UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

RUI VOGT ALVES DA CRUZ

Estudo da utilização de microalgas e cianobactérias para a captura de dióxido de carbono e produção de matérias-primas de interesse industrial

São Paulo

2011

RUI VOGT ALVES DA CRUZ

Estudo da utilização de microalgas e cianobactérias para a captura de dióxido de carbono e produção de matérias-primas de interesse industrial

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do Título de Doutor em Engenharia Química

Área de Concentração:

Engenharia Química

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Augusto Oller do Nascimento

São Paulo

2011

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação da Publicação
Serviço de Documentação
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 22 de novembro de 2011.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Cruz, Rui Vogt Alves da
Estudo da utilização de microalgas e cianobactérias para a captura de dióxido de carbono e produção de matérias primas de interesse industrial / R.V.A. da Cruz. -- ed.rev. -- São Paulo, 2011.
160 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1. Processo (Modelagem; Análise econômica) 2. Microalgas 3. Dióxido de carbono (Mitigação) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II. t.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Claudio Augusto Oller do Nascimento pela orientação, incentivo e principalmente compreensão e flexibilidade que tornaram possível a realização deste trabalho em paralelo com a minha carreira na indústria e uma mudança de país.

À minha esposa, Larissa Falsarella Vogt Alves da Cruz, pelo apoio constante e pela considerável paciência em relação às muitas noites, finais de semana e dias de férias dedicados à pesquisa e redação desta tese.

Aos meus pais, pelo apoio e incentivo à minha paixão por ciência desde a infância, pela herança do orgulho em ser engenheiro, pelo suporte aos estudos e a uma carreira que me levaram a Rehovot, Karlsruhe e Freeport e especialmente pela revisão mais minuciosa que uma tese poderia receber, apoio logístico na impressão e depósito, pelo Eng^{o} Pedro Alves da Cruz Jr.

Aos professores e colegas do Laboratório de Simulação e Controle de Processos, pelos produtivos seminários e discussões e pela flexibilidade em realizá-las através de videoconferência.

A David West, Keith Watson e Steven Montgomery da The Dow Chemical Company, pelo apoio e incentivo durante a fase final de elaboração da minha tese nos Estados Unidos e Victor Hugo Monje, John Biggs e Marcelo Fiszner da Dow Brasil S.A. pelo suporte e flexibilidade durante os anos iniciais de trabalho e semestres de disciplinas.

RESUMO

CRUZ, R.V.A. Estudo da utilização de microalgas e cianobactérias para a fixação de dióxido de carbono e produção de matérias-primas de interesse industrial. 2011. 160 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

O uso de microalgas e cianobactérias para a produção de biocombustíveis e outros produtos e matérias-primas de interesse comercial tem sido amplamente divulgado como uma tecnologia sustentável bastante promissora, em função das elevadas produtividades areais, potencial para fixação de CO_2, uso de terras não adequadas para cultivo e possibilidade de utilizar fontes alternativas de nutrientes, tais como água salobra ou efluentes agroindustriais. A produção comercial de cianobactérias em tanques abertos em formato de pista foi estudada combinando-se a modelagem matemática do crescimento nos tanques com a avaliação técnica, econômica e de sustentabilidade do processo. Construiu-se um macromodelo para a simulação dos tanques, que permitiu determinar o impacto de variáveis ambientais como, por exemplo, temperatura e luminosidade, e otimizar condições de operação e coleta. A análise econômica detalhada demonstrou o impacto dos custos de capital, operação e consumo de energia pelo processo, também destacando a importância da receita de produtos de alto valor agregado para a viabilidade do sistema, com base na tecnologia atual. Os valores de transformidade e índices de sustentabilidade e carga ambiental, obtidos através da análise emergética, são comparáveis com outros processos para obtenção de biocombustíveis de segunda geração, mas os elevados custos de construção e operação e grande consumo de energia nas etapas de coleta e extração representam ainda grandes desafios à sua sustentabilidade. A análise de sensibilidade para as principais variáveis de processo e estudos de caso para melhorias e modelos de negócio alternativos permitiram priorizar áreas para pesquisa futura com base no impacto econômico e ambiental.

Palavras-chave: Microalgas. Dióxido de carbono (mitigação). Processos (modelagem; análise econômica). Análise emergética.

ABSTRACT

CRUZ, R.V.A. Study on the use of microalgae and cyanobacteria for the fixation of carbon dioxide and production of raw materials for industrial applications. 2011. 160 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

The use of microalgae and cyanobacteria for the production of biofuels and other substances of commercial interest has been widely advertised as an extremely promising sustainable technology, due to the high areal productivity, potential for fixation of CO_2, possibility of using non-arable land and alternative sources of nutrients such as brackish water and agricultural and industrial effluents. The commercial production of cyanobacteria in open raceway ponds was studied through the combination of a mathematical model for the algal growth with technical, economical and sustainability evaluations. A macromodel was developed to simulate the ponds, and it was used to assess the impact of environmental variables, such as light and temperature, and to optimize the process conditions for operation and harvesting. A detailed economic analysis demonstrated the impact of capital, operation costs and energy consumption, also highlighting the importance of revenue from high value products to process viability, considering the current technology. The transformity, emergy sustainability and environmental loading indices obtained by emergy analysis are comparable to other second generation biofuels, but the high construction and operation costs and energy consumption by the harvesting and extraction steps still represent major challenges to sustainability. The sensitivity analysis and evaluation of both technology improvements and alternative business models enabled the prioritization of future research areas, based on economic and environmental impact.

Keywords: Microalgae. Carbon dioxide (mitigation). Processes (modeling; economic analysis). Emergy analysis.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Potencial de aquecimento global de vários gases, adaptado de Stern et al. (2006) 17
Tabela 2.2 – Principais grupos de algas e biodiversidade, adaptado de Metting Jr. (1996) 19
Tabela 2.3 - Composição elementar de *Spirulina platensis* (CORNET et al., 1992) . 25
Tabela 2.4 - Composição aproximada de *Spirulina platensis* cultivada em laboratório e tanques abertos, segundo Ciferri (1983), em % de massa seca. 25
Tabela 2.5 – Comparação de características e desempenho dos principais tipos de reatores para cultivo de microalgas e cianobactérias, adaptado de Borowitzka (1999) 27
Tabela 2.6 – Principais espécies de microalgas e cianobactéria, adaptado de Spolaore et al. (2006) 34
Tabela 2.7 – Exemplos de compostos de alto valor agregado produzidos por algas (CARDOZO et al., 2007) 36
Tabela 2.8 – Comparação entre microalgas e culturas convencionais para o rendimento de óleo por área utilizada para cultivo, adaptado de Chisti, 2007 38
Tabela 2.9 – Empresas de tecnologia de cultivo de microalgas e cianobactérias 44
Tabela 2.10 – Símbolos mais comuns usados na construção de diagramas emergéticos, adaptado de Odum (1996) 57
Tabela 2.11 – Tabela de fluxos emergéticos (ODUM, 1996) 58
Tabela 2.12 – Exemplos de transformidades 59
Tabela 2.13 – Principais Índices Emergéticos 60
Tabela 4.1 - Entradas e saídas do modelo para crescimento de Spirulina platensis em tanques abertos 72
Tabela 4.2 – Estimativas de consumo de energia elétrica para transferências e cultivo 74
Tabela 4.3 - Estimativas para cálculo de custos adicionais de capital 75
Tabela 4.4 – Fatores para estimativas de custos adicionais de operação 76
Tabela 4.5 – Índices emergéticos utilizados neste estudo 77
Tabela 5.1 – Parâmetros utilizados na simulação do modelo 79
Tabela 5.2 - Valores de produtividade para um tanque com área de 1.000 m^2 e 0,20 m de profundidade, em kg dia^{-1} 91

Tabela 5.3 – Impacto de concentração para coleta e taxa de renovação na produtividade de *Spirulina platensis* em laboratório, a partir de dados de Reichert, Reinehr e Costa (2006) 92
Tabela 5.4 – Dimensões e parâmetros de operação para sistema de referência 93
Tabela 5.5 – Estimativa da taxa de evaporação de água nos tanques, em função de temperatura e velocidade do vento 94
Tabela 5.6 – Emissões estimadas de para uma usina termoelétrica de 200MW 95
Tabela 5.7 – Balanço geral do sistema 96
Tabela 5.8 – Detalhamento do investimento de capital para o sistema de referência 100
Tabela 5.9 – Custos de operação para sistema de referência 101
Tabela 5.10 – Descrição dos cenários alternativos estudados 102
Tabela 5.11 – Resultados da análise econômica para os cenários alternativos 103
Tabela 5.12 – Resultados econômicos para o sistema modelo proposto 104
Tabela 5.13 – Planilha de contabilidade emergética para o sistema de referência. 106
Tabela 5.14 – Contribuições e índices emergéticos para o sistema de referência.. 107
Tabela 5.15 – Contribuições e índices emergéticos considerando-se somente a etapa de cultivo 108
Tabela 5.16 – Resumo dos índices emergéticos para os cenários alternativos 116
Tabela 5.17 - Índices emergéticos para sistema ideal proposto..... 116
Tabela 6.1 – Lista de prioridades de pesquisa, em função do impacto na viabilidade econômica e índices de sustentabilidade 120

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Relação geral entre a intensidade luminosa e a taxa de crescimento algal, demonstrando o fenômeno de fotoinibição, adaptada de Goldman (1979) 21
Figura 2.2 – Fotografia aérea das instalações da Cyanotech no Havaí (GoogleEarth) 29
Figura 2.3 – Microalgas como fonte de combustíveis e matérias-primas de interesse comercial, adaptado de Stephens et al. (2010) 37
Figura 2.4 – Reação de produção de biodiesel, a partir da esterificação com metanol, adaptada de Chisti (2007) e Fukuda (2001) 39
Figura 2.5 – Exemplo de comportamento presa-predador 52
Figura 2.6 – Diagrama emergético demonstrando a produção de madeira em uma floresta de pinheiros sueca, adaptado de Odum (1996).....55
Figura 2.7 – Exemplo de diagrama emergético para o sistema estudado por Bastianoni et al. (2008) de produção de óleos para biocombustíveis, a partir de algas extraídas da lagoa Orbetello.....58
Figura 4.1 – Diagrama de blocos simplificado do processo de referência para sistemas de cultivo e extração 68
Figura 4.2 – Intensidade luminosa em função da profundidade do tanque e camada fotossinteticamente ativa 70
Figura 5.1 – Resultados de simulação (-) sobre dados experimentais (x) após ajuste de parâmetros 80
Figura 5.2 – Influência da concentração de biomassa e intensidade luminosa na taxa de crescimento fotossintético específico 81
Figura 5.3 – Efeito da temperatura na taxa de crescimento, para diferentes valores de I_0 82
Figura 5.4 – Séries temporais de temperaturas e intensidades luminosas utilizadas nas simulações para determinação dos efeitos dos parâmetros de processo 83
Figura 5.5 – Efeito da profundidade do tanque na produtividade para diferentes concentrações iniciais de biomassa 84
Figura 5.6 – Efeito da concentração inicial na produtividade areal diária.....84
Figura 5.7 – Valores médios de temperatura e radiação solar para a região de Campinas ao longo do ano 86

Figura 5.8 – Produtividade areal média ao longo do ano, simulada para tanque de cultura na região de Campinas.....87
Figura 5.9 – Produtividade areal máxima ao longo do ano para cultivo de *Isochrysis galbana* em Eilat, Israel (SUKENIK et al. 1991) 88
Figura 5.10 – Simulação do desenvolvimento de populações de presa e predador para uma contaminação inicial de 50 mg L^{-1} 89
Figura 5.11 – Impacto da concentração de contaminação por predador na produtividade/consumo médio de cianobactéria no período de 5 dias.....89
Figura 5.12 – Exemplo de ciclo de coleta e reposição e impacto na concentração e nível do tanque.....90
Figura 5.13 – Consumo de energia elétrica por etapa do processo para o sistema de referência 97
Figura 5.14 – Consumo de gás natural por etapa do processo para o sistema de referência 97
Figura 5.15 – Análise de sensibilidade para o modelo econômico simplificado 98
Figura 5.16 – Efeitos normalizados dos fatores na taxa interna de retorno do projeto 99
Figura 5.17 – Diagrama emergético para o sistema.....105
Figura 5.18 – Fluxos emergéticos para o sistema de referência, por etapa do processo.....108
Figura 5.19 – Análise de sensibilidade para transformidade efetiva, função de algumas variáveis de processo 109
Figura 5.20 – Análise de sensibilidade para o índice de sustentabilidade Emergética (ESI) em função da área e teor de óleo na biomassa 110
Figura 5.21 – Análise de sensibilidade para o índice de sustentabilidade emergética (ESI) em função da produtividade areal média 111
Figura 5.22 – Transformidades efetivas para os cenários alternativos 113
Figura 5.23 – Percentuais de emergia renovável para os cenários alternativos 114
Figura 5.24 – Índices de Sustentabilidade Emergética para os cenários alternativos 114
Figura 5.25 – Taxa de intercâmbio emergético para cenários alternativos 115

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

2 REVISÃO DA LITERATURA 16

2.1 Aquecimento global e gases causadores de efeito estufa 16

2.2 Microalgas e cianobactérias 19

2.2.1 Fotossíntese 20

2.2.2 Nutrição e composição de microalgas e cianobactérias 22

2.2.3 Sistemas de cultivo 26

2.2.4 Métodos de separação 31

2.2.5 Aplicações 34

2.2.6 Avanços tecnológicos de maior impacto 41

2.3 Modelagem matemática em fotobioprocessos 46

2.4 Análise emergética 54

2.4.1 Metodologia de análise 56

2.4.2 Aplicações da análise emergética 62

3 OBJETIVOS 66

4 DESCRIÇÃO DO PROCESSO E METODOLOGIA ANALÍTICA 67

4.1 Definição do sistema de referência 67

4.2 Desenvolvimento do Modelo Matemático 68

4.3 Balanços de Massa 72

4.4 Análise econômica 74

4.5 Análise emergética 77

4.6 Análise de sensibilidade e estudo de cenários alternativos 77

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 79
5.1 Modelo matemático para crescimento em tanques em pista 79
5.1.1 Ajuste de parâmetros do modelo 79
5.1.2 Influência dos parâmetros na produtividade do sistema 80
5.1.3 Variação da produtividade ao longo do ano 85
5.1.4 Introdução de contaminação por predador no modelo 88
5.1.5 Otimização das condições de operação 90
5.2 Balanços de massa 93
5.2.1 Definição do sistema de referência 93
5.2.2 Balanço de água 94
5.2.3 Balanços de CO_2 e nutrientes 94
5.2.4 Balanço Geral do Sistema 96
5.2.5 Consumo de Energia 96
5.3 Análise econômica do processo 98
5.3.1 Modelo econômico simplificado 98
5.3.2 Detalhamento de custos de capital 100
5.3.3 Custo de operação e Receitas 101
5.3.4 Cenários alternativos e impacto de inovações 102
5.4 Análise Emergética 105
5.4.1 Análise do Sistema de Referência 105
5.4.2 Análise de sensibilidade 109
5.4.3 Cenários alternativos e impacto de inovações 112
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 117
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 121
Apêndice 1: Fluxogramas e detalhamento do modelo 135
Apêndice 2: Balanços de Massa 137

Apêndice 3: Planilhas de Análise Econômica e Emergética 141

1 INTRODUÇÃO

O aumento considerável nas emissões de gases causadores de efeito estufa, através da atividade humana no período que se seguiu à Revolução Industrial é uma fonte crescente de preocupação ambiental, em função do seu impacto no aquecimento global (STERN et al., 2006). Entre estes gases, o CO_2 é responsável por mais da metade do potencial de efeito estufa, em função das grandes quantidades emitidas (HUGHES; BENEMANN, 1997) e tempo de permanência na atmosfera.

Dentre as tecnologias atualmente propostas para a mitigação de CO_2, a utilização de microalgas e cianobactérias é particularmente promissora, tanto em função da elevada produtividade por área como pelo interesse comercial em seus potenciais produtos (CARDOZO et al, 2007, CHELF; BROWN; WYMAN, 1993). Cianobactérias do gênero *Spirulina*, especialmente a *Spirulina platensis*, têm sido amplamente estudadas para esta aplicação dada a sua relativa facilidade de cultivo e importância comercial para a produção de complementos alimentares e ração animal (RAOOF; KAUSHIK; PRASANA, 2006).

O uso de fotobiorreatores fechados pode ser justificado para aplicações específicas com a produção de substâncias de alto valor agregado. No entanto, estimativas de custo mostram que tanques abertos representam a alternativa mais econômica para a conversão de CO_2 em biomassa por microalgas e cianobactérias (BENEMANN; OSWALD, 1996). Embora a literatura descreva um número considerável de modelos mecanísticos e empíricos desenvolvidos para desenhos variados de fotobiorreatores, a modelagem de tanques abertos é mais desafiadora, em função dos problemas relativos à extrapolação de dados de laboratório e a carência de dados experimentais (GUTERMAN; VONSHAK; BEN-YAAKOV, 1990; JAMES; BORIAH, 2010).

