Parâmetros termo físicos requeridos pelo modelo e condições de operação.

Nota:  $v_a$  é a vazão de ar e X é a umidade das partículas do leito após inoculação da suspensão de esporos, em base úmida.

O parâmetro  $h$  pode ser estimado através de correlações clássicas para escoamento de fluido paralelo à superfície de uma placa plana, tal como apresentado na Eq. (14).

$$Nu = \frac{hL}{K_a} = 0,664Re^{\frac{1}{2}}Pr^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

em que  $Nu$ ,  $Re$  e  $Pr$  são os números de Nusselt, Reynolds e Prandtl e  $L$  é o comprimento da placa.

A solução numérica do modelo proposto [Eq.(9)] deu-se com a discretização das variáveis espaciais utilizando-se o método das diferenças finitas, de modo que cada elemento de volume ainda apresentasse características gerais do leito de partículas.

As equações diferenciais ordinárias resultantes foram escritas em linguagem MatLab® (MathWorks, Natick, USA) e solucionadas utilizando-se o solver *ode15s* disponível no software. Maiores detalhes sobre a solução para a geometria de um cilindro parcialmente preenchido podem ser encontrados em Tada et al. (2017a).

Na Figura 5 está apresentada a verificação do modelo proposto em comparação com dados experimentais coletados durante fermentação em biorreator de 10 cm. Note que os perfis apresentam proximidade e tendências similares, o que indica que o modelo é capaz de prever os perfis de temperatura ao longo da fermentação.

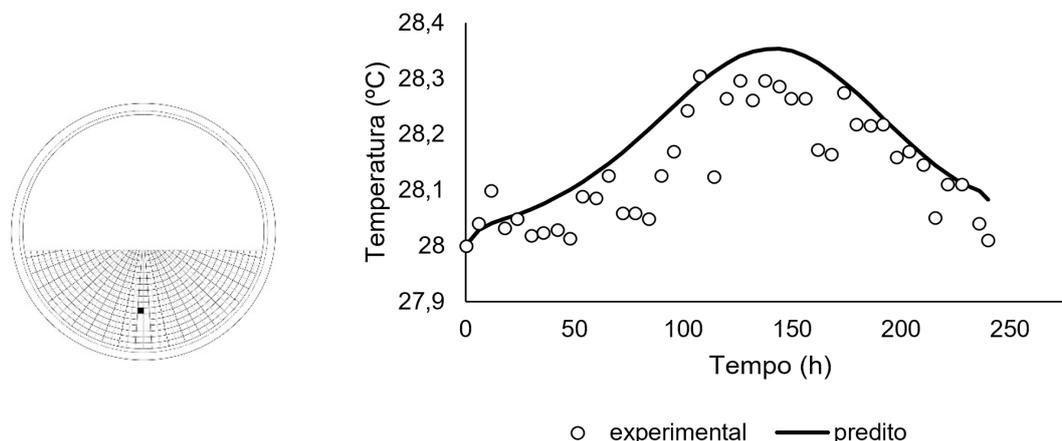


Figura 5 – Comparação entre os perfis de temperatura experimental e predito pelo modelo durante cultivo sólido de *M. anisopliae* em partículas de arroz pré-gelatinizado em biorreator de tambor rotativo mantido totalmente estático e preenchido com grau de enchimento 0,5.

Na Figura 6 estão apresentados os perfis temporais de temperatura obtidos por simulação para o cultivo sólido de *M. anisopliae* em biorreatores de tambor rotativo totalmente estático com 10 e 30 cm de diâmetro interno para o grau de enchimento 0,5. Note que estas simulações foram conduzidas considerando-se o leito totalmente estático, portanto rotações não foram empregadas.

