

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA
INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E
INTENSIDADE LUMINOSA NA
PRODUÇÃO DE MICROALGAS EM
FOTOBIORREACTORES
DEMONSTRANDO EFEITOS DE
FOTOINIBIÇÃO**

Robert Luiz Lara Ribeiro
MATEMÁTICO

Keli Cristiane Correia Morais
BIÓLOGA

André Bellin Mariano
FARMACÊUTICO-BIOQUÍMICO-INDUSTRIAL

Jeferson Avila Souza
ENGENHEIRO MECÂNICO

José Viriato Coelho Vargas
ENGENHEIRO MECÂNICO

David Alexander Mitchell
BIÓLOGO - MICROBIOLOGISTA

PROJETOS

- Projeto CNPq 552867/2007-1 - Ed 39/2007 Etanol/Biodiesel - Núcleo de pesquisa e desenvolvimento de energia auto-sustentável a partir do biodiesel e outras fontes
- Projeto CNPq 574759/2008-5 - Desenvolvimento e otimização de fotobioreatores compactos para aquicultura de microalgas para núcleo de pesquisa e desenvolvimento de energia auto-sustentável (NPDEAS) a partir do biodiesel

OBJETIVOS DO PROJETO:

- Desenvolvimento e otimização de um fotobioreator compacto de cultivo de microalgas de concepção geométrica inovadora para investigar a possibilidade de aumento da produção de biomassa para produção de biodiesel em termos de produtividade volumétrica e superficial em relação aos métodos convencionais de cultivo;
- Demonstrar o conceito de geração de potência distribuída auto-sustentável a partir do biodiesel;

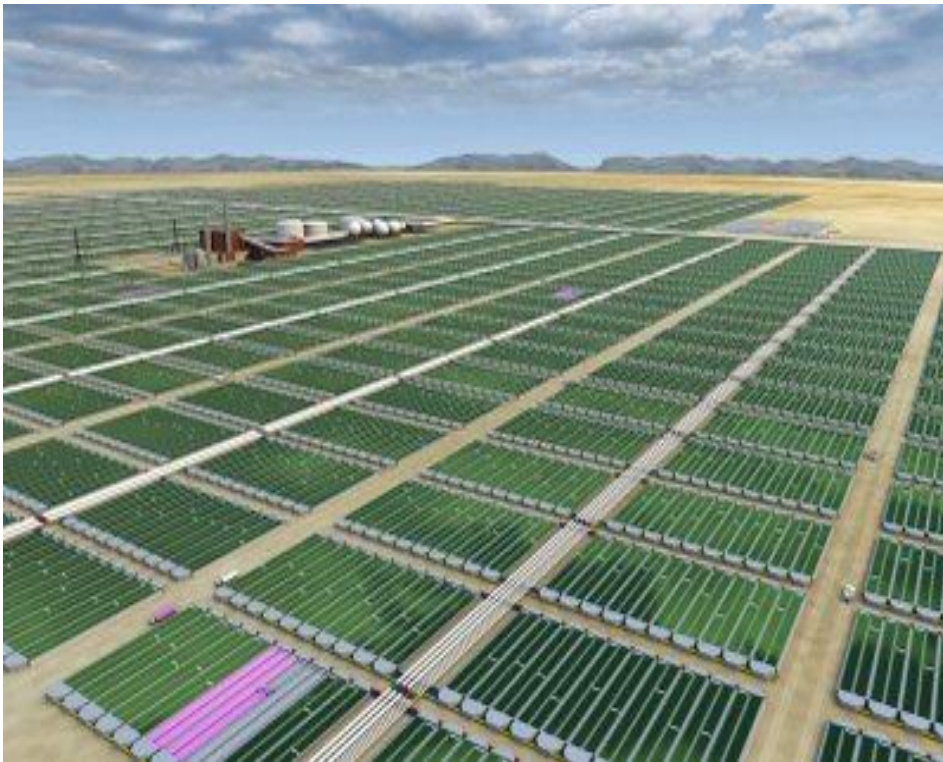
PROJETO: Fotobiorreatores Compactos

- Visa alcançar uma elevadíssima produtividade
- É possível controlar as condições de cultivo (quantidade dos nutrientes, temperatura, iluminação, pH)



Fotobiorreatores Compactos

- As piscinas ou "lagoas" abertas são os sistemas mais antigos e mais simples de cultivo de microalgas em massa



INTRODUÇÃO

- Vantagens das microalgas em relação às plantas:
 - alto valor de lipídeo na sua biomassa,
 - alta taxa de crescimento ,
 - melhor aproveitamento da luz.
- Parâmetros relevantes:
 - conhecer fatores que influenciam na eficiência da fotossíntese → ponto máximo de saturação de luz para uma máxima taxa fotossintética.

OBJETIVO DESTE TRABALHO

- Realizar uma simulação para verificar os limites de temperatura e intensidade luminosa para a diatomácea *Phaeodactylum tricornutum* (Bohlin, 1897) através de um modelo computacional utilizando parâmetros do fotobiorreator proposto por Vargas (2007).
- Realizar simulações para cultivos em batelada e cultivo semi-contínuo.
- Variar os seguintes parâmetros: intensidade luminosa, temperatura e fotoinibição.

FOTOSSÍNTESE

PIGMENTOS → COMPLEXO ANTENA



COLETA LUZ



TRANSFERE ENERGIA → CENTROS DE REAÇÃO

FOTODANO

INTENSIDADE DE LUZ EXCESSIVA



AFETA O TRANSPORTE DE ELETRONS NO
FOTOSSITEMA II



DANIFICA A PROTEÍNA D1 → FOTODANO

FOTOINIBIÇÃO

A fotoinibição é uma consequência da limitação do transporte de elétrons no lado doador do PSII ou devido a uma limitação no lado acceptor do PSII

FOTOINIBIÇÃO

Processo que ocorre em função da exposição excessiva da luz a qual **inativa ou mesmo danifica** o centro de reação fotossintética.