Conjuntamente com modelos para a simulação e otimização do processo, a análise econômica das tecnologias de captura e sequestro de CO_2 é essencial para a determinação de sua viabilidade industrial, assim como para a identificação das principais necessidades de desenvolvimento.

Análise emergética é uma ferramenta de contabilidade ambiental que permite avaliar recursos e serviços oriundos tanto de sistemas econômicos como ambientais em uma base energética comum (ODUM, 1996). Sua utilização permite avaliar a sustentabilidade de longo prazo de um sistema (BASTIANONI; MARCHETTINI, 2000), tendo sido utilizada para análise de sistemas diversos como produções agrícolas, unidades industriais, políticas públicas, nações e interações de comércio (BROWN; ULGIATI, 2004).

Existe, portanto, grande interesse científico e industrial na elaboração de um modelo global que possibilite a avaliação de tecnologias para cultivo de microalgas e cianobactérias para produção de matérias-primas de interesse comercial e fixação de CO_2, através de uma análise combinada de indicadores de desempenho de processo, econômicos e de sustentabilidade. Há, adicionalmente, uma importância regional para esta classe de projeto, uma vez que o Brasil possui, em grande parte do seu território, elevado potencial para o cultivo de microalgas, com faixas de temperatura adequadas e alta disponibilidade de irradiação solar (COSTA et al., 2000).

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Aquecimento global e gases causadores de efeito estufa

O impacto ambiental das mudanças causadas pelo homem desde a Revolução Industrial pode estar colocando a estabilidade planetária em risco (ROCKSTRÖM et al., 2009). Emissões sem precedentes de gases causadores de efeito estufa são a causa mais provável de recentes mudanças climáticas (HUNTLEY; REDALJE, 2007). O dióxido de carbono é considerado o mais importante dos gases causadores de efeito estufa gerados pela atividade humana e suas emissões anuais aumentaram em cerca de 80% entre 1970 e 2004 (GREENWELL et al., 2010). Existe uma convergência crescente na comunidade técnica em tentar conter o aquecimento global no máximo em 2ºC acima dos valores pré-industriais. Com base nesta meta, Rockström et al. (2009) propuseram um limite máximo de concentração de CO_2 na atmosfera de 350 ppm, abaixo, portanto, da concentração atual de 387 ppm. Estima-se que uma redução de 25-40% nas emissões de CO_2 até 2020 e de 80-90% até 2050 seja necessária para controlar o aquecimento global (STEPHENS et al., 2010).

A Tabela 2.1 compara o Potencial de Aquecimento Global definido para vários gases. Embora outros poluentes possuam um potencial de aquecimento global sensivelmente superior, o CO_2 é responsável por mais da metade do potencial de impacto de todos os gases de efeito estufa (HUGHES; BENEMANN, 1997; STERN et al., 2006).

Tabela 2.1 – Potencial de aquecimento global de vários gases, adaptado de Stern et al. (2006)

Gás	**Potencial de Aquecimento Global**
Gás Carbônico	1 (convenção)
Metano	23
Óxido Nitroso	296
Hidrofluorcarbonetos	12 – 12.000
Perfluorcarbonetos	5.000-12.000
Hexafluoreto de Enxofre	22.200

Os principais métodos propostos para redução do acúmulo de CO_2 na atmosfera baseiam-se na redução do uso de combustíveis fósseis, na remoção de CO_2 da atmosfera ou na captura, seqüestro e utilização do CO_2 emitido por combustíveis fósseis antes que seja liberado para a atmosfera (BENEMANN, 1997).

Considerações termodinâmicas realizadas por Chelf, Brown e Wyman (1993) mostram que uma reserva econômica viável de CO_2 deve ocorrer na forma de um líquido ou sólido. Analisando a reação com óxido de cálcio ou carbonato de sólido, os autores mostraram que estes processos seriam econômica e energeticamente inviáveis. Florestas e outros sistemas baseados em vegetais superiores, por sua vez, não podem ser utilizados em todas as áreas. Tecnologias de biocombustíveis utilizando alimentos como matérias-primas têm uma função importante, mas com um potencial para substituir apenas parte da demanda global para combustíveis para transporte (HILL et al., 2006).

A tecnologia de microalgas tem o potencial de contribuir na redução de longo prazo dos riscos de aquecimento global (BENEMANN; OSWALD, 1996, CHELF; BROWN; WYMAN, 1993; GAVRILESCU; CHISTI, 2005). Em função da disponibilidade de CO_2 e necessidade de mitigação, a fixação de gases provenientes de caldeiras industriais ou usinas termoelétricas tem sido amplamente estudada

(KADAM, 1997; KURANO et al., 1995; MUÑOZ; GUIEYSSE, 2006). A localização dos tanques de cultivo – isto é, integrada ou distante da fonte de CO_2 – impacta na decisão entre utilizar diretamente o gás de queima ou sua purificação prévia através de captura com aminas. A escolha é essencialmente econômica, baseada na comparação de custos de compressão e transporte versus custo de captura (KADAM, 1997; STEPHENS et al., 2010).

A adoção de processos capazes de mitigar emissões de gases causadores de efeito estufa possui também um importante potencial econômico. Em condições pré-crise econômica mundial, mercados internacionais de créditos de carbono chegaram a operar mais de US$30 bilhões anualmente (HEPBURN, 2007).

2.2 Microalgas e cianobactérias

Tradicionalmente o termo microalgas pode ser utilizado tanto se referindo a algas microscópicas como a bactérias fotossintetizantes (TOMASELLI, 2004), designando portanto organismos consideravelmente distintos em origem, composição química e morfologia (LOURENÇO, 2006). Microalgas são encontradas em todas as partes do mundo, principalmente em águas, mas também estão presentes na superfície de todos os tipos de solo (TOMASELLI, 2004).

Microalgas são normalmente classificadas a partir das seguintes características: pigmentos; substâncias de reserva ou produtos assimilados da fotossíntese; presença de flagelos; química da parede celular; presença ou ausência de um núcleo celular; ciclo de vida e reprodução. A grande diversidade bioquímica apresentadas por estes microorganismos é a base das inúmeras aplicações industriais e biotecnológicas (METTING JR, 1996). A Tabela 2.2 mostra os principais grupos de algas e respectivo número estimado de espécies.

Tabela 2.2 – Principais grupos de algas e biodiversidade, adaptado de Metting Jr. (1996)

Grupo	Número estimado de espécies
Cyanophyta (cianobactérias)	1.200
Rhodophyta	5.500-20.000
Cryptophyta	1.200
Chlorophyta (algas verdes)	35.000-100.000
Euglenophyta	2.200
Pyrrhophyta (dinoflagelados)	3.500-11.000
Chromophyta	110.000-10.000.000

Grande parte do interesse nestes microorganismos está baseado no seu potencial de utilização para a produção de biomassa para alimentos, ração e produtos químicos, utilizando energia solar. (TOMASELLI, 2004). No mar, mais de

90% da fotossíntese é realizada pelas algas (LOURENÇO, 2006). A eficiência fotossintética da biomassa aquática é na média consideravelmente superior (6-8%) à da biomassa terrestre (1,8-2,2%) (ARESTA; DIBENEDETTO; BARBERIO, 2005).

2.2.1 Fotossíntese

Fotossíntese é definida como o processo global de redução fotoquímica de CO_2 associado à produção de O_2. Este processo é composto por uma reação fotoquímica em que ocorre absorção de energia luminosa por clorofila e reações químicas fortemente correlacionadas e por reações de escuro (GAFFRON, 1943). A reação simplificada de fotossíntese é demonstrada pela Equação 2-1.

$$CO_2 + H_2O \xrightarrow{luz} (CH_2O) + O_2 \qquad (2\text{-}1)$$

A produção de biomassa a partir de energia luminosa ocorre através da fotossíntese oxigênica, que converte dióxido de carbono em carboidratos e oxigênio. A conversão é tradicionalmente dividida em dois estágios: claro e escuro. Nas reações de claro, que ocorrem nas membranas fotossintéticas, a energia luminosa é convertida gerando $NADPH_2$ (redutor bioquímico) e ATP. Nas reações de escuro, que ocorrem no estroma, o $NHADPH_2$ e o ATP são usados na redução bioquímica de CO_2 a carboidratos (MASOJIDEK et al., 2004). Reações de claro usam energia luminosa para gerar NADPH e ATP. Durante as reações de escuro, independentes da luz, NADPH e ATP são usados para sintetizar carboidratos a partir de CO_2 e H_2O (VOET; VOET, 1995).

Luz é a fonte básica de energia para organismos fotoautróficos, como as microalgas. A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) é de aproximadamente 43-45% na faixa de comprimento de onda de 400 a 700 nm. A eficiência fotossintética (PE) é definida como a fração de luz disponível que é armazenada nas células na forma de biomassa (CARVALHO; MEIRELES; MALCATA, 2006).

A exposição a densidades de fluxo luminoso excessivas pode causar uma queda nas taxas de fotossíntese e conseqüentemente afetar o crescimento das microalgas, pelo fenômeno conhecido como fotoinibição (SUKENIK; FALKOWSKI; BENNETT, 1987), associado a danos no sistema receptor da fotossíntese (PULZ, 2001).

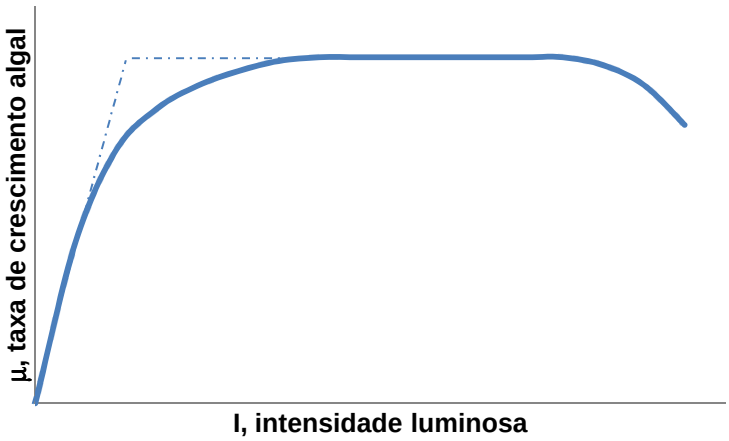


Figura 2.1 – Relação geral entre a intensidade luminosa e a taxa de crescimento algal, demonstrando o fenômeno de fotoinibição, adaptada de Goldman (1979)

Estima-se que a fotossíntese fixe anualmente 10^{11} toneladas de carbono, representando o armazenamento de 10^{18} kJ de energia (VOET; VOET, 1995). Produzir 100 toneladas de biomassa algal fixa aproximadamente 180 toneladas de CO_2 (FAO, 2009, CHISTI, 2007). Como regra geral, a respiração na fase escura representa menos que 10% da produção fotossintética total (GROBBELAAR, 2004).

2.2.2 Nutrição e composição de microalgas e cianobactérias

Algas são capazes de distintas modalidades tróficas (de nutrição) como autotrofia (fototrofia), heterotrofia (fagotrofia) e mixotrofia (quando tanto CO_2 quanto nutrientes orgânicos são necessários para o crescimento). Microalgas necessitam das mesmas alimentações básicas que plantas superiores, como luz, água, gás carbônico e nutrientes inorgânicos (WEISSMAN; GOEBEL, 1988). Organismos fotoautróficos necessitam essencialmente de nutrientes minerais inorgânicos, embora muitos precisem adicionalmente de quantidades mínimas de compostos orgânicos, como vitaminas (GROBBELAAR, 2004).

Uma vez que 50% da biomassa algal é constituída por carbono, este elemento é o principal nutriente para crescimento celular. O gás carbônico constitui apenas 0,03% no ar atmosférico, razão pela qual os fluxos de transferência de CO_2 em condições normais são relativamente baixos. Em função disso, ar enriquecido com CO_2 é a mistura mais comum em sistemas industriais (CARVALHO; MEIRELES; MALCATA, 2006). Doucha, Straka e Lívanský (2005) demonstraram que para o cultivo de *Chlorella* sp. em um fotobiorreator aberto a utilização de CO_2 puro ou gás de queima com o fonte de carbono não afeta a produtividade.

Depois de carbono, nitrogênio é o segundo nutriente mais importante (GROBBELLAR, 2004; PRECOTT, 1984). Seu teor na biomassa vai de 1% a mais de 10%, sendo mais comumente fornecido como nitrato (NO_3^-). Embora nitratos sejam amplamente utilizados nos principais meios de cultura, o uso de fontes mais baratas de nitrogênio é bastante atraente do ponto de vista econômico. Sassano et al. (2007) propuseram, por exemplo, o uso de cloreto de amônia como fonte de nitrogênio para o cultivo de *Spirulina platensis*. Atualmente o custo de nitrogênio é da ordem de US$ 1,4 kg^{-1}, impactando consideravelmente no custo final da biomassa (GREENWELL et al., 2010).

O fósforo é essencial para o crescimento e vários processos celulares, como transferência de energia, biossíntese de ácidos nucléicos, etc. Embora seu teor seja da ordem de 1%, é um dos principais fatores limitantes de crescimento. O fornecimento de fósforo também influencia a composição da biomassa produzida

(especialmente lipídios e carboidratos). A relação correta de N:P no meio não só determina a produtividade potencial mas também garante a dominância das espécies desejadas ao longo do tempo (GROBBELAAR, 2004; MOSTERT; GROBBELAAR, 1987).

Uma alternativa às limitações da tecnologia fotoautrófica (dependência do suprimento de luz, baixas conversões, riscos de contaminação) é o cultivo heterotrófico de microalgas, que tem recebido crescente atenção da academia e empresas de tecnologia (ERIKSEN, 2008). O processo baseia-se na adaptação de sistemas de fermentação tradicional para o crescimento heterotrófico de microalgas em um meio de cultura rico em fontes de carbono (APT; BEHRENS, 1999). Em comparação com crescimento fotoautotrófico, a fermentação heterotrófica permite que as algas acumulem mais óleo em menos tempo e o aumento de escala é sensivelmente mais simples. Caldo da cana-de-açúcar foi utilizado como fonte de carbono alternativa para a produção de óleos por microalgas, alçando um teor de óleo máximo de 53% (CHENG ET Al., 2009).

Como forma de reduzir custos, vários meios de cultura alternativos têm sido desenvolvidos, usando água do mar, esgoto e efluentes industriais. Raoof et al. (2006) desenvolveram um meio alternativo de baixo custo para a produção industrial de *Spirulina platensis* utilizando alguns fertilizantes comerciais - como super fosfato simples, $Ca(H_2PO_4)_2$, $CaSO_4$ e MOP (muriato de potássio), substituindo o bicarbonato de potássio analítico pelo grau comercial e reduzindo as concentrações de alguns dos componentes típicos do meio de cultura de Zarrouk. O novo meio revisado possui um custo bastante inferior (US$ 16 kg^{-1} contra U$79,50 kg^{-1}) e permitiu uma produtividade semelhante ao meio padrão.

Costa et al. (2002) investigaram o crescimento de *Spirulina platensis* utilizando a água da Lagoa da Mangueira como meio de cultura, com adição de uréia e bicarbonato de sódio, construindo um modelo matemático a partir da metodologia de superfície de resposta. Uma técnica semelhante foi utilizada por Cheng et al. (2009) para modelar o crescimento heterotrófico em meio a base de caldo de cana e conseqüente composição celular de *Chlorella protothecoides*.

Binaghi et al. (2003) compararam o crescimento de *Spirulina platensis* LB2340 com adição de gás carbônico e misturas de bicarbonatos e carbonatos. Resultados de experimentos em tanques abertos sugeriram que a forma bicarbonato é preferencialmente assimilada.

Rodrigues (2008) estudou fontes alternativas de nitrogênio, cultivando *Spirulina platensis* com uma combinação de nitrato de potássio com cloreto de amônio, permitindo a redução dos custos com o meio de cultura.

A concentração e a forma dos nutrientes utilizados afeta tanto a velocidade de crescimento como a composição química dos microrganismos. Lourenço et al. (2002) mostraram a influência da fonte e concentração de nitrogênio na composição e crescimento de dez espécies de microalgas marinhas. Consideráveis diferenças na composição foram observadas com diferentes apresentações do nutriente (nitrato, amônia ou uréia), mas não foi possível distinguir tendências gerais, nem sequer para o mesmo grupo taxonômico.

É comum, portanto, a necessidade de otimizar o meio de cultura para favorecer a produção de um determinado componente de valor comercial. Kathiresan et al. (2007) utilizaram superfícies de resposta para otimizar concentrações de cloreto de sódio, sulfato de magnésio, nitrato de sódio e fosfato de hidrogênio dipotássio para a produção de ficoeritrina por *Phorphyridium purpureum*.

Grima et al. (1992) otimizaram as condições de cultivo de *Isochrysis galbana* para a produção de ácido eicosapentaenóico (EPA), demonstrando a importância da concentração de nitrato de sódio no teor e distribuição de lipídeos. Dayananda et al. (2007) exploraram oito meios de culturas diferentes para maximizar a produção de hidrocarbonetos e polisacarídeos por *Botryococcus braunii*.