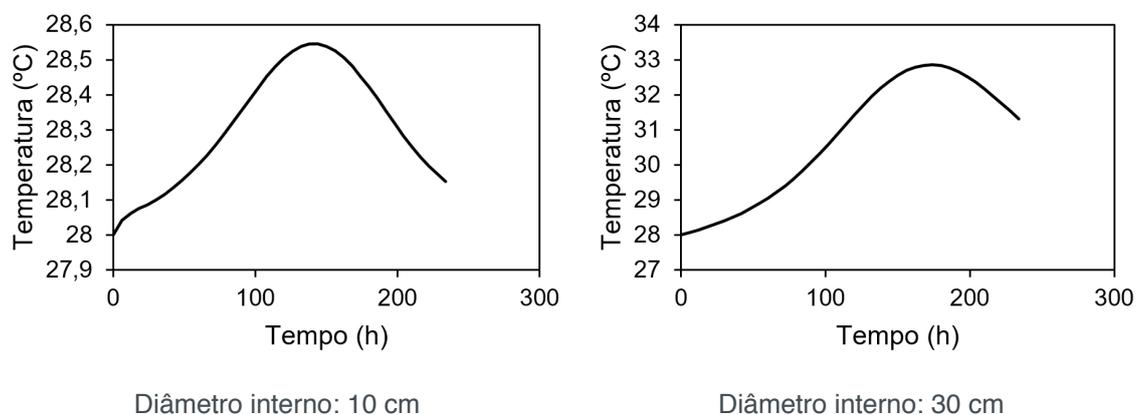


Figura 6 – Perfil temporal de temperatura simulado para cultivo sólido de *M. anisopliae* em leito de arroz pré-gelatinizado colocado em biorreator de tambor rotativo mantido totalmente estático com 10 cm de diâmetro interno, em uma posição central do leito de partículas e grau de enchimento de 0,5.

Em um tambor com 10 cm de diâmetro, a elevação máxima de temperatura

verificada ao longo do tempo foi de 0,5 °C e o perfil de temperatura apresentou uma tendência parabólica com concavidade para baixo, bem como para o tambor com diâmetro de 30 cm. O decréscimo de temperatura a partir de 170 horas indica que os mecanismos de dissipação de calor são mais influentes do que o calor gerado pelo microrganismo. Ao final das 240 horas, a temperatura no biorreator menor foi praticamente reestabelecida aos 28 °C, enquanto que o mesmo não foi verificado para o biorreator maior, que permaneceu todo o tempo a partir das 60 horas iniciais em temperatura superior a 29 °C. Pode se dizer que as elevações de temperatura no biorreator menor foram toleráveis e podem ser consideradas desprezíveis. Desse modo, diz-se que os mecanismos de controle neste sistema foram eficientes e que não seria necessária a aplicação de rotações como mecanismo para potencializar as taxas de transferência de calor, mas talvez o emprego das rotações poderia ser utilizado para evitar a formação de aglomerados e aumentar a área superficial disponível para o microrganismo. Na Figura 7 estão apresentados perfis espaciais de temperatura nos leitos durante o cultivo sólido em biorreatores de 10 e de 30 cm de diâmetro interno preenchidos em grau de enchimento 0,5.

Já no biorreator de 30 cm de diâmetro, as rotações poderiam ser utilizadas na tentativa de promover o resfriamento do leito, visto que esta ferramenta não promove impactos negativos sobre a produção de esporos. A quantidade de calor transferida das partículas para a fase gasosa durante a movimentação é de difícil estimativa em tipos de modelos tal como o apresentado neste capítulo, pois a simulação da movimentação de partículas requer outros métodos numéricos, como o método dos elementos discretos (DEM) (SANTOS et al., 2016). Ademais, o modelo apresentado neste capítulo pode ser utilizado sem maiores problemas na simulação das fases estáticas da fermentação sólida em um biorreator de tambor rotativo com rotação intermitente, e então, a resposta gerada poderia ser empregada em simulações utilizando-se DEM para predição dos perfis de temperatura em regime intermitente de rotação.