Por isso as *seguintes variáveis* foram inseridas neste modelo computacional proposto para os fotobiorreatores compactos.

SIMULAÇÃO

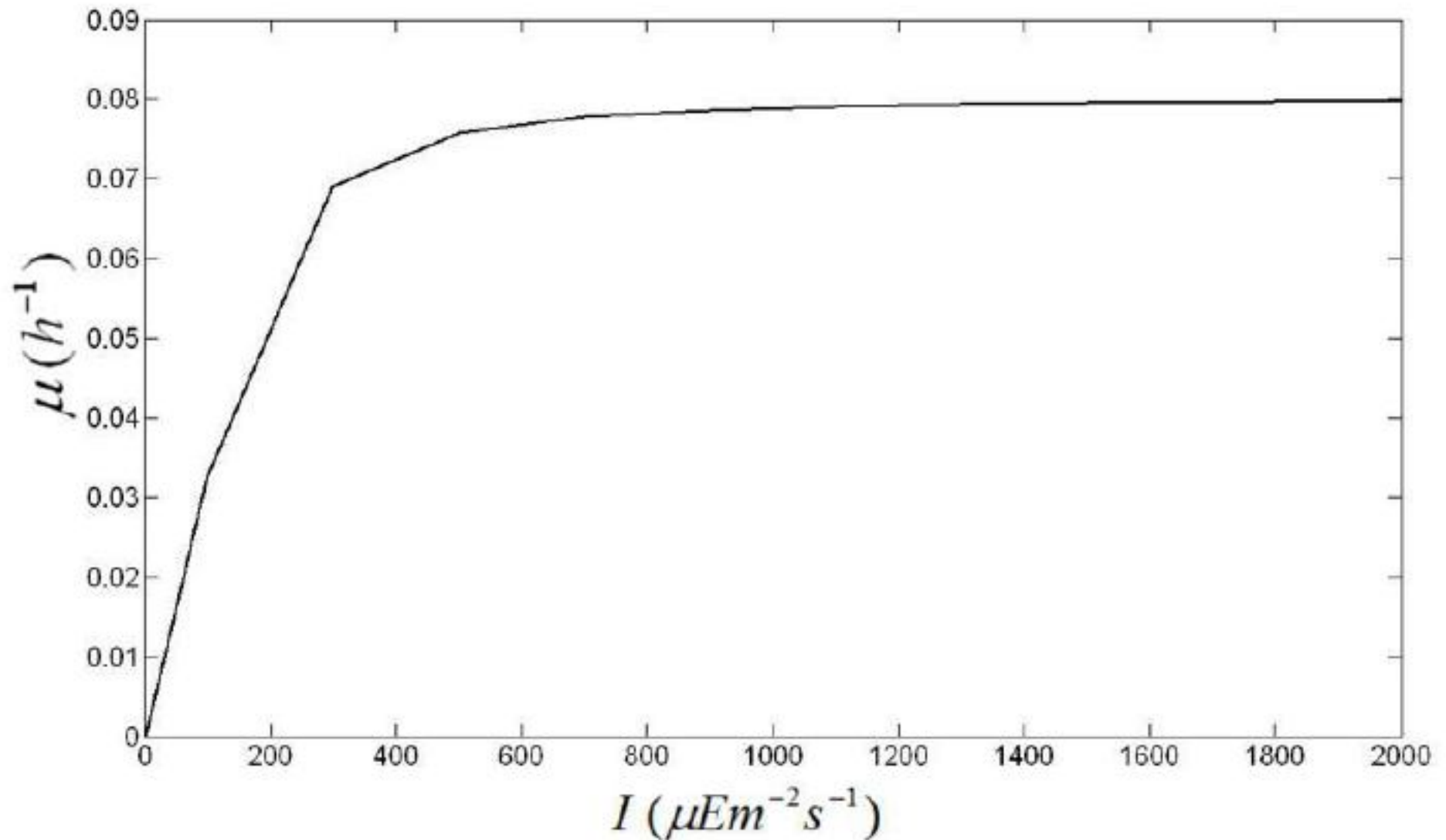
O modelo matemático computacional implementado usa a equação proposta por GRIMA *et al*, 1994, na qual inserimos o incremento FOTOINIBIÇÃO.

$$\mu = \frac{\mu_{MAX} I^n}{I^n + I_k^n}$$

MODELO MATEMÁTICO

- Quanto maior a intensidade luminosa mais próxima do μ_{\max} estará a taxa de crescimento específica
- Quanto maior a concentração do cultivo, será mantido um crescimento constante com intensidades luminosas muito altas

ISTO NÃO É REAL, POIS O CRESCIMENTO SOFRE
FOTOINIBIÇÃO.