Cornet et al. (1992) utilizaram medidas de composição elementar de *Spirulina platensis* para definir a seguinte fórmula molar para a biomassa ativa, incluindo polissacarídeos extracelulares:

$$CH_{1.650}O_{0.531}N_{0.170}S_{0.007}P_{0.006}$$

Esta relação molar fornece a seguinte composição mássica simplificada, resumida na Tabela 2.3. As concentrações de sódio, potássio, magnésio, cálcio e micronutrientes em *Spirulina platensis* são inferiores a 0,6% (SEDYKH et al., 2004).

Tabela 2.3 - Composição elementar de *Spirulina platensis* (CORNET et al., 1992)

Elemento	Composição Mássica
C	48,1%
H	6,7%
O	34,0%
N	9,5%
S	0,9%
P	0,7%

Vários fatores podem influenciar o crescimento e composição de *Spirulina platensis*, como pH, salinidade, intensidade de luz, temperatura e presença de íons bicarbonato (COSTA et al., 2002). A Tabela 2.4 mostra também a influência da modalidade de cultivo, de acordo com experimentos realizados por Ciferri (1983).

Tabela 2.4 - Composição aproximada de *Spirulina platensis* cultivada em laboratório e tanques abertos, segundo Ciferri (1983), em % de massa seca.

Componente	Laboratório	Tanque Aberto
Proteína	64-74	61
Lipídeos	9-14	12
Carboidratos	12-20	19
Inorgânicos	4-6	8

2.2.3 Sistemas de cultivo

Sistemas comerciais de cultivo para microalgas existem em escalas de 10^2 litros, para a produção de produtos de alto valor agregado, a 10^{10} litros, como por exemplo, para a cultura de *Dunaliella salina* (BOROWITZKA, 1999; GREENWELL et al., 2010). O termo fotobiorreatores aplica-se a todo reator em que organismos fotoautróficos se desenvolvem ou são utilizados para realizar uma reação fotobiológica (TREDICI, 2004). A Tabela 2.5 compara as características dos principais sistemas e desenhos de reatores para o cultivo de microalgas e cianobactérias.

Embora apresentem alta produtividade volumétrica e menor risco de contaminação, sistemas fechados (fotobiorreatores *stritu sensu*) têm sua aplicação industrial limitada em função dos altos custos de capital e de produção (CARVALHO; MEIRELES; MALCATA, 2006; CHISTI, 2007; TREDICI, 2004). Fotobiorreatores também permitem a operação com maiores concentrações celulares, menores perdas de CO_2 e água e maior facilidade de controle de processo (PULZ, 2001). Um grande número de desenhos de fotobiorreatores tem sido proposto na literatura técnica e patentes, variando o material de construção, mecanismo de agitação, orientação, interação com a fase gasosa, etc. (TREDICI, 2004). Míron et al. (1999) realizaram um estudo comparativo para vários modelos de fotobiorreatores.

Sistemas abertos podem ser divididos em reservatórios naturais (lagos, lagoas, represas) e tanques ou reservatórios artificiais, construídos de maneiras diversas. O desenho mais comum para sistemas abertos são tanques em forma de pista, agitados por rodas de pás, com profundidades de ordem de 15 a 20 cm. Principais desvantagens são perdas por evaporação, difusão de CO_2 para a atmosfera e riscos de contaminação e poluição (PULZ, 2001).

Os sistemas de cultura normalmente utilizados para crescimento comercial de algas são, em geral, pouco sofisticados (BOROWITZKA, 1999; GREENWELL et al., 2010). Tanques abertos, em especial em formato de pista de corrida, são muito mais baratos de construir e operar e podem ser escalados para vários hectares (BENEMANN, 2008; TREDICI, 2004; GREENWELL et al., 2010).

Tabela 2.5 – Comparação de características e desempenho dos principais tipos de reatores para cultivo de microalgas e cianobactérias, adaptado de Borowitzka (1999)

Tipo de Reator	**Agitação**	**Eficiência de utilização de luz**	**Controle de temperatura**	**Transferência de gás**	**Stress hidrodinâmico nas algas**	**Controle de espécies**	**Esterilidade**	**Aumento de Escala**
Tanques rasos não agitados	Muito baixa	Baixa	Inexistente	Baixa	Muito baixo	Difícil	Inexistente	Muito difícil
Tanques	Baixa	Muito baixa	Inexistente	Baixa	Muito baixa	Difícil	Inexistente	Muito difícil
Tanques circulares agitados	Razoável	Razoável-Boa	Inexistente	Baixa	Baixa	Difícil	Inexistente	Muito difícil
Tanques em forma de pista, agitados por rodas de pás	Razoável-Boa	Razoável-Boa	Inexistente	Baixa	Baixa	Difícil	Inexistente	Muito difícil
Reator de tanque agitado (Iluminação interna ou externa)	Altamente uniforme	Razoável-Boa	Excelente	Baixa-Alta	Alta	Fácil	Fácil de alcançar	Difícil
Reator do tipo *air lift*	Geralmente uniforme	Boa	Excelente	Alta	Baixa	Fácil	Fácil de atingir	Difícil
Cultura em sacos	Variável	Razoável-Boa	Boa	Baixa-Alta	Baixa	Fácil	Fácil de atingir	Difícil
Reatores de placas planas	Uniforme	Excelente	Excelente	Alta	Baixa-Alta	Fácil	Atingível	Difícil
Reator tubular em serpentina	Uniforme	Excelente	Excelente	Baixa-Alta	Baixa-Alta	Fácil	Atingível	Razoável
Reator tubular (biocoil)	Uniforme	Excelente	Excelente	Baixa-Alta	Baixa-Alta	Fácil	Atingível	Fácil

Para a maior parte dos produtos de cultivo de algas, sistemas abertos representam a única alternativa capaz de atender os requisitos econômicos e operacionais destes processos (WEISSMAN; GOEBEL, 1988), sendo utilizados atualmente por empresas nos Estados Unidos, Israel e China (COSTA; MORAIS, 2011).

Problemas comumente reportados para sistemas abertos são a baixa produtividade e a dificuldade de controlar um sistema exposto aos elementos (BOROWITZKA, 1999; TREDICI, 2004; GREENWELL et al., 2010). A produtividade de culturas de algas em sistemas abertos é principalmente limitada por sua inabilidade em responder rapidamente a variações diárias de iluminação (LEE, 1992).

Tanques abertos podem ter a parede e o fundo recobertos por um grande número de materiais. As configurações mais comuns baseiam-se em tijolos e concreto para as paredes e um fundo de solo batido ou geomembrana. O revestimento do solo com filmes plásticos pode, no entanto, aumentar o custo de construção em US$15-25 m^{-2} (TREDICI, 2004). Embora minimize contaminações, percolação e suspensão de partículas de terra (que minimizam a luminosidade disponível no meio), a cobertura com geomembrana não representou ganhos de produtividade nos testes pilotos patrocinados pelo Departamento de Energia norte-americano, sumarizados por Sheehan et al. (1998).

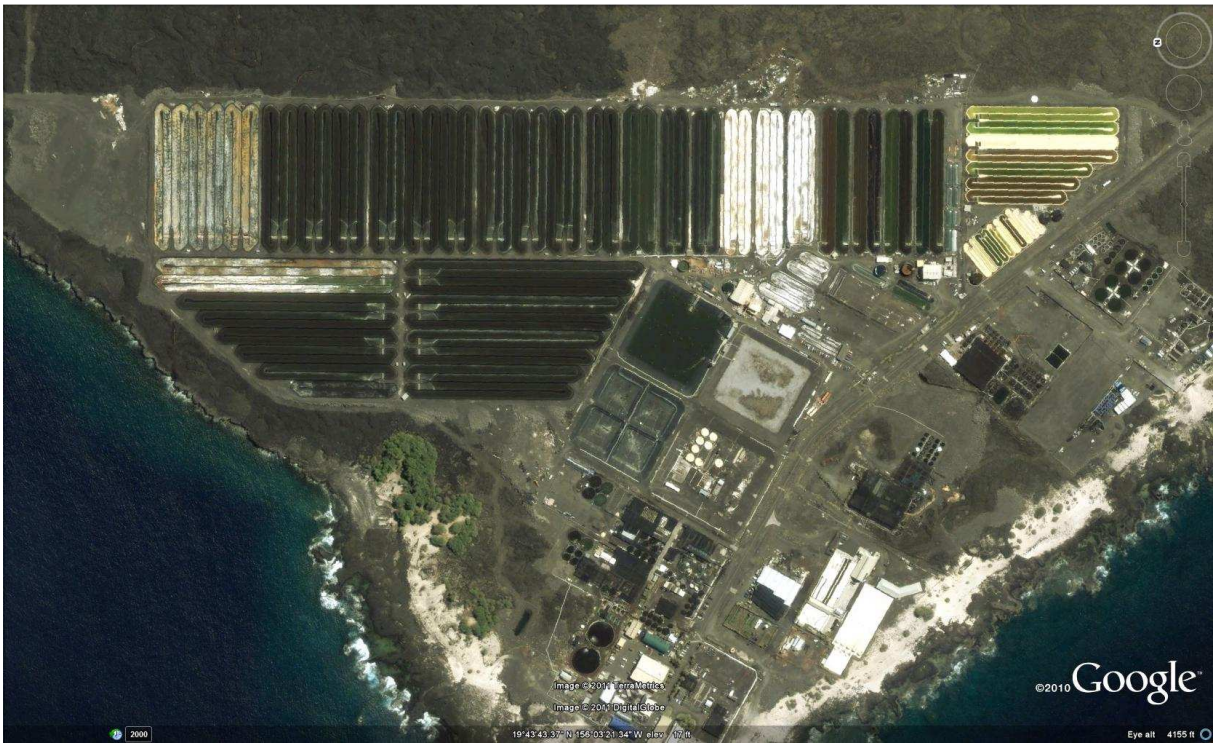


Figura 2.2 – Fotografia aérea das instalações da Cyanotech no Havaí (GoogleEarth)

A Figura 2.2 mostra uma fotografia aérea das instalações da Cyanotech em Kailua-Kona no Havaí, atualmente a maior fazenda de microalgas do mundo, com 45 hectares distribuídos em 85 tanques de cultivo em forma de pista.

Uma mistura adequada é necessária para prevenir a precipitação das células, evitar estratificação de temperatura, distribuir nutrientes e quebrar o gradiente de difusão na superfície das células, remover o oxigênio produzido e garantir a exposição das células a períodos alternados de luz e escuridão (WEISSMAN; GOEBEL, 2009). Em geral, culturas de cianobactérias filamentosas e dinoflageladas não devem ser agitadas por bombas para minimizar o dano às células (TREDICI, 2004). Para tanques, rodas de pás adequadamente projetadas representam o método mais eficiente e durável de agitação do meio. São utilizadas tipicamente velocidades entre 15 e 30 cm s^{-1} (GRIMA, 2002).

O método de suprir CO_2 para o meio é um aspecto importante do desenho de sistemas abertos. Na maior parte dos casos o gás é fornecido em bolhas pequenas através de um poço, dispersor ou dispositivo externo. O método mais efetivo utilizado atualmente é a carbonação contra-corrente, no qual o gás é injetado como

pequenas bolhas em um coluna com meio de cultura em contra-corrente (GRIMA, 1999; CARVALHO; MEIRELES; MALCATA, 2006).

Embora não exista nenhuma metodologia sistemática para escalonamento de fotobiorreatores (CARVALHO; MEIRELES; MALCATA, 2006), há algumas relações propostas na literatura para guiar o desenho destes equipamentos (GRIMA et al., 1999; GRIMA et al., 2000). A maior parte dos fotobiorreatores fechados possui desafios para aumento de escala, em função da dificuldade em distribuir a luz no meio de cultura, gastos de energia e custos de fabricação do equipamento (TREDICI, 2003; GREENWELL et al., 2010).

2.2.4 Métodos de separação

As etapas de separação e purificação representam uma etapa importante para a viabilidade técnica e econômica de um sistema. Em termos gerais são responsáveis por 20-30% do custo final, podendo chegar a representar até 60% dos custos de produtos como ácido eicosapentaneóico (EPA) (GRIMA et al., 2003). Lardon et al. (2009) mostram na sua análise do ciclo de vida da produção de biodiesel, a partir de microalgas, que qualquer melhora nos métodos de extração de óleo impacta diretamente a sustentabilidade do processo global, já que 90% da energia do processo é empregada nesta etapa. O principal desafio está relacionado às concentrações de biomassa relativamente baixas (0,5-5 kg m^{-3}) obtidas na coleta.

A coleta de biomassa pode ser feita por centrifugação, filtração ou sedimentação por gravidade, podendo ser precedido por uma etapa de floculação. A recuperação pode ser particularmente desafiadora em função do tamanho diminuto (3-30 μm de diâmetro) das células (GRIMA et al., 2003). Adicionalmente, existe um limite de concentração a partir do qual o sistema não é mais fluido (tipicamente acima de 15-20% de sólidos) e, portanto, de difícil bombeamento e manuseio (GREENWELL et al., 2010).

Centrifugação é um dos meios mais efetivos de concentração das microalgas e cianobactérias, permitindo operação contínua, embora o consumo de energia e os custos de capital sejam bastante elevados (BENEMANN; OSWALD, 1996, GRIMA et al., 2003, CHISTI, 2008). O método permite recuperação de mais de 95% para microrganismos de maior tamanho celular, operando em condições otimizadas (GREENWELL et al., 2010).

Filtração é um método eficiente apenas recuperar microalgas e cianobactérias com células relativamente grandes como *Spirulina platensis*, ou microorganismos filamentosos ou formadores de colônia. Custos de coleta são relativamente baixos e o método permite um potencial de concentração de biomassa a até 27% de sólidos (GRIMA et al., 2003; SCHENK et al., 2008). A maior parte dos processos comerciais de produção de *Spirulina platensis* utiliza filtros para coleta, com eficiências de até 95% (VONSHAK; RICHMOND, 1988).

Floculação química é considerada um meio confiável e econômico para a coleta de biomassa de microalgas (BILANOVIC; SHELEF; SUKENIK, 1988), aumentado o tamanho efetivo das partículas. A coleta de algas por floculação é mais conveniente do que métodos convencionais (centrifugação ou filtração) por permitir o tratamento de grandes quantidades de cultura (OH et al., 2001).

Os mecanismos de floculação são sensíveis ao pH, propriedades superficiais das células, concentração de floculantes e cátions divalentes e à formação iônica da solução de cultura, entre outros fatores. Bilanovic, Shelef e Sukenik (1988) estudaram o efeito da salinidade do meio na eficiência da floculação. Em meios com força iônica elevada, os polímeros sofrem encolhimento e não conseguem fazer pontes entre as células das microalgas.

Buelma et al. (1990) compararam vários floculantes químicos para concentrar biomassa em uma cultura de microalgas dominada por *Chlorella* sp. Para uma faixa de pH de 6,0 a 9,0, eficiências da ordem de 95-100% foram obtidas com 20 mg L^{-1} de quitosana ou 5 mg L^{-1} de Zetag 63 (poliacrilamida).

Oh et al. (2001) compararam a eficiência de vários biofloculantes para utilização na coleta de *Chlorella vulgaris*. O produto extraído do microorganismo *Paenibacillus sp.* AM49 apresentou os melhores resultados, com 83% de eficiência de floculação, sensivelmente melhor do que sulfato de alumínio (72%) e poliacrilamida (78%).

Métodos de flotação são tradicionalmente utilizados na remoção de algas e outras partículas em processos de tratamento de água e efluentes. Levin et al. (1962) desenvolveram uma metodologia de coleta baseada em aeração do meio em uma coluna longa, sem adição de agentes de flotação. O estudo mostrou que a concentração celular no material coletado é função do pH, taxa de aeração, porosidade do aerador, concentração na alimentação da coluna e altura da espuma formada no topo.

O processamento da biomassa para extração dos produtos de interesse comercial inicia-se tipicamente com uma etapa de secagem – por exemplo, em secadores de tambor, secadores por aspersão (*spray dryers)*, secagem ao sol ou secagem por congelamento – de acordo com a escala e valor dos produtos. Segue-se uma etapa de quebra das células – utilizando-se moinhos, ultrasom, vapor, ou

tratamentos químicos ou enzimáticos. Finalmente, ocorre a extração dos produtos. Extração por solvente é a técnica mais comumente utilizada para extrair inúmeros metabólitos de microalgas como astaxantina, β-caroteno e ácidos graxos (GRIMA et al., 2003). Lee et al. (2010) compararam vários métodos de extração em laboratório, concluindo que a eficiência varia consideravelmente de acordo com a espécie e teor de lipídeos.

2.2.5 Aplicações

Algas verdes-azuis têm sido utilizadas como alimento por milhares de anos. No entanto, o cultivo comercial de microalgas tem apenas algumas décadas (SPOLAORE et al., 2006). A idéia de produzir microalgas em escala técnica ocorreu inicialmente a cientistas alemães durante a Segunda Grande Guerra, como forma de desenvolver fontes de baixo custo de proteína, substituindo as de origem animal (CARVALHO; MEIRELES; MALCATA, 2006). Uma das principais vantagens era o rápido crescimento, uma vez que microalgas comumente podem dobrar a biomassa em períodos da ordem de um dia (CHISTI, 2007).

A Tabela 2.6 resume as principais espécies considerando a produção comercial.