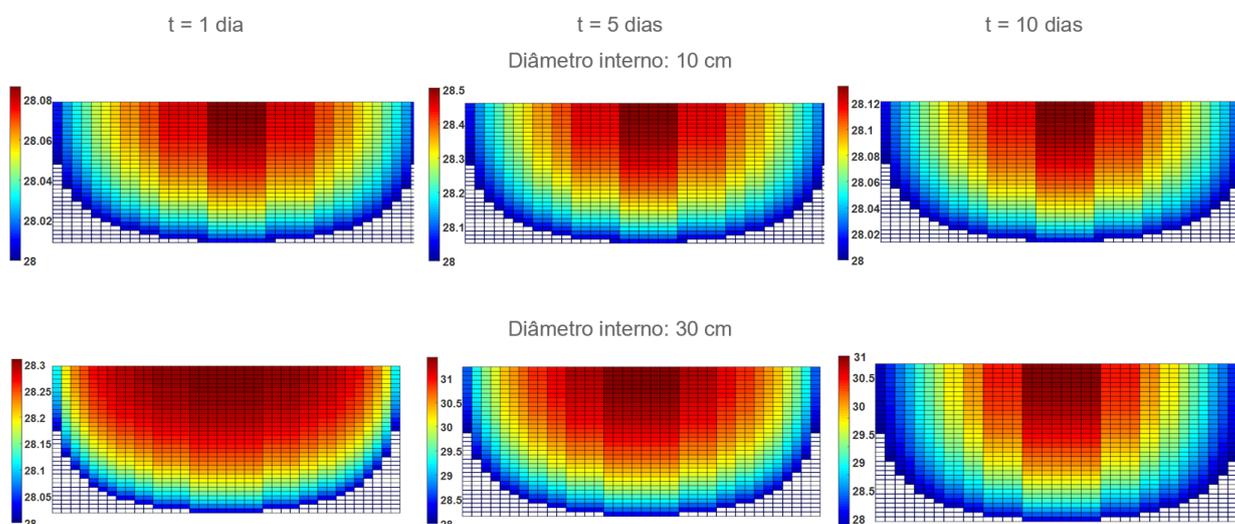


Figura 6 – Perfis espaciais de temperatura em biorreatores de tambor rotativo totalmente estáticos durante cultivo sólido de *M. anisopliae* em arroz pré-gelatinizado em grau de enchimento 0,5.

## REFERÊNCIAS

- ALONSO-DÍAZ, M. A.; GARCÍA, L.; GALINDO-VELASCO, E.; LEZAMA-GUTIERREZ, R.; ANGEL-SAHAGÚN, C. A.; RODRÍGUEZ-VIVAS, R. I.; GRAGOSO-SÁNCHEZ, H. Evaluation of *Metarhizium anisopliae* (Hyphomycetes) for the control of *Boophilus microplus* (Acari: Ixodidae) on naturally infested cattle in the Mexican tropics. **Veterinary Parasitology**, v. 147, n. 3–4, p. 336–340, 2007.
- ALVES, L. F. A.; ALVES, V. S.; BRESSAN, D. F.; NEVES, P. M. O. J.; ALVES, S. B. Ocorrência de *Metarhizium anisopliae* (Metsch.) Sorok. em adultos de cascudinho (*Alphitobius diaperinus*) (Panzer) (Coleoptera: Tenebrionidae) em aviários comerciais em Cascavel, PR. **Neotropical Entomology**, v. 33, n. 6, p. 793–795, 2004.
- 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.
- ARRUDA, W. CARACTERIZAÇÃO MOLECULAR E MORFOFISIOLÓGICA DE DIFERENTES ISOLADOS DO FUNGO ENTOMOPATOGÊNICO *Metarhizium anisopliae* E ANÁLISE MORFOLÓGICA DO PROCESSO DE INFECÇÃO EM *Boophilus microplus* Caracterização Molecular e Morfofisiológica de Diferentes Isolados do. 2005.
- 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.
- BENELLI, G.; CASELLI, A.; DI GIUSEPPE, G.; CANALE, A. Control of biting lice, Mallophaga – a review. **Acta Tropica**, v. 177, n. June 2017, p. 211–219, 2018.
- 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: *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica*, v. 1, n. 4, 2017.
- 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, n. 7, 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.
- CUNHA, L.P. **Aspectos de engenharia da produção do fungo entomopatogênico *Metarhizium anisopliae* em biorreator de bandeja**. Dissertação apresentada ao Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas – IBILCE, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos, 2016.
- DEL BIANCHI, V. L.; MORAES, I. O.; CAPALBO, D. M.F. Fermentação em estado sólido. SCHMIDELL, W.; LIMA, U. de A.; AQUARONE, E.; BORZANI, W. *Biotecnologia Industrial*. Engenharia Bioquímica. São Paulo. Ed. Edgard Blücher. Cap 13. v.2, 2001.
- DORTA, B.; ARCAS, J. Sporulation of *Metarhizium anisopliae* in solid-state fermentation with forced aeration. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 23, n. 7–8, p. 501–505, 1998.
- DURAND, A. Bioreactor designs for solid state fermentation. **Biochemical Engineering Journal**, v. 13, n. 2-3, p. 113-125, 2003.
- FANAELI, M. A.; VAZIRI, B. M. Modeling of temperature gradients in packed-bed solid-state bioreactors. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 48, n. 1, p. 446-451, 2009.