NOVA EQUAÇÃO PROPOSTA

INCREMENTO NA
EQUAÇÃO

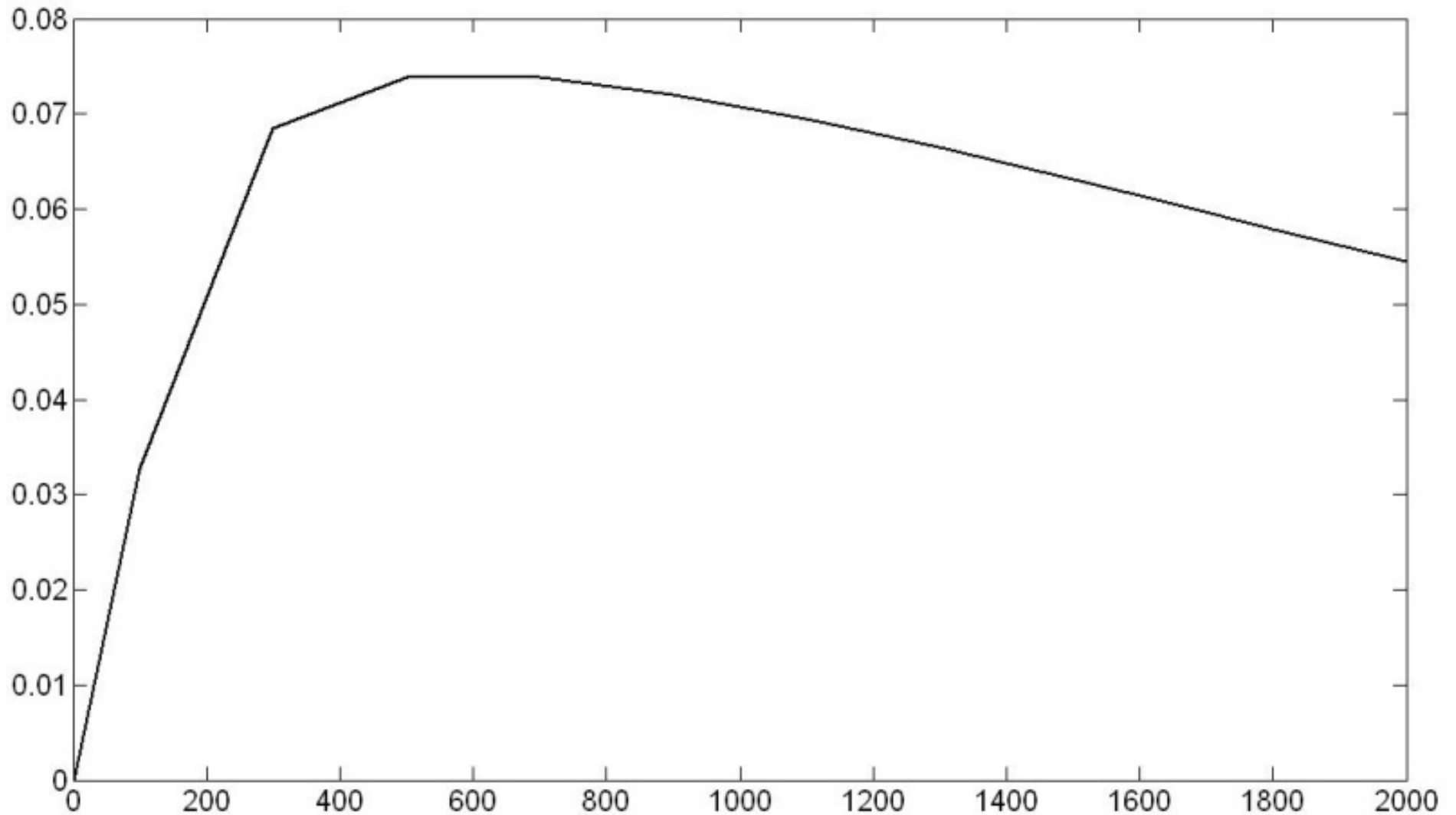


FOTOINIBIÇÃO

- Análise de biomassa em momentos de fotoinibições
- Localização de intensidade média de luminosidade ótima