Tabela 2.6 – Principais espécies de microalgas e cianobactérias, adaptado de Spolaore et al. (2006)

Alga	**Aplicação/Produto**
Arthrospira platensis	Nutrição humana e animal, cosméticos, ficobiliproteínas
Chlorella vulgaris	Nutrição animal, aqüicultura, cosméticos
Dunaliella salina	Nutrição humana, cosméticos, β-caroteno
Aphanizomenon flos-aquae	Nutrição humana
Cryphecodinium cohnii	Ácido docosahexaenóico
Schizochytrium limacinum	Ácido docosahexaenóico

Spirulina (Arthrospira) platensis é uma cianobactéria multicelular e filamentosa (CIFERRI, 1983) e possui importância comercial principalmente em função de suas qualidades nutricionais (VONSHAK; RICHMOND, 1988). Dada a sua elevada produtividade e facilidade de cultivo e extração, *Spirulina* tem sido freqüentemente considerada para a fixação de CO_2 (WATANABE; HALL, 1995, 1996; WATANABE; SAIKI, 1997).

Microalgas podem ser usadas também na produção de produtos nutricionais, rações para aqüicultura, pigmentos fluorescentes, compostos marcados com isótopos estáveis e medicamentos (COUTTEAU, 1996, APT; BEHRENS, 1999; BOROWITZKA, 1997, COTTEAU, 1996, METTING JR., 1996; CARDOZO et al., 2007). A produção mundial de biomassa algal é estimada em aproximadamente 10.000 toneladas por ano, principalmente *Spirulina platensis*, *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella salina* e *Haematococcus pluvialis*. Aproximadamente a metade ocorre na China (BENEMANN, 2008).

Algas são fontes potenciais de produtos químicos e farmacêuticos de alto valor, como ácidos graxos poliinsaturados e compostos bioativos (CARDOZO et al., 2007, GARCIA et al., 2000). A Tabela 2.7 mostra alguns exemplos de compostos de interesse comercial produzidos por algas, incluindo macroalgas.

Tabela 2.7 – Exemplos de compostos de alto valor agregado produzidos por algas (CARDOZO et al., 2007)

Compostos	Aplicações	Exemplos
Ácidos graxos	Nutracêutica	Ácido eicosapentaenóico (EPA)
Esteróis	Nutracêutica Aqüicultura	Colesta-4-en-3β-ol
Carotenóides	Nutracêutica Aqüicultura	β-caroteno Astaxantina
Ficocolólides	Alimentícia Industrial	Agar Carragenana Alginato
Lectinas	Ciências médicas	
Aminoácidos tipo micosporina	Produtos de uso pessoal (protetor solar)	Palitina Asterina
Compostos halogenados	Farmacêutica	Ácidos graxos bromados
Poliquetídeos	Farmacêutica	Anfotericina

Algumas espécies de microalgas possuem potencial para fixação de nitrogênio, isoladamente ou em simbiose com outros microorganismos, podendo ser utilizadas na agricultura para a produção *in situ* deste nutriente (VAISHAMPAYAN et al., 2001).

Microalgas podem ser utilizadas com sucesso no tratamento de efluentes agrícolas, industriais ou domésticos, com baixo custo e demanda energética. Nutrientes para o crescimento das microalgas podem ser aproveitados dos efluentes e a biomassa coletada pode ser explorada comercialmente (HAMMOUDA, GABER, ABDEL-RAOUF, 1995; MALLICK, 2002; MCGRIFF; MACKINNEY, 1972; MUÑOZ; GUIEYSSE, 2006). Muñoz et al. (2004) utilizaram uma associação de *Chlorellla*

sorokiuania e *Ralstonia basilensis* para degradar salicilato de sódio em um reator CSTR utilizando apenas a oxigenação gerada pela fotossíntese.

A obtenção de combustíveis a partir de biomassa representa uma alternativa promissora tanto pelo aspecto renovável quanto pelo potencial para fixação de CO_2 (HALL; HOUSE, 1995). A produção de biocombustíveis tem sido estudada há muitos anos, abrangendo hidrogênio, metano, óleos vegetais, hidrocarbonetos e etanol. A Figura 2.3, adaptada de Stephens et al. (2010), sumariza o potencial de microalgas em biorefinarias.

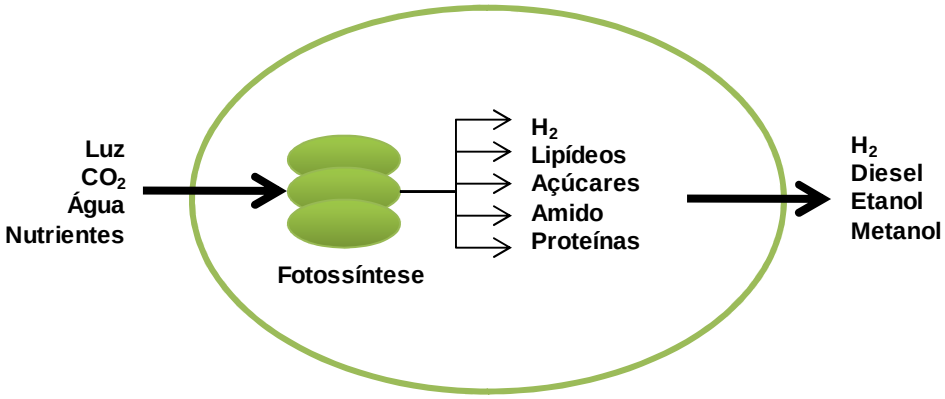


Figura 2.3 – Microalgas como fonte de combustíveis e matérias-primas de interesse comercial, adaptado de Stephens et al. (2010)

As principais vantagens de sistemas de microalgas para a produção de biocombustíveis de segunda geração são, segundo Schenk et al. (2008): a maior eficiência de conversão de fótons, a possibilidade de coleta ao longo de todo o ano, a possibilidade de utilizar água salina ou efluentes, a possibilidade de combinar produção de combustíveis menos emissores, com uma pegada neutra de CO_2, com captura de CO_2 e a produção combustíveis atóxicos e biodegradáveis.

Benemann (2008) propôs que a combinação de produção de combustíveis com tratamento de efluentes pode constituir um atalho importante para a produção economicamente viável a partir de microalgas.

Segundo Chisti (2008), o biodiesel de microalgas pode ser considerado o único biocombustível renovável com potencial de substituir completamente a cadeia derivada do petróleo sem afetar o suprimento de alimento ou outros produtos

agrícolas, com base em suas elevadas produtividades areais, potencial de integração e uso de terras não adequadas para agricultura. Microalgas podem fornecer vários tipos de combustíveis renováveis, por exemplo, através digestão anaeróbica de biomassa para produção de metano, fermentação da biomassa algal a etanol, biodiesel do óleo algal e biohidrogênio (COSTA; MORAIS, 2011, CHISTI, 2007; SCHENK et al., 2008).

Rendimentos fotossintéticos de microalgas e cianobactérias são sensivelmente mais altos do que de plantas terrestres, cujo crescimento é normalmente limitado pela disponibilidade de CO_2 (GOFFAUX; VANDE WOUWER; BERNARD, 2009). A Tabela 2.8 compara os rendimentos para a produção de óleo de microalgas com várias espécies de plantas superiores. É importante ressaltar que os rendimentos reportados por Chisti (2007) baseiam-se em produtividades areais da ordem de 60 g m^{-2} dia^{-1} que ainda não foram demonstradas sustentavelmente em grande escala. No entanto, mesmo produtividades areais da ordem de 10 g m^{-2} dia^{-1} ainda fornecem um rendimento de óleo muitas vezes superior às culturas terrestres de maior produtividade.

Tabela 2.8 – Comparação entre microalgas e culturas convencionais para o rendimento de óleo por área utilizada para cultivo, adaptado de Chisti, 2007

Cultura	**Rendimento de Óleo (L ha^{-1})**
Milho	172
Soja	446
Canola	1.190
Pinhão-manso	223
Coco	2.689
Palma	5.950
Microalgas, 70% óleo na biomassa	136.900
Microalgas, 30% óleo na biomassa	58.700

Ésteres metílicos de ácidos graxos, também conhecidos como biodiesel, produzidos pela transesterificação de triglicerídeos com metanol, têm recebido crescente atenção como alternativa ao diesel derivado de petróleo (SRIVASTAVA; PRASAD, 2000). A Figura 2.4 descreve a reação utilizada na produção destes ésteres metílicos. No Brasil, em função da ampla disponibilidade da matéria-prima, algumas usinas utilizam o etanol como reagente.

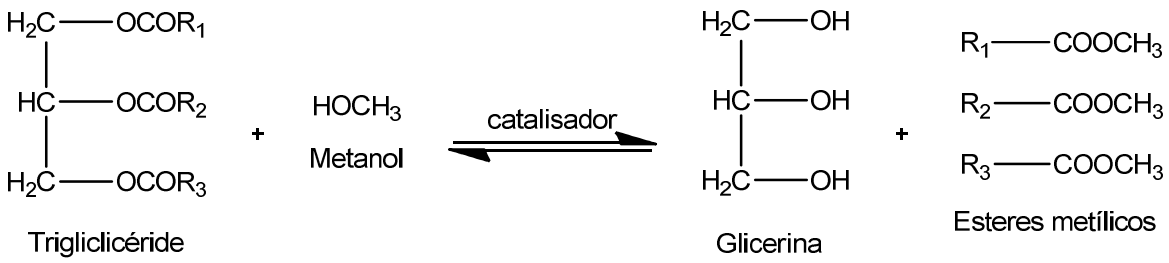


Figura 2.4 – Reação de produção de biodiesel, a partir da esterificação com metanol, adaptada de Chisti (2007) e Fukuda (2001)

Chisti (2008) demonstrou que para valores típicos de produtividade e teor de óleo, o cultivo de microalgas para a produção de biodiesel (incluindo a conversão da biomassa residual em biogás) apresenta um rendimento líquido (energia dos produtos menos a energia consumida na produção) de 56,6 MJ kg^{-1} óleo, equivalente a 1.444 GJ ha^{-1} ano^{-1}, dez vezes superior ao rendimento para etanol de cana-de-açúcar. Esta análise não levou em conta, no entanto, a comparação econômica entre as duas tecnologias.

Algumas espécies podem também ser utilizadas para a produção de outros biocombustíveis. Hirano et al. demonstraram a produção intracelular de etanol por uma variedade de *Chlorella vulgaris* dotada de um alto teor de amido (até 37% em massa seca), atingindo produtividades de 20-30 g m^{-2} dia^{-1}. Microalgas e cianobactérias podem também produzir hidrogênio em condições anaeróbicas e sua fermentação pode ser usada para a produção de metano (SCHENK et al., 2008).

Além das aplicações em combustíveis, o desenvolvimento da produção de produtos químicos através de fontes renováveis é um campo extremamente promissor (CHRISTENSEN et al., 2008; GAVRILESCU; CHISTI, 2005).

A principal conclusão do estudo conduzido pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos Estados Unidos (NREL) entre os anos 70 e 90 foi de que, com base na tecnologia disponível, mesmo no limite superior de produtividade, biocombustíveis ainda teriam custos pelo menos 100% superiores ao equivalente em petróleo (SHEEHAN et al., 1998, GREENWELL et al., 2010).

Stephens et al. (2010) realizaram uma avaliação econômica da produção de biocombustíveis a partir de microalgas na Austrália, utilizando estimativas de custo baseadas em Benemann e Oswald (1996) e projetos locais recentes. A análise de sensibilidade mostrou que para o sistema estudado, os fatores mais importantes para o sucesso econômico consistem na redução de custos de capital, aumento do rendimento de biomassa e o valor dos produtos.

2.2.6 Avanços tecnológicos de maior impacto

Ao longo da última década, uma série de inovações tecnológicas visando ao aumento da produtividade, redução de custos ou modelos de negócio alternativos tem sido reportada na literatura científica e em patentes.

Chisti (2008) propôs um modelo integrado para a produção de óleo de microalgas para biodiesel, em que a biomassa após a extração sofre digestão anaeróbica para gerar biogás para uso como co-combustível em uma usina termoelétrica, cujo CO_2 é utilizado pela cultura de algas.

Copeland et al. (2003) propuseram um sistema de reator contra-corrente com cinza de carvão para melhorar a transferência de CO_2 para a fase aquosa, ao mesmo tempo auxiliando no controle de pH e utilizando uma matéria-prima gerada pela usina cujas emissões estavam sendo mitigadas.

Travieso et al. (2001) propuseram um desenho helicoidal de fotobiorreator, operado de maneira semi-contínua para a produção de *Spirulina platensis* em climas temperados, atingindo concentrações de até 5,82 g L^{-1} com taxas de crescimento máximas de 0,40 g L^{-1} dia^{-1}.

García et al. (2000) estudaram o crescimento mixotrófico de microalgas em glicerol, obtendo uma concentração ótima de 0,1M. Segundo os autores, o crescimento mixotrófico reduz a necessidade de luz e permite aumentar a concentração celular, utilizar desenhos de fotobiorreatores mais eficientes e reduzir o uso de CO_2, excepcionalmente caro em culturas de grande escala. Lee (2001, 2004) também sugere cultivos mixotróficos como uma alternativa de potencial sucesso econômico.

Grobbelaar (2000) propõe uma combinação de modificação genética ou seleção de microorganismos com desenhos de reatores mais adequados para aumentar e sustentar a produtividade.

Sistemas multi-estágios são um conceito promissor, principalmente combinando fases de produção (crescimento rápido) com etapas de stress (produção de lipídios ou algum outro bioproduto) (GROBBELAAR, 2000; OGBONNA; TANAKA, 2000).

Huntley e Redalje (2007) propuseram um sistema em dois estágios para fotobiorreatores para crescimento de *Haematococcus pluvialis* visando a captura de CO_2 e produção de óleo para biocombustíveis, obtendo produções superiores a 420 GJ ha^{-1} ano^{-1}. Rodolfi et al. (2009) sugerem um modelo de fotobiorreator de baixo custo para operação ao ar livre, a partir do conceito de parede de painéis verdes (GWP), operados em série com distintas concentrações de nutrientes, de forma a maximizar crescimento ou acumulação de lipídeos em cada etapa.

Laws et al. (1983) propuseram o uso de aletas semelhantes a asas de avião para criar vórtices na mistura em tanques de algas de forma a criar uma rotação de fluido, causando um efeito de luz pulsante (*flashing light effect)*. Eficiências de conversão neste sistema foram entre 2,2 e 2,4 vezes superiores a sistemas sem as aletas. Aplicações deste conceito têm sido consideradas em alguns dos processos comerciais propostos recentemente.

O uso de surfactantes não-iônicos para proteger a parede celular, minimizando os danos causados pelo cisalhamento promovido pela agitação e dispersão de gás, tem sido estudado como alternativa para minimizar perdas e redução nas taxas de crescimento durante o cultivo (ERIKSEN, 2008).

Ogbona, Soekima e Tanaka (1999) propuseram um modelo de reator em que fibras ópticas coletam energia solar e distribuem dentro do reator, permitindo o uso de energia solar em fotobiorreatores internos, obtendo produtividades da ordem de 0,3 a 0,48 g L^{-1} dia^{-1} para *Chlorella sorokiniana*. Acoplando ao sistema uma fonte de luz artificial, foi também possível manter a produtividade em dias nublados e noites. Embora o consumo de energia tenha sido estimado em apenas 1,7 Wh^{-1}, o custo de capital para a construção do fotobiorreator proposto ainda é impeditivo.

Powell et al. (2009) construíram uma célula de combustível microbiana baseada na microalga *Chlorella vulgaris*. No sistema proposto, a fotossíntese pela microalga funciona como o cátodo de uma bateria, combinado com um ânodo químico à base de ferrocianeto de potássio. Powell e Hill (2009) utilizaram este conceito para propor um sistema de fotobiorreatores associados a fermentadores, que seqüestram o CO_2 gerado ao mesmo tempo em que geram energia elétrica, além de gerar óleos que podem ser usados para a fabricação de biodiesel.

O desenvolvimento de sistemas de controle para culturas de microalgas também tem recebido a atenção de alguns grupos de pesquisa. Goffaux, Vande Wouwer e Bernard (2009) desenvolveram algoritmos e *soft sensors* para estimar componentes de concentração de difícil medição em linha, como por exemplo, a quota celular de nitrogênio.

Operação em densidades celulares ultra altas (acima de 100 mg clorofila L^{-1}) tem sido proposta como uma alternativa para minimizar a fotoinibição e aumentar a produtividade de biomassa. (QIANG; GUTERMAN; RICHMOND, 1996, QIANG; ZARMI; RICHMOND, 1998, RICHMOND, 2004). Estratégias de cultivo com altas densidades celulares também foram demonstradas com sucesso em sistemas heterotróficos (ERIKSEN, 2008).

Embora afetadas pela crise econômica mundial e oscilações nos preços do petróleo, uma grande quantidade de empresas de tecnologia e capital de risco continuam ativas na pesquisa e implementação de projetos envolvendo microalgas e cianobactérias. A Tabela 2.9 lista algumas das empresas mais promissoras, destacando a tecnologia desenvolvida e o campo de atuação.