GALINDO-VELASCO, E.; LEZAMA-GUTIÉRREZ, R.; CRUZ-VÁZQUES, C.; PESCADOR-RUBIO, A.; ANGEL-SAHAGÚN, C. A.; OJEDA-CHI, M. M.; CONTRERAS-LARA, D. Efficacy of entomopathogenic fungi (Ascomycetes: Hypocreales) against adult *Haematobia irritans* (Diptera: Muscidae) under stable conditions in the Mexican dry tropics. **Veterinary Parasitology**, v. 209, n. 3–4, p. 173–178, 2015.

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. Cooling aspects of solid-state cultures of mesophilic and thermophilic fungi. **Journal of Fermentation Technology**, v. 66, n. 6, p. 675-679, 1988.

MÉNDEZ-GONZÁLEZ, F.; LOERA-CORRAL, O.; SAUCEDO-CASTAÑEDA, G.; FAVELA-TORRES, E. Chapter 7 – Bioreactors for the Production of Biological Control Agents Produced by Solid-State Fermentation. **Current Developments in Biotechnology and Bioengineering**, p. 109–121, 2018.

NISHI, O.; SATO, H. Species diversity of the entomopathogenic fungi *Metarhizium anisopliae* and *M. flavoviride* species complexes isolated from insects in Japan. **Mycoscience**, v. 58, n. 6, p. 472–479, 2017.

PAULA, A.; JUNIOR, I. D. S.; MASUDA, A.; SCHRANK, A.; VAINSTEIN, M. H. In vitro assessment of *Metarhizium anisopliae* isolates to control the cattle tick *Boophilus microplus*. **Veterinary Parasitology**, v. 94, p. 117–125, 2000.

PEDRINI, N. Molecular interactions between entomopathogenic fungi (Hypocreales) and their insect host: Perspectives from stressful cuticle and hemolymph battlefields and the potential of dual RNA sequencing for future studies. **Fungal Biology**, p. 1–10, 2017.

POLAR, P.; MAURO, M. A.; KAIRO, M. T.; MOORE, D.; PEGRAM, R.; JOHN, S. A.; ROACH-BENN, C. Thermal characteristics of *Metarhizium anisopliae* isolates important for the development of biological pesticides for the control of cattle ticks. **Veterinary Parasitology**, v. 134, n. 1–2, p. 159–167, 2005.

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.

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, n. 1-3, 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.

