

**URI – CAMPUS DE ERECHIM**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

**THIAGO ANDRÉ WESCHENFELDER**

**OTIMIZAÇÃO DINÂMICA DE BIOPROCESSOS**  
**UTILIZANDO ALGORITMOS ESTOCÁSTICOS**

**ERECHIM, RS – BRASIL**

**ABRIL DE 2010**

**URI - CAMPUS ERECHIM**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS**

**OTIMIZAÇÃO DINÂMICA DE BIOPROCESSOS**  
**UTILIZANDO ALGORITMOS ESTOCÁSTICOS**

**THIAGO ANDRÉ WESCHENFELDER**

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da URI-Campus de Erechim, como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Alimentos, Área de Concentração: Engenharia de Alimentos, da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI, Campus de Erechim.

**ERECHIM, RS - BRASIL**

**ABRIL DE 2010**

# OTIMIZAÇÃO DINÂMICA DE BIOPROCESSOS UTILIZANDO ALGORITMOS ESTOCÁSTICOS

Thiago André Weschenfelder

Dissertação de Mestrado submetida à Comissão Julgadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos como parte dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Alimentos, Área de Concentração: Engenharia de Alimentos.

Comissão Julgadora:

---

Prof. Marco Di Luccio, D. Sc  
Orientador

---

Prof. Marcos Lucio Corazza, D. Sc  
Orientador

---

Prof. Fernanda de Castilhos, D. Sc.

---

Prof. Marcio Schwaab, D. Sc

---

Prof. José Vladimir de Oliveira, D. Sc

Erechim, 16 de Abril de 2010.

NESTA PÁGINA DEVERÁ SER INCLUÍDA A FICHA CATALOGRÁFICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO. ESTA FICHA SERÁ ELABORADA DE ACORDO COM OS PADRÕES DEFINIDOS PELO SETOR DE PROCESSOS TÉCNICOS DA BIBLIOTECA DA URI – CAMPUS DE ERECHIM.

A minha mãe, Jocemara, por todo apoio, incentivo, amizade, carinho e amor em toda a trajetória de minha vida. Palavras não serão suficientes para expressar essa homenagem.

Ao meu padrasto João, por toda amizade e companheirismo. Pessoa de bom coração me mostrou o significado de como ser digno a quem você ama.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha mãe, Jocemara e ao meu padrasto João, por todo carinho e confiança em todos estes anos, partilhando alegrias e tristezas. Esta conquista também é de vocês.

Ao meu orientador Marco Di Luccio pela orientação, pelo aprendizado e pelas oportunidades oferecidas e ao meu orientador Marcos Lúcio Corazza, pela amizade, pelos conselhos, por todo conhecimento compartilhado e pelas oportunidades que fizeram deste trabalho ser grande e significativo.

A amiga e também eterna orientadora, Fernanda de Castilhos Corazza, pela ajuda, pelas conversas e pelos conselhos nas épocas decisivas da minha carreira.

Ao professor e amigo Marcio Schwaab, pela amizade adquirida e por todo conhecimento compartilhado neste trabalho.

Aos meus colegas de laboratório e aos meus colegas de mestrado da URI, principalmente ao colega e acima de tudo amigo Claiton Zanini Brusamarello, pelas conversas, risadas e conselhos.

Aos amigos adquiridos no Centro Politécnico da UFPR, em Curitiba, principalmente a galera do LESF e aos professores Marcelo Lenzi, pelo canto disponibilizado para realização dos trabalhos e ao professor Papa, por disponibilizar um PC mais veloz para as otimizações realizadas.

Aos integrantes do Quarteto Fantástico, Paulo e Roberto por toda amizade, companheirismo e generosidade, e ao amigo que considero como irmão Vagner, que nos momentos de alegria e de tristeza estava presente, mostrando a necessidade de levantar e seguir em frente.

A URI, ao Programa de Mestrado de Engenharia de Alimentos e a CAPES pelo suporte técnico e financeiro.

A todas as pessoas que não foram citadas aqui. Esta conquista não é só minha. Sem vocês, este trabalho não teria significado. Obrigado a todos.

“A maioria pensa com a sensibilidade,  
eu sinto com o pensamento.  
Para o homem vulgar,  
sentir é viver e pensar é saber viver.  
Para mim, pensar é viver e sentir  
não é mais que o alimento de pensar.”

(Fernando Pessoa)

Resumo da Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Alimentos.