Tabela 2.9 – Empresas de tecnologia de cultivo de microalgas e cianobactérias

Empresa	Tecnologia	Localidade	Mercados/Produtos
Algatech	Reatores tubulares fechados	Israel	Nutrição e Saúde
Algenol	Reatores fechados, organismos geneticamente modificados	EUA (Florida)	Biocombustíveis, Produtos Químicos
Aquaflow	Extratores e processamento	Nova Zelândia	Tecnologia
Astaxa	Reatores fechados	Alemanha	Nutrição e Saúde, Bicombustíveis
Aurora Algae	Tanques otimizados hidrodinamicamente, sistema de controle em tempo real, espécies selecionadas	EUA (Califórnia), Austrália	Nutrição e Saúde, Bicombustíveis
Bionavitas	Tecnologia de Imersão de Luz (LIT) - cilindros acrílicos para melhor distribuição de luz nos reatores	EUA	Tecnologia
Bodega Algae	Fotobiorreatores fechados	EUA	Tecnologia
Cyanotech	Tanques abertos	EUA (Havaí)	Nutrição e Saúde
LiveFuels	Sistemas naturais de crescimento. Uso de peixes para coleta de algas	EUA	Tecnologia
Origin Oil	Reatores fechados, tecnologia proprietária de extração	EUA (Califórnia)	Biocombustíveis
PetroAlgae	Tanques abertos, tecnologia proprietária de separação	EUA (Florida)	Biocombustíveis, Proteína

Empresa	Tecnologia	Localidade	Mercados/Produtos
Sapphire Energy	Reatores fechados	EUA (Califórnia)	Biocombustíveis
Seambiotic	Soluções para otimizar crescimento em tanques abertos	Israel	Tecnologia
Solazyme	Reatores fechados, cultura heterotrófica, organismos geneticamente modificados	EUA (Califórnia)	Nutrição e Saúde, Biocombustíveis, Produtos Químicos
Solix Biosystems	Reatores fechados flutuantes (Painéis Lumian™)	EUA (Colorado)	Tecnologia/FBR
Synthetic Genomics	Organismos geneticamente modificados	EUA	Tecnologia

2.3 Modelagem matemática em fotobioprocessos

A modelagem matemática dinâmica do comportamento de microorganismos é reconhecidamente uma tarefa desafiadora. Um bom procedimento de modelagem deve incluir: a menor quantidade possível de hipóteses específicas para um organismo, escolhas baseadas em dados ao invés de hipóteses *a priori* e robustez em relação a erros de inicialização (VASTEMAN; ROOMAN; BOGAERTS, 2009).

Conforme o potencial de aplicações comerciais de culturas de microalgas e cianobactérias aumenta, cresce também a importância de uma modelagem cinética adequada da fotossíntese e crescimento, uma vez que um modelo acurado é essencial para o desenho de fotobiorreatores mais eficientes, para a predição de desempenho do processo e otimização das condições de operação (YU; PARK, 2003). Trata-se de uma ferramenta importante, por permitir um melhor conhecimento dos fenômenos biológicos, hidrodinâmica, termodinâmica e as interações entre estas áreas (BAQUERISSE ET AL., 1999).

A conversão de energia solar em biomassa algal em sistemas ao ar livre de grande escala é controlada pela disponibilidade de luz solar, pelo sistema fotossintetizante das algas e por nutrientes, temperatura e características do sistema de cultura, sendo a disponibilidade e intensidade luminosas o fator mais impactante (GOLDMAN, 1979; LUO et al., 2003; MERCHUK et al., 1998).

Baquerisse et al. (1999) propuseram um modelo para um fotobiorreator contínuo, desenvolvido a partir da análise da cinética de crescimento, transferência gás-líquido e hidrodinâmica, utilizando o software SpeedUp™ da AspenTech. O modelo proposto permitiu similar transferência de massa, agitação e crescimento algal para *Porphyridium purpureum* com excelente correlação com dados experimentais.

Cornet e Dussap (2009) desenvolveram uma fórmula geral, testada em vários desenhos de fotobiorreatores cultivando *Spirulina platensis*, que permite calcular a produtividade volumétrica máxima com um desvio de aproximadamente 15%. A relação baseia-se na densidade luminosa disponível, rendimento quântico da fotossíntese e aspectos geométricos do reator.

Popova e Boyadjiev (2008) desenvolveram um modelo para a cinética de crescimento de microalgas dividindo o mecanismo de crescimento em dois processos cujas taxas se anulam com o passar do tempo, levando a uma concentração celular constante. Os parâmetros do modelo foram obtidos utilizando dados reportados na literatura e conseqüentes simulações validaram a hipótese a respeito da natureza do mecanismo cinético.

Geider, MacIntyre e Kana (1998) desenvolveram um modelo para acompanhar taxa de crescimento e concentrações celulares de clorofila e nitrogênio em função de luminosidade, temperatura e disponibilidade de nutrientes. Os autores determinaram experimentalmente os parâmetros do modelo para *Pavlova lutheri*, *Skeletonema costatum*, *Thalassionasira pseudonana* e *Isocrysis galbana*. Packer et al. (2011) se basearam nestas relações para o desenvolvimento de um modelo dinâmico de crescimento e produção de lipídios por algas verdes em culturas em batelada. Simulações para sistemas com altas concentrações de nitrogênio apresentaram maior desvio em relação a resultados experimentais, sugerindo que outros fatores são limitantes neste cenário.

Desenhos alternativos de fotobiorreatores, utilizando por exemplo, reciclos, são freqüentemente utilizados na geração de dados para a construção de modelos. Rorrer e Mullikin (1999) utilizaram um fotobiorreator tubular de reciclo para modelar culturas de algas em suspensão. O modelo combinava os parâmetros de iluminação das culturas com o transporte de massa de CO_2 na interface, permitindo a predição de uma densidade celular crítica em que o processo passa de limitado pela taxa de crescimento para limitado por disponibilidade de CO_2. A análise de sensibilidade do modelo mostrou que a oferta de CO_2 pode ser otimizada para cada tipo de cultura de modo a maximizar a taxa de produção de biomassa e densidade celular alvo.

Rubio et al. (1999) desenvolveram um modelo baseado em equações de equilíbrio para prever os perfis axiais de concentração de O_2 e CO_2 em fotobiorreatores tubulares, mostrando que níveis de oxigênio acima da saturação do ar (0,2247 mol O_2 m^{-3} a 20^oC) podem inibir a fotossíntese em várias espécies algais, mesmo se os níveis de CO_2 forem elevados.

Como um dos principais fatores influenciando crescimento, a distribuição de luz em fotobiorreatores é tema de vários modelos. Brandi, Alfano e Cassano (1996) modelaram a distribuição de radiação em um reator fotocatalítico de placa plana, considerando as características da lâmpada e do refletor instalado atrás dele, permitindo calcular a taxa volumétrica de absorção de energia em cada ponto do reator.

Fernandez et al. (1997) desenvolveram um modelo matemático para determinação da distribuição de irradiância e intensidade luminosa média em um fotobiorreator tubular, a partir de fatores geográficos, geométricos e solares. O modelo foi baseado na Lei de Beer-Lambert para atenuação luminosa, propondo uma correção hiperbólica para reproduzir o fenômeno em culturas com altas concentrações de algas.

Fernandez et al. (1998) modelaram a produtividade de fotobiorreatores em função da disponibilidade de luz solar e geometria dos reatores, reproduzindo os resultados experimentais com erros da ordem de 20%. Uma das principais conclusões foi a importância de considerar o fenômeno de fotoinibição no modelo, sem o qual o erro aumenta para 45%.

Rubio et al. (2003) desenvolveram um modelo dinâmico para fotossíntese, levando em consideração fotoadaptação, fotoinibição e o efeito de luz pulsante (*flashing light effect)*, considerando que o armazenamento de energia luminosa é um processo mediado por enzimas obedecendo uma cinética de Michaelis-Menten e considerando o fenômeno de fotoinibição dependente da raiz quadrada da irradiação.

Grima et al. (1997) observaram a influência de intensidade de luz irradiada (I_0) e taxa de diluição (D) no crescimento de *Isochrysis galbana*, usada para a produção de ácidos graxos poliinsaturados (PUFAs). A eficiência máxima foi encontrada para as condições I_0=820 $\mu E.m^{-2}.s^{-1}$ e D=0,030 h^{-1}. O modelo desenvolvido em laboratório foi usado com sucesso para predizer o crescimento de uma cultura em fotobiorreator tubular ao ar livre, dependente de iluminação solar.

Embora a maior parte dos sistemas comerciais opere com excesso de nutrientes, de maneira a ter o crescimento limitado apenas por disponibilidade

luminosa, a compreensão do efeito das concentrações de nutrientes no crescimento e composição de microalgas e cianobactérias é extremamente importante, especialmente considerando modalidades de operações com depleção de um determinado elemento de maneira a favorecer a produção de certas substâncias. Groot (1983) propôs um modelo para limitações de nutrientes no crescimento de algas em um dado ecossistema, definindo diferentes relações responsáveis pelo seu impacto nos modelos bioquímicos. Cornet et al. (1992) estudaram o crescimento de *Spirulina platensis* com limitações de nutrientes e luminosidade, desenvolvendo um modelo cinético para o crescimento em um fotobiorreator em batelada em formato de paralelepípedo operado nestas condições.

Dada a complexidade dos mecanismos e interações entre os vários fatores, muitos autores optaram pela construção de modelos determinísticos ou híbridos para o crescimento em fotobiorreatores. Csögör et al. (2001) utilizaram simulação de Monte Carlo para modelar a distribuição de luz em um novo modelo de fotobiorreator desenhado para atingir iluminação homogênea e flexível dentro do reator. Os resultados da simulação revelam que a uma concentração de biomassa constante, a distribuição de luz é determinada principalmente pelos parâmetros geométricos da fonte de luz.

Luo et al. (2003) utilizaram a tecnologia de rastreamento computadorizado de partículas radioativas para compreender o fluxo, agitação e cisalhamento dentro de um fotobiorreator. Modelando o movimento das células dentro do reator, foi possível determinar a disponibilidade de luz efetiva durante a operação. Luo e Al-Dahan (2004) combinaram princípios fundamentais de fisiologia e do processo de fotossíntese com dados fluidodinâmicos gerados anteriormente para distintas geometrias de fotobiorreatores. A combinação de um modelo mecanístico (correlacionando a fração de células em estados relaxados, excitados e inibidos e a taxa de crescimento com irradiância) com um modelo empírico para exposição à luz e freqüência dos ciclos de claro escuro no fotobiorreator, apresentou resultados confiáveis em comparação com parâmetros de crescimento obtidos na literatura.

Arranz et al. (2008) recorreram a redes neurais para modelar biodegradação por uma combinação de algas e bactérias em fotobiorreatores utilizados no tratamento de efluentes. Uma rede neural com uma única camada oculta com quatro neurônios

permitiu simular as relações complexas entre luz, temperatura, tempo de residência, concentração de poluentes e a eficiência de remoção do processo, sem a necessidade de compreender todos os fenômenos biológicos e físico-químicos envolvidos. Resultados satisfatórios foram obtidos para o modelo, embora o número de pontos experimentais utilizados para treinamento (23) e validação (3) fosse limitado. Apesar das vantagens, redes neurais têm alguns problemas como a alta demanda de esforço computacional e o fato de sua estrutura caixa-preta não permitir correlacionar os parâmetros do modelo com noções mecanísticas ou de engenharia.

Costa et al. (2000, 2002) utilizaram planejamento experimental combinado com metodologia de superfície de resposta para a construção de modelos empíricos para crescimento de *Spirulina platensis* em função da concentração inicial (inóculo) e concentração de nutrientes (nitrogênio e bicarbonato).

A construção de modelos precisos para crescimento algal é uma das áreas mais complexas da modelagem determinística de qualidade de água. Uma série de macromodelos determinísticos foi desenvolvida combinando-se dados históricos com experimentos envolvendo perturbações controladas, para descrever o crescimento de algas em rios, lagos e reservatórios. Sterner e Grover (1998) combinaram modelos estatísticos com experimentos de adições de nutrientes para prever crescimento algal em dois reservatórios no Texas. Os modelos obtidos para sistemas limitados pela concentração de nitrogênio e potássio mostravam apenas dependência da temperatura e forneceram resultados preditivos insatisfatórios.

Romanowicz e Petersen (2003) usaram observações de oxigênio dissolvido, temperatura e pH no Rio Elba entre 1985 e 2001 para modelar concentrações de algas, combinando estratégias de regressão linear e função de transferência estocástica. Outro modelo bastante abrangente foi desenvolvido por Wolfe, Zweig e Engstrom (1986) para crescimento de alga em uma lagoa aberta, com o foco no crescimento de peixes e qualidade da água. O modelo considerou os efeitos dos peixes, algas, alimentação, luz solar, troca de água e aeração, partículas suspensas, concentração de nutrientes e cinco grupos de bactérias.

Modelos considerando a interação entre várias espécies no sistema, como competição e predatismo, são importantes tanto na modelagem ecológica como no

entendimento de sistemas de aqüicultura. Hagiwara e Mitsch (1994) desenvolveram um modelo para tanques de crescimento de várias espécies de carpas e interações com fitoplâncton e zooplâncton, baseado nos fluxos energéticos do sistema. As simulações para perturbações (como mudanças de concentrações e remoção de espécies) mostraram a capacidade de adaptação do ecossistema, que se tende a estabilizar-se após alguns ciclos.

A compreensão do efeito de contaminações sobre sistemas de cultivo e reservatórios naturais pode ser feita utilizando-se modelos presa-predador. Mitra e Flynn (2006) demonstraram o impacto da atividade predatória por zooplâncton na formação de florações algais em função da concentração de nutrientes.

Kretzschmar, Nisbet e McCauley (1993) simularam a competição entre duas espécies de fitoplâncton e ataque por um predador utilizando um modelo de competição Lokta-Volterra. A interação com o predador foi modelada com uma função Holling tipo 2. O sistema de equações diferenciais utilizado no trabalho é descrito pelas Equações 2-2, 2-3 e 2-4. Simulações para dinâmicas populacionais envolvendo *Daphnia pulex* como predador mostraram o potencial de desestabilização do sistema em meio enriquecido.

$$\frac{dP_1}{dt} = P_1\left[\mu_1\left(1 - \frac{P_1}{K_1} - \alpha\frac{P_2}{K_1}\right) - \frac{\gamma_1 Z}{1+h_1P_1+h_2P_2}\right] \quad \text{(Equação 2-2)}$$

$$\frac{dP_2}{dt} = P_2\left[\mu_2\left(1 - \frac{P_2}{K_2} - \beta\frac{P_1}{K_2}\right) - \frac{\gamma_2 Z}{1+h_1P_1+h_2P_2}\right] \quad \text{(Equação 2-3)}$$

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{\varepsilon_1\gamma_1P_1+\varepsilon_2\gamma_2P_2}{1+h_1P_1+h_2P_2} - \delta_z \quad \text{(Equação 2-4)}$$

Onde:

P_i: concentração de cada presa
Z: concentração do predador
μ_i: taxa máxima de crescimento da espécie de fitoplâncton i
K_i: capacidade de carga da espécie de fitoplâncton i
α, β: coeficientes de competição
γ_i: taxa de ataque do predador na espécie i
h_i: produto entre a taxa de ataque e o tempo de processamento para a espécie i
ε_i: eficiência de conversão da espécie i em biomassa de predador
δ_z: taxa de mortalidade do predador

A Figura 2.5 mostra um exemplo de comportamento presa-predador simulado em MATLAB R2007b (The Mathworks, Natick, MA), a partir do modelo de Kretzschmar, Nisbet e McCauley (1993), descrevendo os ciclos alternados de crescimento das populações, conforme mencionado anteriormente.

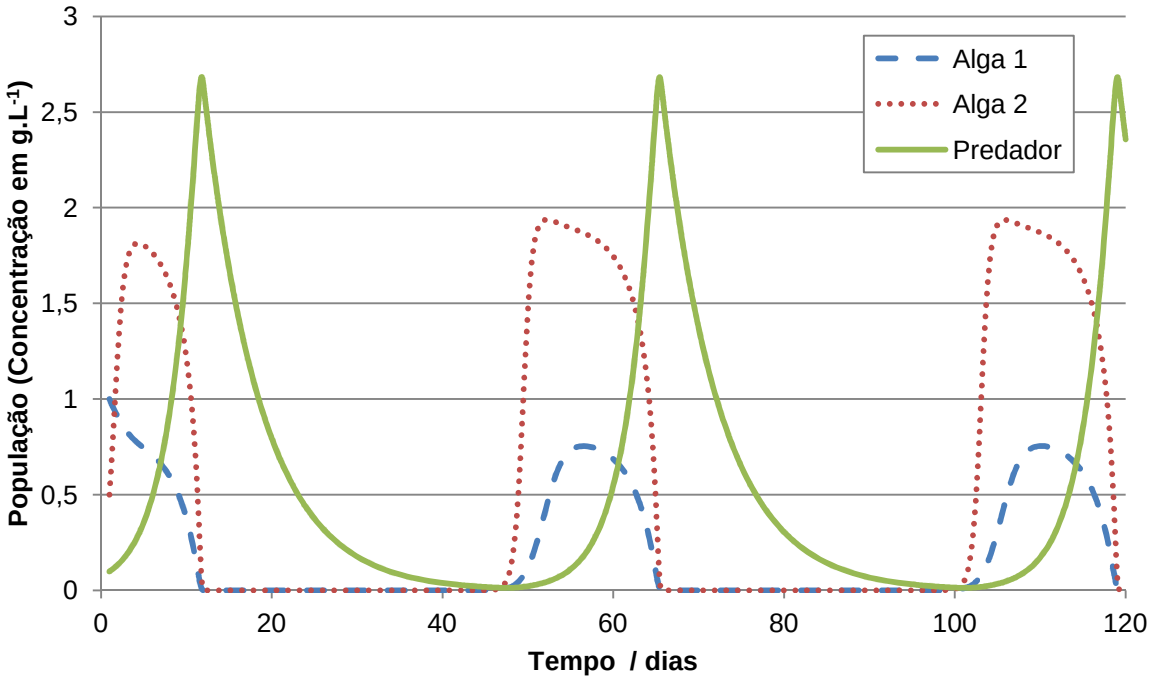


Figura 2.5 – Exemplo de comportamento presa-predador

Embora menos freqüentes na literatura, macromodelos para o estudo e simulação do cultivo de microalgas e cianobactérias em sistemas abertos foram uma importante base para o presente estudo. Incropera e Thomas (1978) desenvolveram um sistema para predição do rendimento de culturas de algas unicelulares em função da localização geográfica e variação de condições ao longo dos dias e das estações do ano, propondo sua utilização como uma ferramenta para auxiliar a seleção de áreas promissoras para cultivo, com base na produtividade média.