SANTOS, D. A.; BARROZO, M. A.; DUARTE, C. R.; WEIGLER, F.; MELLMANN, J. Investigation of particle dynamics in a rotary drum by means of experiments and numerical simulations using DEM. **Advanced Powder Technology**, v. 27, n. 2, p. 692-703, 2016.

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

SHIN, T. Y.; BAE, S. M.; WOO, S. D. Screening and characterization of antimicrobial substances originated from entomopathogenic fungi. **Journal of Asia-Pacific Entomology**, v. 19, n. 4, p. 1053–1059, 2016.

ST. LEGER, R. J.; COOPER, R. M.; CHARNLEY, A. K. Characterization of chitinase and chitobiase produced by the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae*. **Journal of Invertebrate**

**Pathology**, v. 58, n. 3, p. 415–426, 1991.

TADA, É. 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.; 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. 301-309, 2017b.

THOMAS, L.; LARROCHE, C.; PANDEY, A. Current developments in solid-state fermentation. **Biochemical Engineering Journal**, v. 81, p. 146-161, 2013.

VAN BREUKELEN, F. R. et al. Bioreactor and substrate selection for solid-state cultivation of the malaria mosquito control agent *Metarhizium anisopliae*. **Process Biochemistry**, v. 46, n. 3, p. 751–757, 2011.

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

WASSERMANN, M.; SELZER, P.; STEIDLE, J. L.; MACKENSTEDT, U. Biological control of *Ixodes ricinus* larvae and nymphs with *Metarhizium anisopliae* blastospores. **Ticks and Tick-borne Diseases**, v. 7, n. 5, p. 768–771, 2016.

WEBSTER, A.; PRADEL, E.; SOUZA, U. A.; MARTINS, J. R.; RECK, J.; SCHRANK, A.; KLAFKE, G. Does the effect of a *Metarhizium anisopliae* isolate on *Rhipicephalus microplus* depend on the tick population evaluated? **Ticks and Tick-borne Diseases**, v. 8, n. 2, p. 270–274, 2017.

## **SOBRE O ORGANIZADOR**

**ALBERDAN SILVA SANTOS** é Professor associado das faculdades de Química e Biotecnologia da UFPA; É Engenheiro Químico graduado pela UFPA; É Mestre em Química e Biotecnologia pelo Instituto de Química e Biotecnologia da UFAL; É Doutor em Bioquímica (Biotransformações com ênfase em oxidações microbiológicas) pelo Instituto de Química da UFRJ. Realizou Estágio pós-doutoral no Departamento de Biotecnologia do Instituto de Agroquímica e Tecnologia de Alimentos - IATA de Valencia, na Espanha. Atua no ensino de graduação e Pós-graduação no qual orienta Mestrandos e Doutorandos. Coordena projetos de cunho acadêmico-científico nos Laboratórios de Investigação Sistemática em Biotecnologia e Biodiversidade Molecular da UFPA, em áreas estratégicas como: Biotransformações; produção de enzimas; desenvolvimento de processos biotecnológicos no aproveitamento de resíduos agroindustriais para a produção de biomoléculas de interesse médico, cosméticas e farmacêutica; produção de biomoléculas a partir de cultivo de micro-organismos e cultivo de células vegetais. Aplica técnicas avançadas de Metabolômica e Lipidômica (CG/EM, LC/MS) na investigação metabólica de plantas e micro-organismos. Contribuiu na criação do curso de graduação e do programa de pós-graduação em Biotecnologia da UFPA. Foi o 1º Diretor da Faculdade de Biotecnologia da UFPA no período de 2009-2011. Atuou como vice-coordenador protempore do Programa de Pós-graduação em Biotecnologia da UFPA. Possui diversas publicações nas áreas da Química e Biotecnologia, assim como patentes. Recebeu a primeira Carta Patente na UFPA em dezembro de 2013. É pioneiro na otimização de processo de produção de metabólitos secundários e enzimas em cultura de células vegetais e de micro-organismos na Região Norte do Brasil.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-85107-47-5