$$\mu = \frac{\mu_{MAX} I^n}{I^n + I_k^n + \frac{I^{2n}}{k_I S}}$$

TAXA DE CRESCIMENTO ESPECÍFICA AFETADA DRÁSTICAMENTE

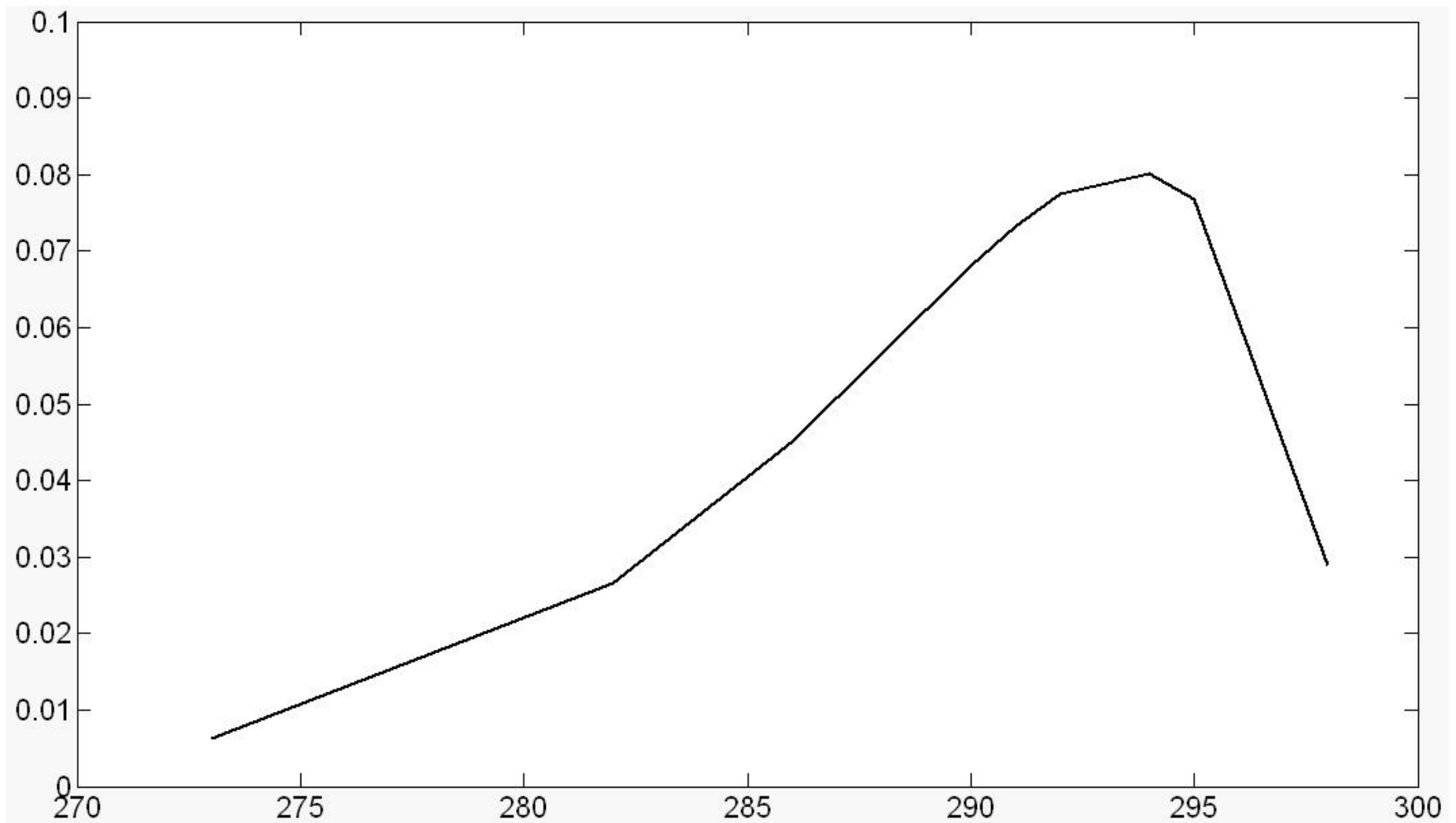


TEMPERATURA

Como μ_{\max} é uma constante que para a microalga *Phaeodactylum tricornutum* corresponde a $0,075 \text{ h}^{-1}$, para mostrar a influência da temperatura no crescimento da cultura, será em função da temperatura utilizando a equação de Arrhenius:

$$\mu_{\text{MAX}} = A_1 e^{\left(\frac{E_a T - T_0}{RT}\right)} - A_2 e^{\left(\frac{E_b T - T_0}{RT}\right)}$$

INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NO CRESCIMENTO DA CULTURA



MODELO COMPUTACIONAL

Neste modelo foi usado dados relacionados a microalga *Phaeodactylum tricornutum* adquiridos de (GRIMA et al., 2001) e (BITAUBÉ PÉREZ et al., 2008) e parâmetros do fotobiorreator proposto por (VARGAS, 2007)

FOTOBIORREATOR PROPOSTO POR (VARGAS, 2007)

- Cultivo semi-contínuo
- Ponto médio de concentração
- Diluição da biomassa

CONSTANTES USADAS NA SIMULAÇÃO NUMÉRICA

$C_0 = 200 \text{ g/m}^3$	$Y_b = 0.0105 \text{ m}^2/\text{g}$
$t_{\text{final}} = 120 \text{ horas (5 dias)}$	$Y'_p = 2.99 \text{ m}^2/\text{g}$
$m = 0.00385 \text{ h}^{-1}$	$I_k = 120 \mu\text{Em}^{-2} \text{ s}^{-1}$
$I_0 = 1600 \mu\text{Em}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$D_i = 0.04 \text{ h}^{-1}$
$\mu_{\text{MAX}} = 0.075 \text{ h}^{-1}$	$n = 2.02$
$k_{is} = 10^7$	$T_0 = 293 \text{ K}$
$A_1 = 0.26 \text{ h}^{-1}$	$A_2 = 0.18 \text{ h}^{-1}$
$E_a = 117040 \text{ Jmol}^{-1}$	$E_b = 163020 \text{ Jmol}^{-1}$
$\text{Pont}_{\text{Médio}} = 350 \text{ g/m}^3$	$\text{Pont}_{\text{variação}} = 20 \text{ g/m}^3$

CÓDIGO DO PROGRAMA

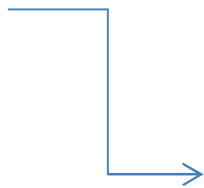
- FORTRAN 95
- INTERFACE GRÁFICA: GNUPLOT