Guterman, Vonshak e Ben-Yaakov (1990) desenvolveram um modelo para o crescimento de *Spirulina platensis* em sistemas abertos, capaz de simular a produção de biomassa, o pH, a taxa de crescimento, evolução de O_2 e taxa de fixação de CO_2, em função da intensidade luminosa, temperatura, pH, nutrientes, etc.

Sukenik et al. (1991) desenvolveram um modelo determinístico para a produtividade de *Isochrysis galbana* em tanques de cultivo abertos operados continuamente. Os autores assumiram saturação de nutrientes, limitação apenas pela disponibilidade de luz, boa agitação do tanque e gradientes de concentração e temperatura desprezíveis. A aplicação do modelo para luminosidades típicas para a região de Eilat, em Israel, demonstrou variações de produtividade ao longo do ano e apresentaram valores médios coerentes com resultados de campo.

James e Boriah (2010) combinaram um simulador de dinâmica dos fluidos desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental norte-americana (EPA) com um modelo de qualidade da água desenvolvido pelo Batalhão de Engenheiros do Exército norte-americano – originalmente criado para estudos de eutrofização – para modelar a cinética de crescimento da diatomácea *Phaeodactylum tricornutum* em tanques abertos em formato de pista.

2.4 Análise emergética

O uso de análise emergética pode avaliar a sustentabilidade de longo prazo de um sistema, baseada no trabalho realizado por toda a biosfera para mover o processo produtivo (BASTIANONI; MARCHETTINI, 1996). A análise emergética contabiliza os valores de recursos, serviços e produtos, tanto valoráveis como não-valoráveis, em uma base comum de unidades de energia solar (BROWN; HERENDEEN, 1996).

Emergia é uma medida da convergência global de energia, tempo e espaço necessários para tornar um determinado recurso disponível (BASTIANONI; MARCHETTINI, 1996), quantificando os valores dos recursos naturais e econômicos em uma base comum e definindo a quantidade total de energia necessária para prover um serviço ou produto (BROWN; HERENDEEN, 1996). Segundo a definição de Odum (1996), “emergia solar é a energia solar disponível utilizada direta ou indiretamente para produzir um serviço ou produto”. Emergia inclui energias ambientais livres como vento e água, considerados elementos críticos para o processo, também levando em conta as energias acopladas como serviços humanos e bens manufaturados (FELIX; TILLEY, 2009). A unidade definida para emergia é o emjoule solar (sej).

O valor de um produto em análise emergética é baseado nas entradas do sistema e não no valor que um terceiro está disposto a pagar por ele (BROWN; HERENDEEN, 1996).

Um dos principais conceitos que diferenciam análise emergética de análises energéticas tradicionais é que, ao longo de uma cadeia produtiva, a energia possui distintos níveis de qualidade e capacidades distintas de realizar trabalho. Correções de qualidade, ou transformidades, se fazem portanto necessárias para comparar formas distintas de energia (BROWN; ULGIATI, 2004). Segundo Odum (1996), transformidade é o quociente entre a emergia de um produto e sua energia e sua unidade é expressa em emjoules por joule (sej J^{-1}).

O cálculo de transformidade é demonstrado utilizando a Figura 2.6, que mostra o diagrama emergético usado para descrever o sistema de produção de madeira em uma floresta de pinheiros na Suécia.

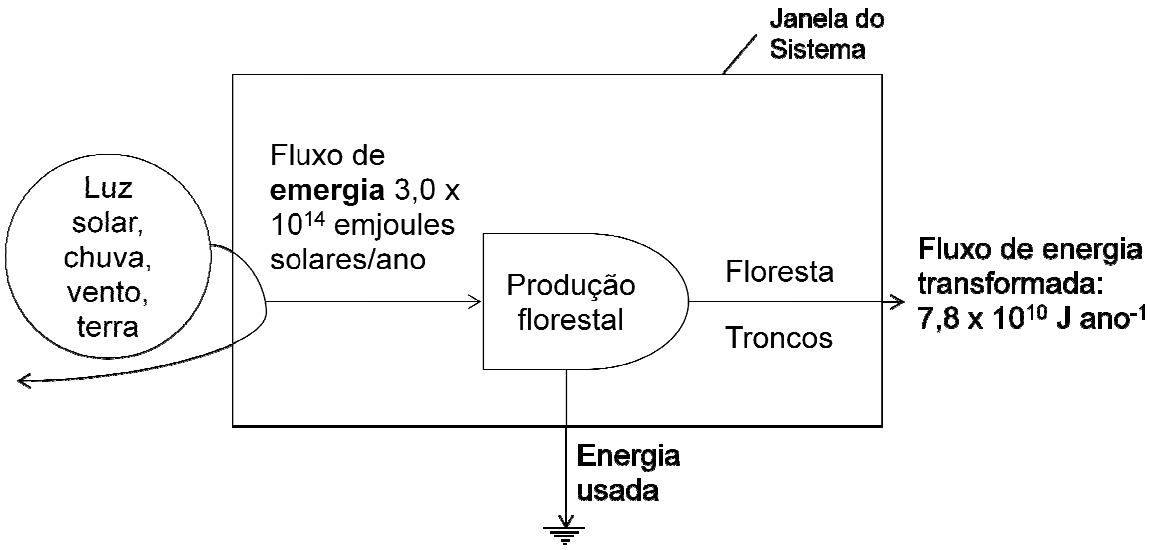


Figura 2.6 – Diagrama emergético demonstrando a produção de madeira em uma floresta de pinheiros sueca, adaptado de Odum (1996)

No exemplo, a transformidade dos troncos é obtida dividindo-se os fluxos de emergia solar pelo fluxo de energia embutida nos produtos (ODUM, 1996):

$$Transformidade = \frac{Fluxo\ Emergia\ solar}{Fluxo\ Energia} = \frac{3{,}0 \times 10^{14} sej\ ano^{-1}}{7{,}8\ \times 10^{10} J ano^{-1}} = 3.846\ sej\ J^{-1}$$

Um mesmo produto pode se originar de diferentes processos e portanto possuir transformidades distintas em função de tempo, localidade e desenvolvimento tecnológico (ULGIATI et al, 1995). Não há, portanto, uma única transformidade para um determinado produto, mas sim uma faixa de transformidades. Em casos em que a origem exata de um produto não é conhecida, transformidades médias devem ser utilizadas (BROWN; HERENDEEN, 1996).

Entre as vantagens da análise emergética, pode-se citar, segundo Hau e Bakshi (2004): ela supera a inabilidade de abordagens tradicionais em considerar a contribuição de processos ecológicos para o progresso humano; permite uma conexão entra sistemas econômicos e sistemas ecológicos; permite determinar um valor para contribuições não oriundas do mercado, de uma maneira objetiva; é

cientificamente coesa e compartilha o rigor de métodos termodinâmicos; possuiu uma unidade comum, que permite comparar processos em uma base única; é uma das ferramentas de análise mais amplas para tomada de decisão levando em conta fatores ambientais. Uma análise puramente econômica para a tomada de decisão tende a considerações exclusivamente de curto prazo e sem considerar o impacto do projeto no ecossistema (ULGIATI; ODUM; BASTIANONI, 1994).

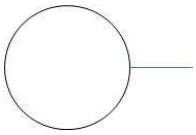
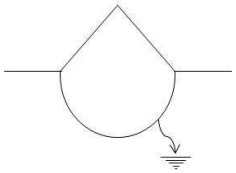
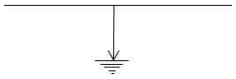
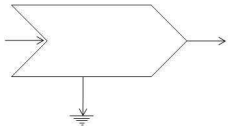
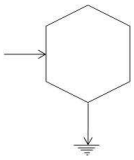
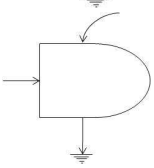
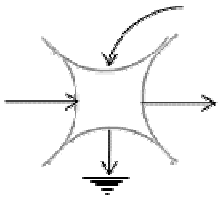
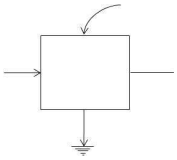
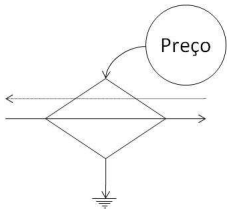
Este tipo de análise encontrou inicialmente alguma resistência da parte de economistas, físicos e engenheiros (HAU; BAKSHI, 2004), especialmente no que diz respeito a sua utilização na análise de políticas públicas (HERENDEEN, 2004). Várias das críticas feitas à análise emergética são, no entanto, igualmente pertinentes para metodologias como a avaliação de ciclo de vida, análise exergética cumulativa, avaliação exergética de ciclo de vida e análise de fluxos materiais (HAU; BAKSHI, 2004).

2.4.1 Metodologia de análise

O processo de avaliação emergética pode ser dividido em cinco etapas (CAVALETT; ORTEGA, 2009): definição do sistema a ser estudado e determinação dos limites da avaliação; preparação de um diagrama emergético do sistema; análise dos fluxos de energia de entrada e saída; cálculo dos índices emergéticos; e interpretação e comparação destes índices.

Recomenda-se, segundo Odum (1996), seguir os seguintes passos para a montagem de um diagrama emergético: definir os limites do sistema estudado, separando assim os componentes e processos internos da influência exterior; listar as fontes importantes afetando o sistema; listar os componentes internos e as unidades consideradas relevantes; listar os processos, incluídos fluxos e transações monetárias; desenhar o diagrama, começando pelas fontes externas e ordenando fontes e componentes de acordo com a grandeza das transformidades, da esquerda para a direita, conectando então os símbolos pelos caminhos do processo. A Tabela 2.10 lista os símbolos mais utilizados na construção de diagramas emergéticos. Valyi e Ortega (2004) desenvolveram a plataforma *Emergy Simulator* (EmSim) para auxiliar no desenho e simulação diagramas emergéticos.

Tabela 2.10 – Símbolos mais comuns usados na construção de diagramas emergéticos, adaptado de Odum (1996)

Símbolo	Descrição
	Fluxo de Energia: Um caminho energético cujo fluxo depende da interação com a fonte ou com a quantidade estocada
	Fonte: Recurso externo de energia, cujo fornecimento é controlado externamente
	Tanque: Depósito de energia dentro do sistema, armazenando uma determinada quantidade, em função do balanço de entradas e saídas
	Sumidouro de energia: Dispersão de energia potencial em calor que acompanha todos os processos de transformação ou armazenagem
	Interação: Intersecção interativa de dois caminhos associados para produzir uma saída proporcional a ambos
	Consumidor: Unidade que transforma, armazena e retroalimenta a energia
	Produtor: Unidade que coleta e transforma energia de baixa qualidade sob interações controladas por fluxos de alta qualidade
	Interruptor: Símbolo que representa ações de controle de um fluxo ou processo
	Caixa: Símbolo de uso variado que pode ser associado a qualquer unidade ou função
	Transação: Unidade que representa a venda de bens ou serviços em troca de pagamento monetário

É comum que o primeiro diagrama elaborado seja mais complexo, com riqueza de detalhes e grande número de unidades e fluxos. Para facilitar a análise é aconselhável a simplificação do diagrama, por exemplo, através da agregação de unidades (ODUM, 1996).

A Figura 2.7 exemplifica a criação de um diagrama emergético utilizando-se a ferramenta EmSim.

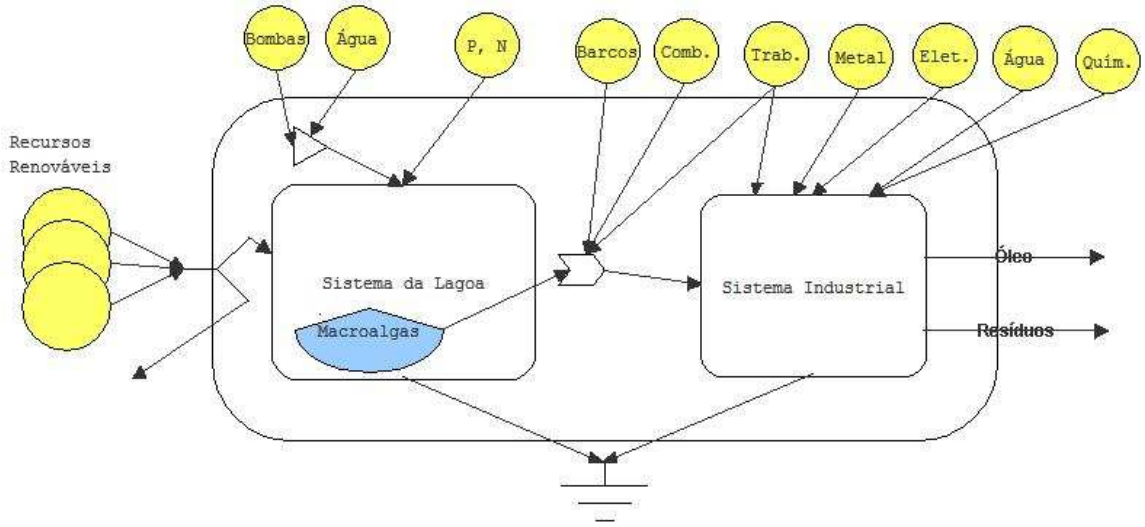


Figura 2.7 – Exemplo de diagrama emergético para o sistema estudado por Bastianoni et al. (2008) de produção de óleos para biocombustíveis, a partir de algas extraídas da lagoa Orbetello

O passo seguinte para análise emergética é a contabilização dos fluxos, que pode ser feita utilizando-se uma tabela de fluxos emergéticos. A sua forma mais simples, proposta por Odum (1996) está apresentada na Tabela 2.11.

Tabela 2.11 – Tabela de fluxos emergéticos (ODUM, 1996)

Notas*	**Item**	**Unidade (J, g, $)**	**Quantidade (unidade ano^{-1})**	**Emergia Solar / Unidade (sej unidade^{-1})**	**Emergia Solar (sej ano^{-1})**
1	Item 1	J	200	1×10^5	2×10^7
2	Item 2	$	5,000	1×10^7	5×10^{10}

Uma linha dedicada a cada fonte, processo ou armazenagem estudada.

* Notas referentes ao cálculo o fontes de cada item são listadas no rodapé da tabela.

As transformidades ou conversões de unidade para emergia solar, apresentadas na quarta coluna, são obtidas a partir da avaliação de cada recurso e considerando sua origem ou forma de produção (PEREIRA, 2008). Há ampla disponibilidade de tabelas de transformidade na literatura (BRANDT-WILLIAMS, 2002; BROWN; BARDI, 2002; KANGAS, 2002, ODUM, 1996; ODUM; BROWN; BRANDT-WILLIAMS, 2000; ODUM, 2000). Quanto maior a transformidade de um produto, maior o número de transformações de energia e recursos utilizados na sua produção. A Tabela 2.12 mostra alguns exemplos de transformidades.

Tabela 2.12 – Exemplos de transformidades

Item	**Transformidade / sej J^{-1}**	**Referência**
Luz solar	1	Odum, 1996
Chuva	$3{,}06 \times 10^4$	Cavalett e Ortega, 2009
Soja (grão, transportado)	$1{,}01 \times 10^5$	Cavalett e Ortega, 2009
Óleo diesel	$1{,}10 \times 10^5$	Brandt-Williams, 2002
Hexano	$1{,}36 \times 10^5$	Odum, 1996
Eletricidade	$2{,}77 \times 10^5$	Odum, 1996
Óleo de soja	$3{,}51 \times 10^5$	Cavalett e Ortega, 2009

Para facilitar a análise posterior e o cálculo dos índices, cada fluxo da tabela de contabilidade emergética pode ser classificado como renovável (R), não-renovável (N), bens, trabalho ou serviços adquiridos da economia (F). A emergia total do sistema é normalmente abreviada por Y e a energia do produto por E_p (CAVALETT; ORTEGA, 2009; PEREIRA, 2009). Os índices baseados nos fluxos de energia são importantes para avaliar o comportamento de todo o sistema (ULGIATI et al., 1995) e são particularmente úteis na comparação de processos e fontes alternativas. A Tabela 2.13 descreve os índices emergéticos mais freqüentemente utilizados.