## **OTIMIZAÇÃO DINÂMICA DE BIOPROCESSOS UTILIZANDO ALGORITMOS ESTOCÁSTICOS**

Thiago André Weschenfelder

Abril / 2010

Orientadores: Marco Di Luccio

Marcos Lúcio Corazza

O presente trabalho tem por finalidade estudar diferentes algoritmos estocásticos aplicados a problemas de otimização dinâmica de bioprocessos. Os algoritmos estocásticos estudados foram o *Artificial Bee Colony* (ABC), *Differential Evolution* (DE), *Particle Swarm Optimization* (PSO) e *Simulated Annealing* (SA). Para validação destes algoritmos foram avaliadas configurações de parâmetros internos dos mesmos frente a funções teste (clássicas). As funções escolhidas foram *Ackley*, *Griewank*, *Parabolic*, *Rastrigin*, *Rosenbrock* e *Scheffers*. Como estudos de caso de bioprocessos foram selecionados os seguintes processos: otimização da produção de etanol em um fermentador semi-contínuo e a produção ótima de proteína secretada em reatores de batelada alimentada. Para a transformação do problema original em um problema não-linear (PLN) foi usada a abordagem seqüencial *Control Vector Parametrization* (CVP), onde este PLN foi resolvido pelos quatro algoritmos estocásticos estudados. Em síntese, os resultados da validação dos algoritmos frente as funções teste mostram que estes são excelentes ferramentas para minimização global de funções multimodais, ressaltando os algoritmos DE e ABC que obtiveram os melhores resultados. Da mesma forma, a abordagem seqüencial em conjunto com algoritmos estocásticos mostraram resultados eficientes na otimização dinâmica de bioprocessos, de fácil implementação e uso.

**Palavras-chave:** Otimização Dinâmica de Bioprocessos; Algoritmos Estocásticos; *Control Vector Parametrization*; *Artificial Bee Colony*, *Differential Evolution*.

Abstract of Dissertation presented to Food Engineering Program as a partial fulfillment of the requirements for the Degree of Master in Food Engineering

## **DYNAMIC OPTIMIZATION OF BIOPROCESS USING STOCHASTIC ALGORITHMS**

Thiago André Weschenfelder

Abril/2010

Advisors: Marco Di Luccio  
Marcos Lúcio Corraza

This study aims to study different stochastic algorithms applied to problems of dynamic optimization of bioprocesses. The stochastic algorithms studied were the *Artificial Bee Colony* (ABC), *Differential Evolution* (DE), *Particle Swarm Optimization* (PSO) and *Simulated Annealing* (SA). To validate these algorithms internal parameter settings were evaluated in order to compare the same test functions (classical). The functions chosen were *Ackley*, *Griewank*, *Parabolic*, *Rastrigin*, *Rosenbrock* and *Scheffers*. Case studies of bioprocess were selected: optimization of ethanol production in a semi-continuous fermentor and optimum production of secreted protein in fed-batch reactor. To transform the original problem into a nonlinear problem (NLP) the sequential approach *Control Vector Parametrization* (CVP), was used where the NLP was resolved by the four stochastic algorithms studied. In summary, the results of the algorithms validation with the test functions show that they are excellent tools to minimize overall multimodal functions, emphasizing the DE and ABC algorithms that presented the best results. Similarly, the sequential approach with stochastic algorithms have shown to be efficient in the dynamic optimization of bioprocesses, easy to implement and use.

Keywords: Dynamic Optimization of Bioprocess; Stochastic Algorithms; *Control Vector Parametrization*; *Artificial Bee Colony*; *Differential Evolution*.

# ÍNDICE

TOC \O "1-3" \H \Z \U <a href="#">LISTA DE FIGURAS</a>	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
<a href="#">LISTA DE TABELAS</a>	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
<a href="#">LISTA DE SÍMBOLOS</a>	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
<b>1 <a href="#">INTRODUÇÃO</a></b>	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
1.1 <a href="#">MOTIVAÇÃO E RELEVÂNCIA</a>	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
1.2 <a href="#">OBJETIVOS</a>	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
<b>2 <a href="#">REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</a></b>	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
2.1 <a href="#">OTIMIZAÇÃO GLOBAL UTILIZANDO MÉTODOS ESTOCÁSTICOS</a>	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
2.2 <a href="#">ALGORITMOS ESTOCÁSTICOS</a>	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
2.2.1 <a href="#">Colônia Artificial de Abelhas</a>	<i>Erro! Indicador não definido.</i>
2.2.2 <a href="#">Evolução Diferencial</a>	<i>Erro! Indicador não definido.</i>
2.2.3 <a href="#">Enxame de Partículas</a>	<i>Erro! Indicador não definido.</i>
2.2.4 <a href="#">Recozimento Simulado</a>	<i>Erro! Indicador não definido.</i>
2.3 <a href="#">OTIMIZAÇÃO DINÂMICA DE PROCESSOS</a>	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
2.3.1 <a href="#">Métodos para Otimização Dinâmica</a>	<i>Erro! Indicador não definido.</i>
2.4 <a href="#">CONSIDERAÇÕES</a>	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
<b>3. <a href="#">RESULTADOS</a></b>	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
3.1. <a href="#">VALIDAÇÃO DOS ALGORÍTMOS ESTOCÁSTICOS</a>	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
<a href="#">HYPERLINK \I "_Toc272331091"3.1.1</a>	