SIMULAÇÕES

CULTIVO SEMI-CONTÍNUO



TEMPERATURA ↔ INTENSIDADE LUMINOSA



NAS SUPERFÍCIES DOS TUBOS



PONTOS ÓTIMOS



MELHOR PRODUTIVIDADE

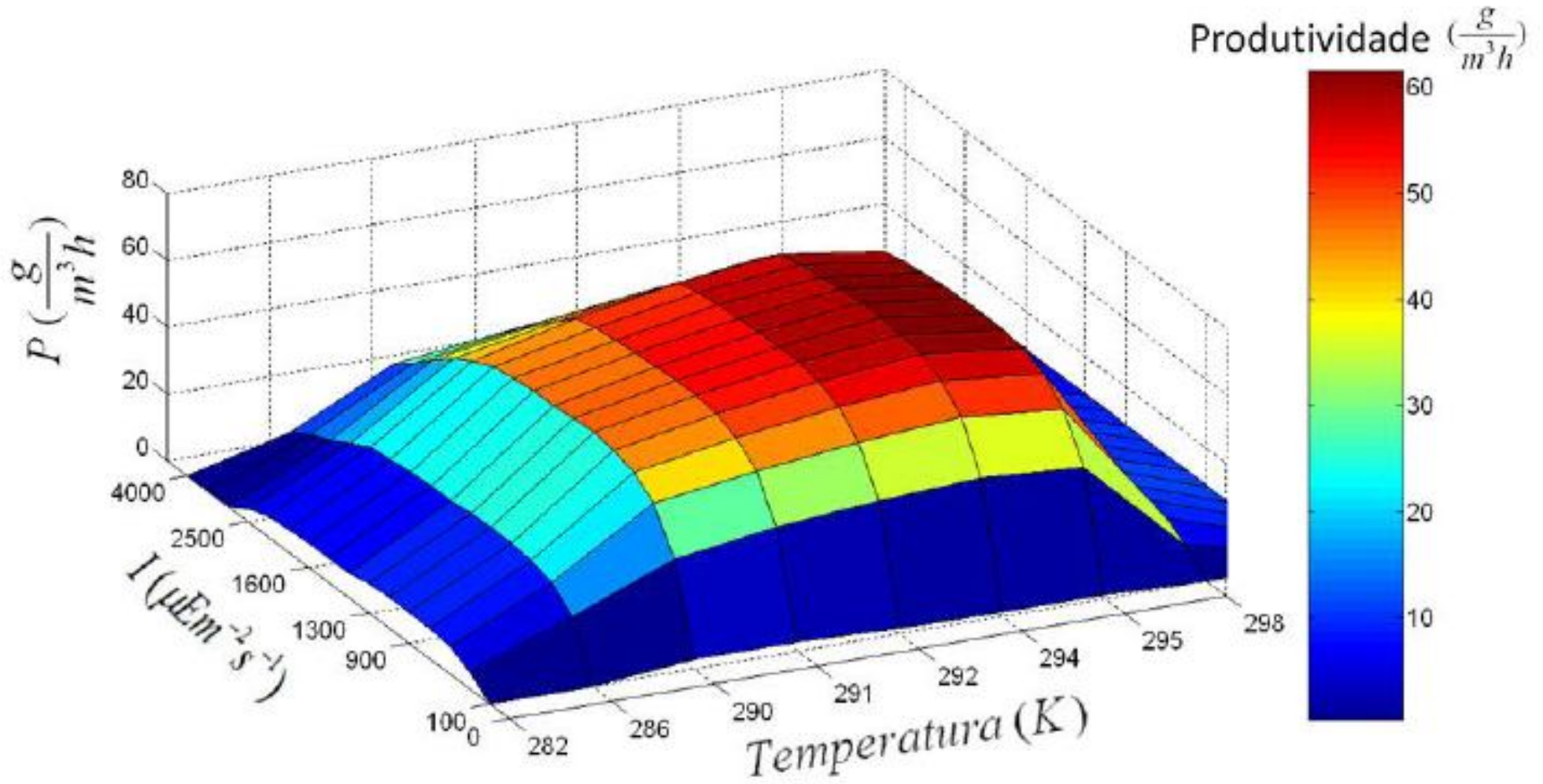
SIMULAÇÕES

- Temperaturas de 282 K a 298 K
- Intensidades luminosas de $100 \mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$ a $4000 \mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$
- Finalidade de analisar o fenômeno de FOTOINIBIÇÃO

SIMULÇÕES NUMÉRICAS PARA CULTIVOS DE 5 DIAS EM MODO SEMI-CONTÍNUO

Temperaturas								
Intensidades Luminosas	282 K	286 K	290 K	291 K	292 K	294 K	295 K	298 K
100 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$	0	0	2,91	2,8	1,58	1,3	1,11	0
300 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$	5,07	16,22	28,36	32,69	35,13	36,65	34,66	5,99
500 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$	8,26	21,98	40,63	45,03	48,28	50,48	47,73	9,65
700 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$	9,14	24,01	45,40	50,31	54,42	56,98	53,70	10,60
900 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$	9,3	24,73	47,38	52,87	57,25	60,34	56,58	10,96
1100 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$	9,16	24,83	48,17	53,90	58,59	61,64	57,78	10,87
1300 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$	8,75	24,42	47,80	53,88	58,55	62,08	57,98	10,52
1450 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$	7,44	23,84	47,04	53,46	58,22	61,95	57,76	10,13
1500 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$	7,34	23,74	46,85	52,93	58,04	61,47	57,32	10,03
1650 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$	7,29	23,17	45,93	52,20	57,52	60,57	56,55	9,69
1800 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$	6,85	22,48	44,88	51,20	56,55	59,71	55,54	9,02
2000 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$	6,41	21,42	42,18	49,48	54,74	58,16	53,93	7,60
2500 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$	3,74	18,14	38,11	43,83	48,53	52,56	47,79	6,15
3000 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$	0	14,50	33,31	38,20	42,58	45,65	41,69	3,58
3500 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$	0	11,55	27,84	32,35	36,29	38,44	35,53	0
4000 $\mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$	0	7,96	22,74	26,45	29,73	32,36	29,28	0