Tabela 2.13 – Principais Índices Emergéticos

Índice	Cálculo	Descrição (CAVALETT; ORTEGA, 2009; ODUM, 1996; PEREIRA, 2008)
Transformidade (Tr)	$Tr = \frac{Y}{E_p}$	Medida da qualidade do fluxo de energia que permite comparações entre diferentes formas e sistemas.
Taxa de Rendimento Emergético (EYR)	$EYR = \frac{Y}{F}$	Rendimento emergético do sistema ou ganho em energia primária disponibilizada para a economia que irá consumir o produto
Taxa de Carga Ambiental (ELR)	$ELR = \frac{F + N}{R}$	Razão entre recursos não-renováveis e renováveis que avalia a pressão causada pelo sistema ao ecossistema
Renovabilidade emergética (%R)	$\%R = \frac{R}{Y}$	Razão entre a emergia de fontes renováveis e a emergia total utilizada.
Taxa de Investimento de Emergia (EIR)	$EIR = \frac{F}{R + N}$	Razão entre a emergia retroalimentada da economia (investimento monetário) e as entradas de emergia no sistema. Permite avaliar o resultado econômico na utilização do investimento em relação a alternativas.

A taxa de rendimento emergético (EYR) representa a razão entre a emergia dos produtos do sistema (Y) e a soma dos fluxos comprados da economia (materiais e serviços). Quanto maior o valor de EYR, melhor a capacidade de aproveitamento de recursos locais.

A taxa de carga ambiental (ELR) é um indicador da pressão causada pelo processo no ecossistema local (BROWN; UGLIATI, 1997) e é obtida dividindo-se a totalidade da emergia não-renovável (F + N) pelos fluxos renováveis obtidos do ecossistema (R). Quanto maior o valor de ELR, maior o impacto no meio-ambiente.

A renovabilidade emergética (%R) representa a fração de entradas de emergia renovável no fluxo de emergia total do sistema. É um importante indicador de sustentabilidade do processo. No longo prazo, apenas processos com elevado teor renovável serão sustentáveis (BROWN; UGLIATI, 1997).

A taxa de investimento emergética é um índice importante na avaliação da qualidade do uso do processo, comparado com alternativas, obtido pela razão entre os fluxos de emergia comprados (F) e os fluxos naturais do sistema (R e N).

A análise emergética tradicionalmente classifica entradas como renováveis ou não-renováveis baseadas na maior parte de sua composição. No entanto, alguns autores propõem o cálculo dos índices emergéticos particionando as entradas, isto é, considerando o percentual renovável e não-renovável dos materiais e serviços comprados (FELIX; TILLEY, 2009, CAVALETT; QUEIROZ; ORTEGA, 2006)

Brown e Ulgiati (1997) definiram um novo índice para análise emergética de processos chamado Índice de Sustentabilidade Emergética (ESI). O ESI pode ser utilizado para comparar diferentes processos levando ao mesmo produto ou avaliar o impacto de inovação técnica (modificações de processos, por exemplo) e é obtido dividindo-se a Taxa de Rendimento Emergético (EYR) pela Taxa de Carga Ambiental (ELR). Um processo sustentável deve maximizar ESI, isto é, fornecer o maior rendimento emergético associado à menor carga ambiental possível.

Toda a emergia que entra em um processo é direcionada para as suas saídas. Subprodutos de um processo possuem a emergia total associada a cada uma das saídas. É importante diferenciar entre subprodutos e bifurcações de uma mesma saída (BROWN; HERENDEEN, 1996). Bastianoni e Marchettini (2000) propuseram um cálculo alternativo para transformidade em sistemas com co-produções, baseado nos conceitos de transformidade conjunta, obtida através a razão entre o fluxo de emergia total do sistema e a soma das energias de cada um dos subprodutos. A comparação da transformidade conjunta com a média ponderada nas transformidades para um caso de alternativo de produção isoladas dos dois produtos serve para determinar as vantagens da co-produção em termos de utilização de recursos.

2.4.2 Aplicações da análise emergética

A análise emergética pode ser utilizada em campos extremamente diversos (BROWN; ULGIATI, 2004; HAU; BAKSHI, 2004), mostrando-se útil para o estudo de sistemas agrícolas, com foco nas cargas econômicas e ambientais (CAVALETT; QUEIROZ; ORTEGA, 2006) e também é uma ferramenta valiosa para comparar soluções tradicionais (tecnológicas) e soluções de engenharia ecológica para problemas (ULGIATI et al., 1995).

Arias e Brown (2009) utilizaram análise emergética para determinar o desempenho e sustentabilidade de alternativas de tratamento de esgoto na Colômbia, em paralelo com uma análise de custos de processo. Índices de Carga Ambiental (ELR) da ordem de 822 foram encontrados para alguns dos processos propostos.

A metodologia foi utilizada por Cavalett, Queiroz e Ortega (2006) para avaliar aspectos ambientais da produção de grãos, suínos e peixes em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil. Os valores de transformidades encontradas para os produtos apresentaram inicialmente diferenças com valores reportados na literatura, mas a estratégia de tratamento de co-produções proposta por Bastianoni e Marchettini (2000) permitiu solucionar a discrepância. A avaliação mostrou que a produção integrada é mais eficiente do que os sistemas trabalhando separadamente.

Cavalet e Ortega (2009) combinaram análise econômica e emergética para a avaliação do processo de produção e industrialização de soja no Brasil. O percentual de emergia renovável encontrado para o refino do óleo foi de 33,2%. O Índice de Carga Ambiental foi de 2,02, crescente ao longo da cadeia. Os autores também demonstraram o impacto do balanço de nutrientes na sustentabilidade do processo.

Cuadra e Rydberg (2006) utilizaram análise emergética no estudo de sistemas de produção, processamento e exportação de café na Nicarágua. O estudo sugere que a análise emergética também pode ser uma ferramenta importante na avaliação do comércio entre países.

Lefroy e Rydberg (2003) usaram análise emergética para comparar três sistemas de cultivo na Austrália, permitindo determinar qual cultura potencializaria a melhor utilização de recursos naturais para o ecossistema estudado.

Análise emergética também pode ser utilizada para avaliações gerais da sustentabilidade de uma região ou país. Ulgiati, Odum e Bastianoni (1994) realizaram uma análise emergética do sistema natural e econômico da Itália, comparando os índices com os de outros países e utilizando como base para sugestões na utilização de recursos, balanço comercial e políticas públicas.

Siracusa e La Rosa (2006) utilizaram análise emergética para avaliar o uso de recursos naturais para o tratamento de efluentes em uma cidade na Sicília, mostrando vantagens de associação de uma planta de tratamento de água com um sistema de pântanos artificiais.

Análise emergética também foi utilizada por Brown e McClanahan (1996) para estudar a economia tailandesa e o impacto de duas represas propostas para o rio Mekong.

Nilsson (1997) utilizou análise de energia, exergia e emergia no uso de palha de grãos como combustível em caldeiras de aquecimento de água. Comparou-se, por exemplo, o balanço de energia relacionado ao uso da palha (bastante favorável, 12:1) com dados exergéticos, que mostram a ineficiência da etapa de transformação, representada pela caldeira. Já a análise emergética contabilizou as grandes quantidades de emergia utilizadas ao longo da cadeia para a produção e coleta da palha, resultando em um baixo Índice de Rendimento Líquido emergético.

Pereira (2008) combinou análise de ciclo de vida com análise emergética para avaliação da cadeia produtiva do suco de laranja congelado e do álcool combustível. A análise detalhada de cada etapa do processo mostrou que 80% dos fluxos emergéticos da cadeia produtiva do etanol de cana-de-açúcar estão concentrados na lavoura. O estudo obteve uma transformidade de $4,87 \times 10^4$ sej J^{-1} para o etanol na saída da usina, com um percentual de renovabilidade de 30,9%, um Índice de Carga Ambiental de 2,23 e um Índice de Sustentabilidade Emergética de 0,71.

Análise emergética tem sido amplamente utilizada na avaliação de processos e modelos de negócio para a produção de biocombustíveis. Bastianoni e Marchettini (1996) compararam a produção de etanol a partir de cana-de-açúcar no Brasil, Flórida e Louisiana e a partir de uvas na Itália, utilizando uma análise conjunta de emergia, energia e balanço de CO_2. Foram obtidas transformidades entre 9,30 x 10^4 sej J^{-1} (etanol de cana na Lousiana) a 7,62 x 10^5 sej $J^{-}1$ (etanol de uvas, na Itália) e Índices de Carga Ambiental entre 1,57 e 13,63, para os dois processos supracitados. Para demonstrar a aplicação do conceito de transformidade conjunta descrito anteriormente, os mesmos autores (2000) analisaram a co-produção de leite e metano (para geração de energia) em fazendas pecuárias em Porto Rico, demonstrando o menor impacto para o ambiente em relação a produção isolada.

Lanzotti (2000) aplicou a análise emergética no estudo da produção de açúcar e álcool de cana-de-açúcar, calculando os fluxos e índices emergéticos para cada uma das etapas do processo e determinando o impacto de novas tendências agroindustriais como mecanização da colheita, aproveitamento de resíduos e produção orgânica na rentabilidade e sustentabilidade do processo.

Hill et al. (2006) apresentaram uma análise econômica, ambiental e energética de biodiesel de soja em comparação com etanol de milho nos EUA.

Bastianoni et al. (2008) usaram análise emergética para comparar a produção de biodiesel a partir de girassol com lipídeos extraídos de macroalgas do lago Orbetello na Itália. Resultados mostram que o consumo (investimento) total de emergia é muito maior (30-95 vezes) do que utilizando óleo de girassol. Esta diferença é atribuída a uma combinação de fatores, incluindo o baixo conteúdo de lipídeos das algas e o método de extração por solvente com recuperação.

Felix e Tilley (2009) combinaram várias ferramentas de análise energética para verificar a viabilidade e sustentabilidade da produção de etanol celulósico a partir de capim elefante. A análise emergética encontrou uma transformidade de 1,1 x 10^5 sej J^{-1}, com um Índice de Carga Ambiental de 3,42 e um Índice de Sustentabilidade Emergética de 0,33, mostrando uma alta dependência da tecnologia atual de fontes não-renováveis de energia e matérias-primas compradas.

Goh e Lee (2010) avaliaram uma proposta de biorrefinaria integrada para a produção de biodiesel e etanol a partir de derivados de palma, em que o óleo extraído é esterificado e todos os resíduos lignocelulósicos são hidrolisados e os açúcares resultantes fermentados. A análise apresentou Índices de Carga Ambiental de 3,02 e de sustentabilidade emergética de 1,05 em função do impacto de mão-de-obra e serviços, equipamentos, eletricidade e reagentes.

3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia abrangente para avaliação de projetos e tecnologias envolvendo utilização em escala comercial de microalgas e cianobactérias para a produção de matérias-primas de interesse econômico e captura de CO_2, considerando aspectos de engenharia e viabilidade técnica, a viabilidade econômica e os índices de sustentabilidade do processo. Esta avaliação abrangente do processo permite a compreensão das características e limitações do estado atual da tecnologia e auxilia a priorização das áreas em que inovações são mais impactantes, e representa uma contribuição inovadora ao tema.

A metodologia de análise baseia-se em um modelo matemático para o crescimento de microalgas e cianobactérias, acoplado com balanços de massa e energia e planilhas de avaliação econômica e contabilidade emergética.

Visa-se também a utilização da metodologia proposta para uma análise de sensibilidade para as principais variáveis de processo e para a avaliação do impacto de potenciais avanços tecnológicos e modelos de negócio alternativo nos indicadores econômicos e de sustentabilidade.

4 DESCRIÇÃO DO PROCESSO E METODOLOGIA ANALÍTICA

4.1 Definição do sistema de referência

O sistema produtivo a ser utilizado como base para as análise é composto de um sistema de tanques abertos em forma de pista, agitado por roda de pás, considerado o mais promissor para aplicações comerciais em grande escala (BENEMANN, 2008; TREDICI, 2004). As bordas e divisões internas são feitas de alvenaria, mas o fundo dos tanques não é revestido (solo compactado). Os modelos e cálculos são baseados em uma área total de 500 hectares, divididos em tanques de 80.000 m^2 e 0,4 m de profundidade.

Para o cenário base, a suspensão é coletada periodicamente para um tanque intermediário, de onde é transferida para uma bateria de centrífugas concentrando a 22% de sólidos (MOLINA GRIMA ET AL., 2003). A escolha de centrífugas, embora com considerável impacto aos custos do processo, é devida a possibilidade de operação contínua, com menor necessidade de mão de obra e com concentração a teores de sólidos mais altos. O meio de cultura é reciclado para um tanque pulmão, no qual nutrientes são repostos. A pasta concentrada passa por um processo de secagem utilizando secadores de esteira, tipicamente utilizados na secagem de lodos em usinas de tratamento de água (LARDON et al., 2009), seguido por extração com solvente (hexano), em processo semelhante ao empregado para extração de óleo de soja. A biomassa residual passa por um processo de acabamento para remoção de solvente residual. Após a recuperação do solvente, que é reciclado para a etapa de extração, obtém-se o óleo algal que pode ser utilizado como matéria-prima para a indústria química, produção de biodiesel ou submetido a extrações adicionais para a obtenção de componentes de alto valor agregado.

O microorganismo cultivado no sistema proposto é a cianobactéria *Spirulina platensis* e os nutrientes são fornecidos no modelo base pelo meio de cultura de baixo custo proposto por Raoof et al. (2006), que utiliza fertilizantes comerciais como fontes de nitrogênio e potássio. O CO_2 é fornecido por dispersores dispostos em poços distribuídos ao longo do tanque. Para o caso base, a simulação considerou a utilização direta de gás de queima como fonte de CO_2. O modelo permite, no

entanto, considerar também a produção utilizando CO_2 puro, reduzindo custos de transporte e bombeamento (BENEMANN; OSWALD, 1996), sem no entanto afetar produtividade ou potencial de mitigação (DOUCHA; STRAKA; LÍVANSKÝ, 2005).

A Figura 4.1 descreve de maneira simplificada o processo estudado.

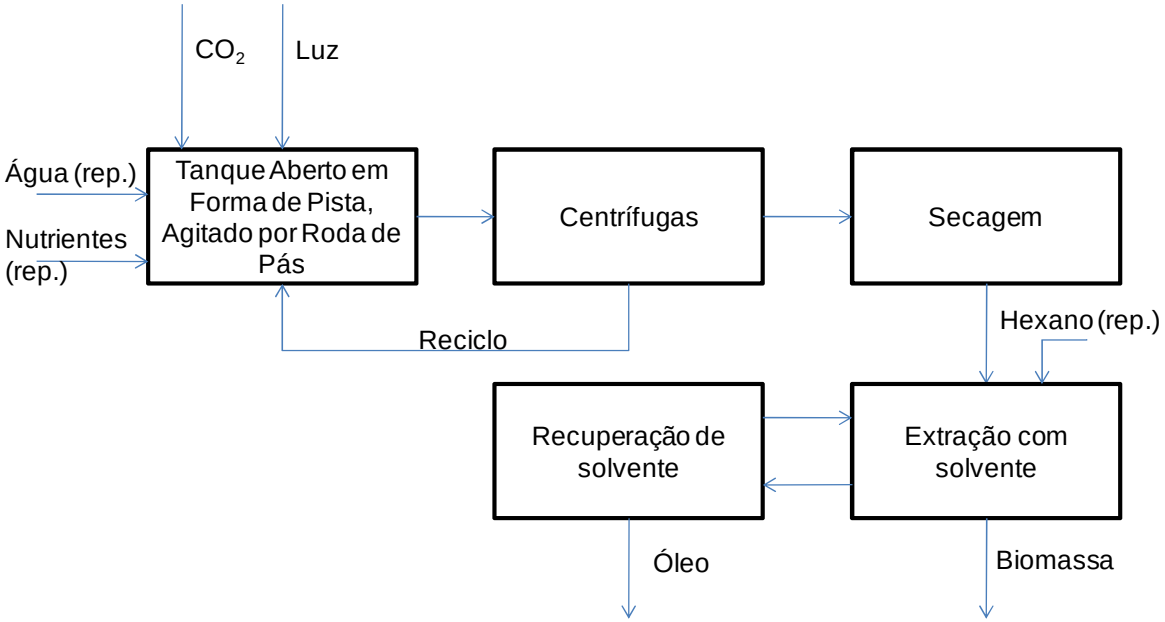


Figura 4.1 – Diagrama de blocos simplificado do processo de referência para sistemas de cultivo e extração

4.2 Desenvolvimento do Modelo Matemático

O modelo matemático para o crescimento de *Spirulina platensis* em tanques abertos foi desenvolvido em MATLAB R2007b (The Mathworks, Natick, MA) a partir das equações propostas por Guterman, Vonshak e Ben-Yaakov (1989). Considerou-se o excesso de CO_2 e nutrientes (crescimento limitado pela disponibilidade de luz) e considerou-se desprezível o efeito de saturação luminosa (justificado neste caso pelo efeito da camada fotossinteticamente ativa, explicado a seguir). Cada tanque é modelado como um reator bem agitado, sem gradientes de temperatura ou concentração no volume do meio de cultura.