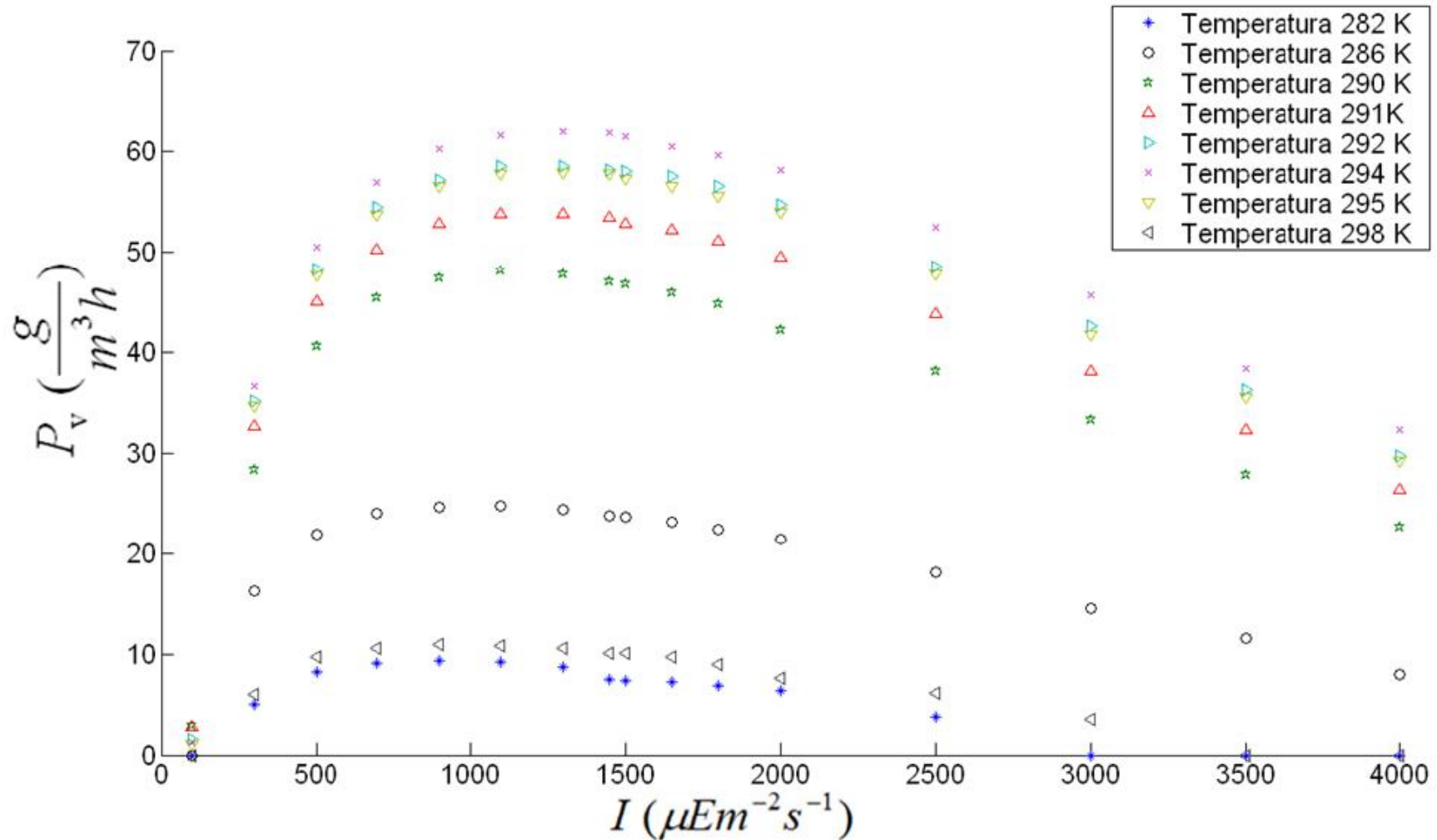
GRÁFICO 3D das VARIAÇÕES REALIZADAS



RESULTADOS

- Dados de produção calculados pelo modelo computacional:
 - Ponto máximo com a temperatura de 294K e intensidade luminosa $1300 \mu\text{Em}^{-2}\text{s}^{-1}$

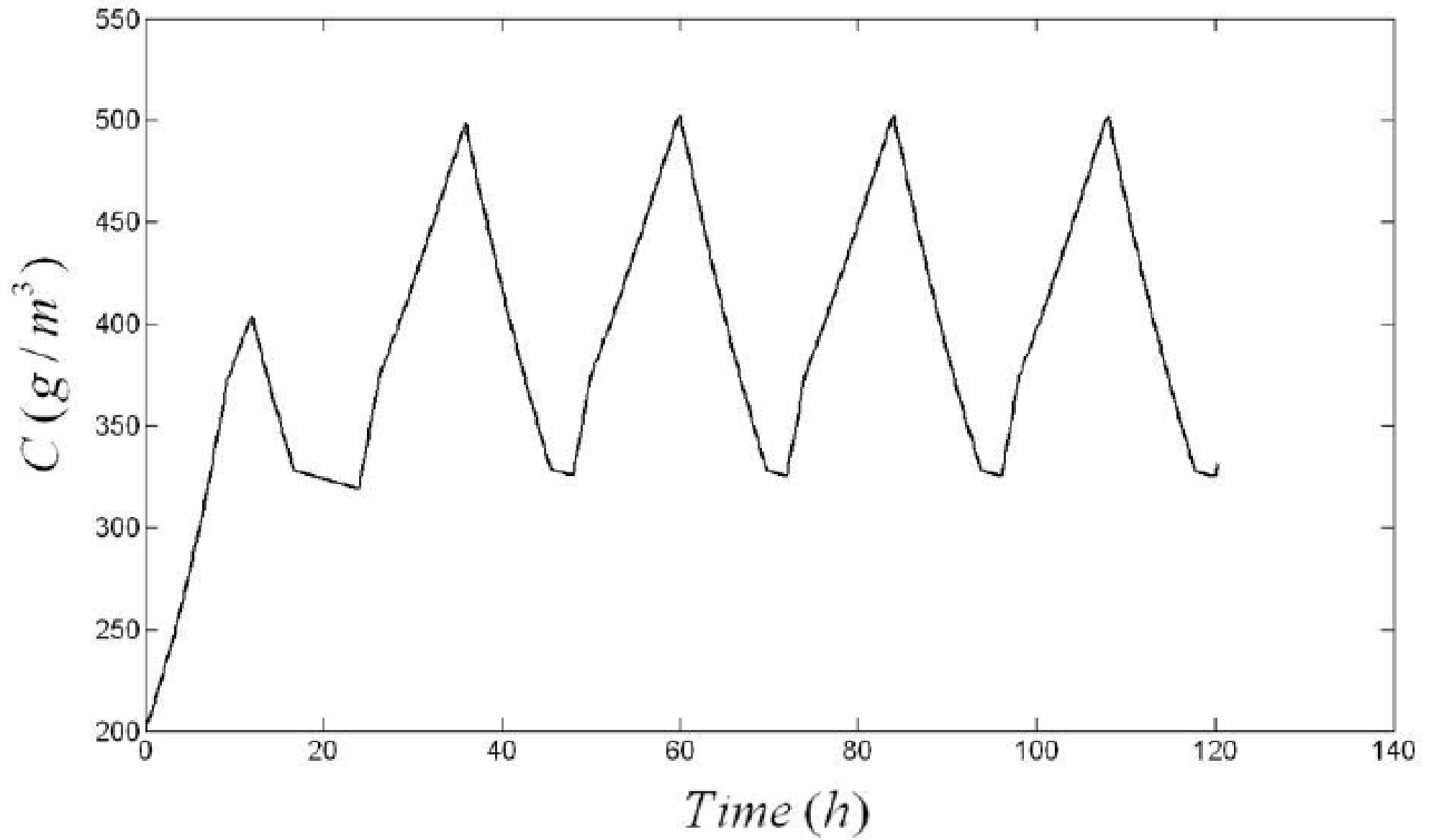
FENÔMENO DE FOTOINIBIÇÃO



PONTO MÁXIMO DE PRODUÇÃO

As simulações permitiram encontrar um ponto máximo de produção, sendo possível a análise gráfica da **CONCENTRAÇÃO** e da **TAXA DE CRESCIMENTO ESPECÍFICA** em relação ao que foi proposto por Vargas(2007)

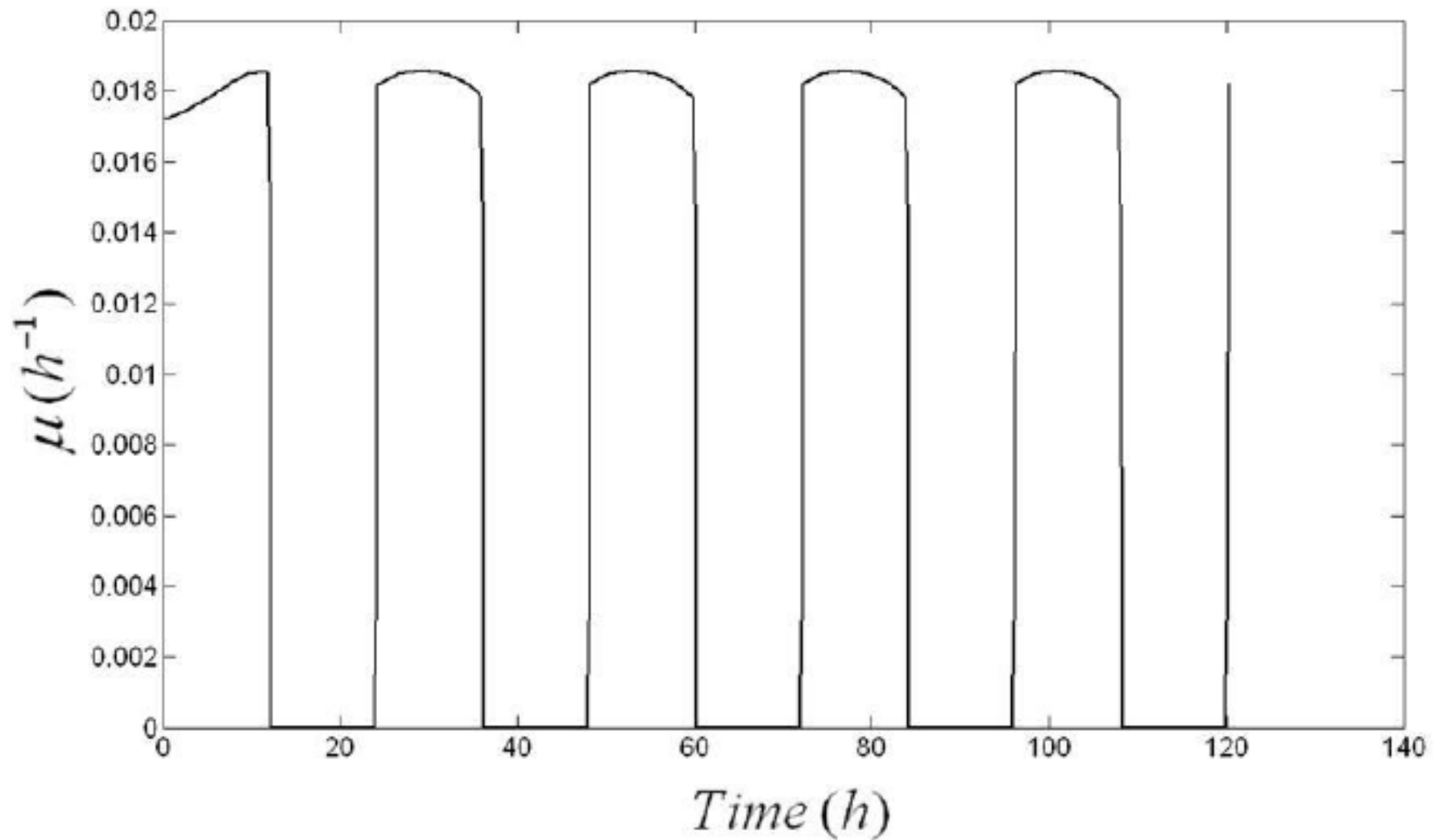
CONCENTRAÇÃO DA CULTURA EM RELAÇÃO AO TEMPO



INTERPRETAÇÃO GRÁFICA

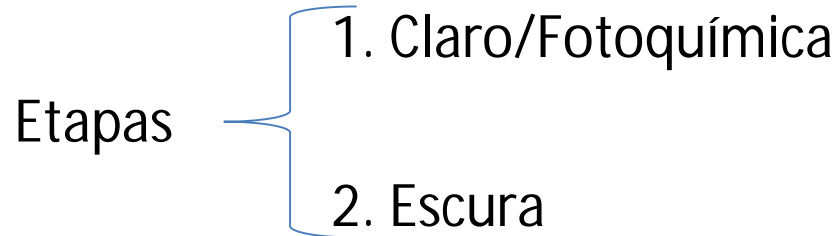
- Estágios de luz-escuridão
- Variação da concentração em torno do ponto médio
- Velocidade de crescimento bastante alta

TAXA DE CRESCIMENTO ESPECÍFICO EM RELAÇÃO AO TEMPO



RESULTADOS

FOTOSSÍNTESE



1. Absorção de luz → Clorofila

- Síntese de ATP
- Fotólise da água

2. Absorção de CO₂

- Redução do dióxido de carbono
- Síntese da glicose

- Não há produtividade na fase escura
- Analogia do modelo computacional com a fotossíntese

QUAL A IMPORTÂNCIA DA MODELAGEM MATEMÁTICA COMPUTACIONAL?

Reproduzir através da simulação



Resultados obtidos experimentalmente

- Identifica-se variáveis que influenciam no processo
- Analisa-se a interação entre as variáveis

CONCLUSÕES

- Percebeu-se que a boa produtividade (rendimento fotossintético) é dependente da intensidade luminosa e da temperatura
- O estudo do crescimento microalgal identificou condições apropriadas simulada para fotobiorreatores compactos

CONCLUSÕES

- Identificou-se:
 - Pontos de maior produtividade dentro do limite de saturação de luz
 - Ponto onde se inicia o processo de fotoinibição, que provoca decréscimo de produtividade
- É importante a incorporação do fenômeno fotoinibição nas equações da taxa de crescimento específico

FINALIDADES

Permitir construir um *modelo matemático completo* do fotobiorreator tubular e compacto na UFPR (Universidade Federal do Paraná) no núcleo de pesquisa e desenvolvimento de energia auto-sustentável

FINALIDADES

Poderá ser previsto e ajustado parâmetros tais como:

- pH
- CO₂
- OXIGÊNIO
- DENSIDADE CELULAR

Finalidade → Obter maior produtividade de biomassa

ÓLEO OBTIDO: convertido em biodiesel e utilizado em um trigerador com o objetivo de fornecer energia ao NPDEAS

AGRADECIMENTOS

- Os autores são gratos pelo apoio de:



- CNPq
- NILKO
- FURG
- UFPR



Nilko



REFERÊNCIAS

- DERNER, R. B. Efeitos de Fontes de Carbono no Crescimento e na Composição Bioquímica das Microalgas *Chaetoceros muelleri* e *Thalassiosira fluviatilis*, com Ênfase no Teor de Ácidos Graxos Poliinsaturados. Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências dos Alimentos, Departamento de Ciências e Tecnologia de Alimentos, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2006
- FERNÁNDEZ, F. G. A., PÉREZ, J. A. P., SEVILLA, J. M. F., CAMACHO, F. G., GRIMA, E. M. Modeling of Eicosapentaenoic Acid (EPA) Production from *Phaeodactylum tricornutum* Cultures in Tubular Photobioreactors. Effects of Dilution Rate, Tube Diameter, and Solar Irradiance. **Biotechnology and Bioengineering**. Vol. 68, Nº 2, 20 Abril 2000.
- FERNÁNDEZ, F. G. A., PÉREZ, J. A. P., SEVILLA, J. M. F., CAMACHO, F. G., GRIMA, E. M. A Model for Light Distribution and Average Solar Irradiance Inside Outdoor Tubular Photobioreactors for the Microalgal Mass Culture. **Biotechnology and Bioengineering**. Vol. 55, Nº 5, 5 Setembro, 1997.
- FEIKEMA, O. W.; MAROSVÖLGYI, M. A.; LAVAUD, J.; GORKOM, H. J. Cyclic electron transfer in photosystem II in the marine diatom *Phaeodactylum tricornutum*. **Biochimica et Biophysica Acta**, 1757, 829–834, 2006.
- FLECK–SHINEIDER, P., LEHR, F., POSTEN, C. Modelling of growth and product formation of *Porphyridium porpureum*. **Journal of Biotechnology**, 132, 134–141, 2007.
- GRIMA, E. M., CAMACHO, F. G., PÉREZ, J. A. S., SEVILLA, J. M. F., FERNANDEZ, F.G. A., CONTRERAS GOMEZ, A., A mathematical model of microalgal growth in light-limited chemostat culture. **J. Chem. Tech. Biotechnol**, 61, 167–173, 1994.
- GRIMA, E. M., CAMACHO, F. G., PÉREZ, J. A. S., FERNANDEZ, F. G. A., SEVILLA, J. M. F. Evaluation of photosynthetic efficiency in microalgal cultures using averaged irradiance. **Enzyme Microb. Technol**. Vol. 21, Outubro, 1997.
- GRIMA, E. M., SEVILLA, J. M. F., FERNANDEZ, F.G. A., CHISTI, Y. Tubular photobioreactor design for algal cultures. **Journal of Biotechnology**, 61, 113–131, 2001
- LAWS, E. A., CHALUP, M. S. A microalgal growth model. American Society of Limnology and Oceanography, 1990.
- PÉREZ, H. E. B. Biodiesel de Microalgas – Parte 1. Energia Verde – Biodiesel, MDL e Tecnologia em Microalgas. 2007.
- PÉREZ, B. E.; PINA, C.I. RODRÍGUEZ, L. P; Kinetic model for growth of *Phaeodactylum tricornutum* in intensive culture photobioreactor. **Biochemical Engineering Journal**
- SÁNCHEZ J. F., SEVILLA, J. M. F., ACIÉN, F. G., CERÓN, M. C., PARRA J. P., GRIMA E. M. Biomass and lutein productivity of *Scenedesmus almeriensis*: influence of irradiance, dilution rate and temperature. **Applied Microbiology and Biotechnology**. 79, 719–729, 2008.
- SERENOTTI, F.; CRESPI, B. A.; TORRES, L.G. Contribuição à modelagem da produção de *Spirulina maxima* em fotobioreatores. **Revista Univ. Rural**. 23, 8–17, 2004.
- TAIZ, L; ZEIGER, E. Fisiologia Vegetal. 3ª ed. Ed. Artmed. Porto Alegre, 2004.
- VARGAS, J. V. C., Núcleo de pesquisa e desenvolvimento de energia auto-sustentável a partir do biodiesel e outras fontes. Projeto financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Edital 039/2007, UFPR.
- XU, H., MIAO, X., WU, Q. High quality biodiesel production from a microalga *Chlorella protothecoides* by heterotrophic growth in fermenters. **Journal of Biotechnology**. 126, 499–507, 2006.

OBRIGADA!