A taxa de variação da concentração de biomassa é dada no modelo por:

$\frac{dC(t)}{dt} = \mu_e C(t)$, sendo

$$\mu_e = \mu_f - \mu_r \quad \text{(Equação 4-1)}$$

$$\mu_f = \begin{cases} f(T,I), & I > 0 \\ 0, & I = 0 \end{cases} \quad \text{(Equação 4-2)}$$

$$\mu_r = f(T) \quad \text{(Equação 4-3)}$$

onde μ_e é a taxa efetiva de crescimento, μ_f é a taxa de crescimento na fotossíntese, μ_r a taxa de crescimento (consumo de biomassa) na respiração, T a temperatura do meio e I a intensidade luminosa.

Para o ciclo escuro, Guterman, Vonshak e Ben-Yaakov (1989) demonstraram que para a faixa de temperaturas usuais, pode-se aproximar μ_r pela função:

$$\mu_r = \begin{cases} a \cdot T + b, & 15 < T \leq 40^o C \\ 0, & 15^o C \end{cases} \quad \text{(Equação 4-4)}$$

onde T é a temperatura do meio em graus Celsius.

Para o ciclo luminoso, o crescimento na fotossíntese é dado pela equação:

$$\mu_f = \frac{qI_0}{2{,}3OD(t)H}\left[1 - e^{(-2{,}3OD(t)H)}\right] \quad \text{(Equação 4-5)}$$

E a influência da temperatura no crescimento fotossintético pode ser aproximada por:

$$\mu_f(I,T) \cong \frac{qI_0}{2{,}3OD(t)H}\left[\frac{1-(T-T_{ot})^2}{\Delta T^2}\right] \quad \text{(Equação 4-6)}$$

onde q é o taxa de conversão luminosa, em min^{-1} $klux^{-1}$, I_0 é a intensidade luminosa na superfície, em klux, OD(t) a densidade ótica do meio em um dado tempo, H a profundidade do tanque, T a temperatura do meio em graus Celsius, T_{ot} a temperatura ideal de crescimento do microorganismo e ΔT a diferença entre as temperaturas máximas e mínimas.

A atenuação na luz ao longo do eixo z do tanque, causada pela absorção por células em suspensão, pode tornar a intensidade luminosa disponível inferior à

intensidade luminosa mínima para fotossíntese, criando uma zona escura no fundo do tanque (Z_e), onde respiração – semelhante à respiração noturna irá ocorrer, demonstrada na Figura 4.2.

Para *Spirulina platensis*, Wang, Fu and Liu (2007) encontraram uma intensidade luminosa mínima (I_e) para fotossíntese de 300 µmol m^{-2} s^{-1}, equivalente a aproximadamente 16,2 klux de radiação solar.

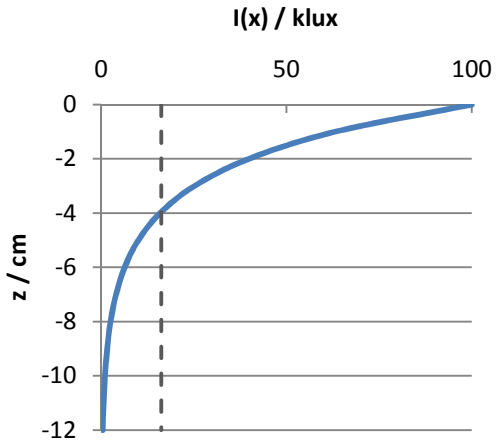


Figura 4.2 – Intensidade luminosa em função da profundidade do tanque e camada fotossinteticamente ativa

As equações 4-7 a 4-10 descrevem o cálculo da zona fotossinteticamente ativa no tanque – conseqüência da região escura em que a disponibilidade luminosa é inferior a intensidade mínima – e seu uso para o cálculo do impacto da respiração diurna.

$$I(x) = I_0 e^{-2,3OD(t)x}$$ (Equação 4-7)

$$x_e = -\frac{1}{2,3OD(t)} \ln\left(\frac{I_e}{I_0}\right)$$ (Equação 4-8)

$$Z_e = H - x_d$$ (Equação 4-9)

$$\mu_r = \begin{cases} (a \cdot T + b) \cdot \frac{Z_e}{H}, & 15 < T \leq 40^o C \\ 0, & 15^o C \end{cases}$$ (Equação 4-10)

Para o estudo da inclusão do efeito de contaminações no modelo utilizou-se uma função Holling tipo 2 para o sistema presa-predador, conforme apresentado por Kretzschmar, Nisbet e McCauley (1993), mostrado nas Equações 4-11 e 4-12.

$$\frac{dP_1}{dt} = P_1\left[\mu_1\left(1-\frac{P_1}{K_1}\right)-\frac{\gamma_1 Z}{1+h_1P_1}\right] \quad \text{(Equação 4-11)}$$

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{\varepsilon_1\gamma_1P_1}{1+h_1P_1} - \delta_z \quad \text{(Equação 4-12)}$$

Onde:

μ_1: taxa máxima de crescimento da cianobactéria cultivada
K_1: capacidade de carga da espécie da cianobactéria cultivada
γ_1: taxa de ataque do predador na cianobactéria cultivada
h_1: produto entre a taxa de ataque e o tempo de processamento para a cianobactéria
ε_1: eficiência de conversão da presa em biomassa de predador
δ_z: taxa de mortalidade do predador

A ordem de grandeza dos parâmetros foi estimada com base em dados para o sistema *Chlamydomonas reinhardtii* e *Daphnia pulex*, reportados por Nisbet et al. (1991):

γ_1 = 6 dia^{-1} = 4.17 x 10^{-3} min^{-1}
h_1 = 6,0, adimensional, produto entre a taxa de ataque e o tempo de processamento
ε_1 = 0,5, adimensional, eficiência de conversão (50%)
δ = 0,02 dia^{-1} = 1,38 x 10^{-5} min^{-1}, taxa de mortalidade do predador

A Tabela 4.1 sumariza as entradas e saídas do modelo.

Tabela 4.1 - Entradas e saídas do modelo para crescimento de Spirulina platensis em tanques abertos

Parâmetros de Entrada	Resultados fornecidos pelo modelo
Profundidade do tanque, Ht	Alterações na concentração de biomassa, ΔC
Concentração de biomassa inicial, C_0	Densidade ótica, OD
Temperatura, T	Produtividade areal de biomassa
Intensidade luminosa, I_0	Tempo entre coletas (t_c)
Concentração de biomassa para coleta, C_c	Produtividade total do sistema
Taxa de reposição, T_c	

A otimização de condições foi feita utilizando-se rotinas auxiliares para rodar experimentos variando os fatores estudados, simulando o sistema ao longo de um ano de produção nas condições de temperatura e luminosidade para a região de Campinas, no estado de São Paulo (GRUPO FAE, 1996, CIIAGRO, 2011). A determinação dos tempos de coleta foi realizada variando o intervalo de integração do modelo em passos de 15 minutos.

Os fluxogramas mostrando a implementação do modelo em MATLAB R2007b (The Mathworks, Natick, MA) e as estratégias usadas para simulação estão disponíveis no Apêndice 1.

4.3 Balanços de Massa

A taxa de evaporação de água nos tanques foi estimada a partir relação empírica sugerida pela Agência Ambiental Norte Americana (EPA, 1987) para evaporação em superfícies, definida pela Equação 4-13:

$$TE = \frac{0{,}162 \cdot MW \cdot K \cdot A \cdot P_v}{R(T+273)} \qquad \text{(Equação 4-13)}$$

onde TE é a taxa de evaporação em libras min^{-1}, MW o peso molecular do líquido, K o coeficiente de transferência de massa em cm s^{-1}, A representa a área da superfície em ft^2, P_v a pressão de vapor do líquido em mmHg, R a constante universal dos gases (82,05 atm cm^3 mol^{-1} K^{-1}) e T a temperatura do líquido. Para a água, K é definido por $0{,}25u^{0,78}$, onde u é a velocidade do vento na superfície. A inconsistência dimensional (várias unidades, tanto SI como inglesas) é devida ao caráter empírico da equação e tentativa da EPA em torná-la mais conveniente para usuários. A pressão de vapor para a água foi por sua vez calculada a partir da equação de Antoine, parametrizada na Equação 4-14 para temperaturas entre 1 e 100°C.

$$logP = 8{,}07131 - \frac{1730{,}63}{233{,}426+T} \qquad \text{(Equação 4-14)}$$

onde P representa a pressão de vapor em mmHg e T a temperatura em graus Celsius.

As perdas na coleta, secagem e extração foram estimadas a partir de valores típicos para os equipamentos e operações unitárias estudadas, obtidos através nas fichas técnicas dos equipamentos ou a partir da analogia com sua operação em processos similares, como por exemplo, tratamento de água ou extração de óleo de soja.

A fixação de CO_2 foi estimada a partir da relação estequiométrica para a fotossíntese em *Spirulina platensis* definida por Cornet et al. (1992), de 1,76 gramas de CO_2 por grama de biomassa produzida, em concordância com o fator 1,8 genericamente proposto para fixação de CO_2 por microalgas e cianobactérias (FAO, 2009).

O consumo estimado de nutrientes do meio de cultura foi calculado utilizando o balanço de nitrogênio, principal componente do meio de Zarrouk adaptado (RAOUF et al, 2006), como nitrato de sódio e terceiro principal componente da biomassa algal, descrito em detalhes na seção 4.3.

A demanda de energia elétrica do sistema foi baseada nas especificações dos equipamentos utilizados, analogias com o processo de extração de óleo de soja (PRADHAN et. al, 2008) e eficiências típicas da literatura (MOLINA-GRIMA ET AL., 2003, PETERS; TIMMERHAUS; WEST, 2003).

Os consumos de energia para a mistura e transferência de nutrientes, bombeamento e dispersão de CO_2 e agitação dos tanques de cultivo foram estimados a partir dos valores propostos por Bennemann e Oswald (1996), listados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Estimativas de consumo de energia elétrica para transferências e cultivo

Etapa	**Consumo / kWh ha^{-1} ano^{-1}**
Mistura e bombeamento de nutrientes	1.770
Bombeamento de CO_2	18.770 (gás de queima), 10.460 (CO_2 puro)
Tanques de cultivo	10.750

O balanço de hexano foi baseado em perdas típicas para a extração por solvente no processo de produção de óleo de soja (CAVALETT; ORTEGA, 2009).

Os balanços completos para o sistema de referência são mostrados como exemplo no Apêndice 2.

4.4 Análise econômica

A análise econômica preliminar (simplificada) foi realizada com base em estimativas de capital, atualizadas a valor presente com correção de índices de inflação, a partir de resultados reportados por Benemann e Oswald (1996), Moheimani (2005) e Stephens et al. (2010), considerando os custo de instalação nos Estados Unidos. Os custos de operação partiram de valores medidos sugeridos por Stephens et al. (2010) e as receitas baseiam-se nos valores para o mês de junho de 2011 para óleo e farelo de soja na Bolsa de Futuros de Chicago. A planilha de resultados financeiros foi baseada na metodologia proposta por Peters, Timmerhaus e West (2003), usando uma taxa anual de 10% para o cálculo do valor presente líquido (VPL) do projeto. Sempre que possível, calculou-se a taxa interna de retorno (TIR) para avaliação da qualidade do investimento, utilizando-se a função *IRR* do

Microsoft Excel 2007 (Microsoft Corporation, Redmond). A análise de sensibilidade foi realizada utilizando-se macros desenvolvidas em Visual Basic (Microsoft Corporation, Redmond) para simular as faixas de valores desejadas para as variáveis e respectivo impacto no NPV e TIR.

A análise econômica detalhada foi feita a partir dos fluxos, dimensões e demanda energética calculada nos balanços de massa e energia e utilizou cotações de preços de matérias-primas e equipamentos, relatórios de mercado e estimativas de custo para tanques, bombas, centrífugas, secadores e utilidades baseadas nas relações propostas por Peters, Timmerhaus e West (2003). Considerou-se para a análise econômica detalhada uma planta localizada em terras não aráveis no estado do Texas, nos Estados Unidos, em função da maior disponibilidade de cotações confiáveis. O cálculo de custos extras de capital baseou-se nas estimativas propostas por Peters, Timmerhaus e West (2003) como percentuais do total de grandes equipamentos comprados, para uma planta de processamento de sólidos e líquidos, mostrados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Estimativas para cálculo de custos adicionais de capital

Item	**Percentual do Custo Total de Equipamentos**
Instalação	39%
Instrumentação e controle	26%
Tubulação	31%
Elétrica	10%
Prédios	29%
Pátio	12%
Estrutura de serviços	55%
Engenharia e supervisão	32%
Despesas de construção	34%
Empreiteiro	19%
Contingência	37%

A mão-de-obra de operação foi calculada para uma equipe mínima de três operadores por turno por zona de até 40 tanques de cultivo, considerando três turnos por dia e um salário de US$40 hora^{-1}, representativo da região considerada para o projeto. Os demais custos operacionais foram calculados com base nos fatores propostos por Peters, Timmerhaus e West (2003), mostrados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Fatores para estimativas de custos adicionais de operação

Item	**Fator**
Mão-de-obra de supervisão	15% da mão-de-obra de operação
Manutenção	6% do capital fixo
Itens de operação	15% do valor de manutenção
Laboratório	15% da mão-de-obra de operação
Impostos sobre propriedade	2% do capital fixo
Seguro	1% do capital fixo
Extra, Geral	60% da soma de mão-de-obra e manutenção
Administração, Vendas e P&D	4% das receitais totais

Da mesma maneira que na análise anterior, as receitas baseiam-se nos valores para o mês de junho de 2011 para óleo e farelo de soja na Bolsa de Futuros de Chicago, considerando uma aplicação conservadora dos produtos como matéria-prima para biodiesel e ração animal, respectivamente. A planilha de resultados financeiros foi construída utilizando a mesma metodologia descrita anteriormente.

As planilhas de capital, custo de operação, receitas e resultados econômicos para o caso base são apresentadas como exemplo no Apêndice 3, incluindo as fontes utilizadas.

4.5 Análise emergética

A análise emergética para os sistemas estudados foi realizada de acordo com as etapas descritas na seção 2.4.1. A partir do diagrama de blocos para o caso base, definiu-se os limites do sistema, classificando cada um dos componentes do processo. Listou-se as entradas e saídas relevantes, incluindo fluxos e transações monetárias e construiu-se, a partir delas, o diagrama emergético do sistema.

As planilhas de cálculo, tabelas de fluxos emergéticos e índices foram calculados em Microsoft Excel 2007 (Microsoft Corporation, Redmond), integrando-se aos balanços de massa e modelo de avaliação econômica.

A Tabela 4.5 lista os índices emergéticos que foram utilizados neste estudo para avaliação do sistema de referência e análise do impacto de novas tecnologias propostas.

Tabela 4.5 – Índices emergéticos utilizados neste estudo

Índice	**Cálculo**
Transformidade (Tr)	$Tr = \frac{Y}{E_p}$
Taxa de Rendimento Emergético (EYR)	$EYR = \frac{Y}{F}$
Taxa de Carga Ambiental (ELR)	$ELR = \frac{F + N}{R}$
Renovabilidade emergética (%R)	$\%R = \frac{R}{Y}$
Taxa de Investimento de Emergia (EIR)	$EIR = \frac{F}{R + N}$
Índice de Sustentabilidade Emergética (ESI)	$ESI = \frac{EYR}{ELR}$

4.6 Análise de sensibilidade e estudo de cenários alternativos

A análise de sensibilidade foi realizada utilizando-se macros desenvolvidas em Visual Basic (Microsoft Corporation, Redmond) para simular as faixas de valores

desejadas para as variáveis e respectivo impacto no NPV, TIR (quando existente), potencial de fixação de CO_2, transformidade, fluxos de emergia e índices emergéticos.

Foram também desenvolvidos dez cenários alternativos baseados em melhorias do processo ou inovações propostas na literatura, para os quais foram novamente simulados os balanços de massa, planilhas de custos, resultados e contabilidade emergética.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Modelo matemático para crescimento em tanques em pista

5.1.1 Ajuste de parâmetros do modelo

Determinaram-se inicialmente os parâmetros do modelo *q*, *a* e *b* (equações 4-4 e 4-5) através da rotina *fminsearch* do software MATLAB, minimizando-se o soma do quadrado dos resíduos para concentração da biomassa, a partir dos dados experimentais reportados por Guterman, Vonshak e Ben-Yaakov (1990), em um dos principais trabalhos descrevendo em detalhes o cultivo de *Spirulina platensis* em tanques abertos em formato de pista. Os valores encontrados são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Parâmetros utilizados na simulação do modelo

Parâmetro	Valor encontrado
q	$1{,}54 \times 10^{-4}$ klux min^{-1}
a	-2.31×10^{-5} min^{-1} $^{o}C^{-1}$
b	3.43×10^{-4} min^{-1}

A Figura 5.1 mostra o resultado do teste do modelo após o ajuste de parâmetros, para um período de dois dias de crescimento sem coleta ou diluição.

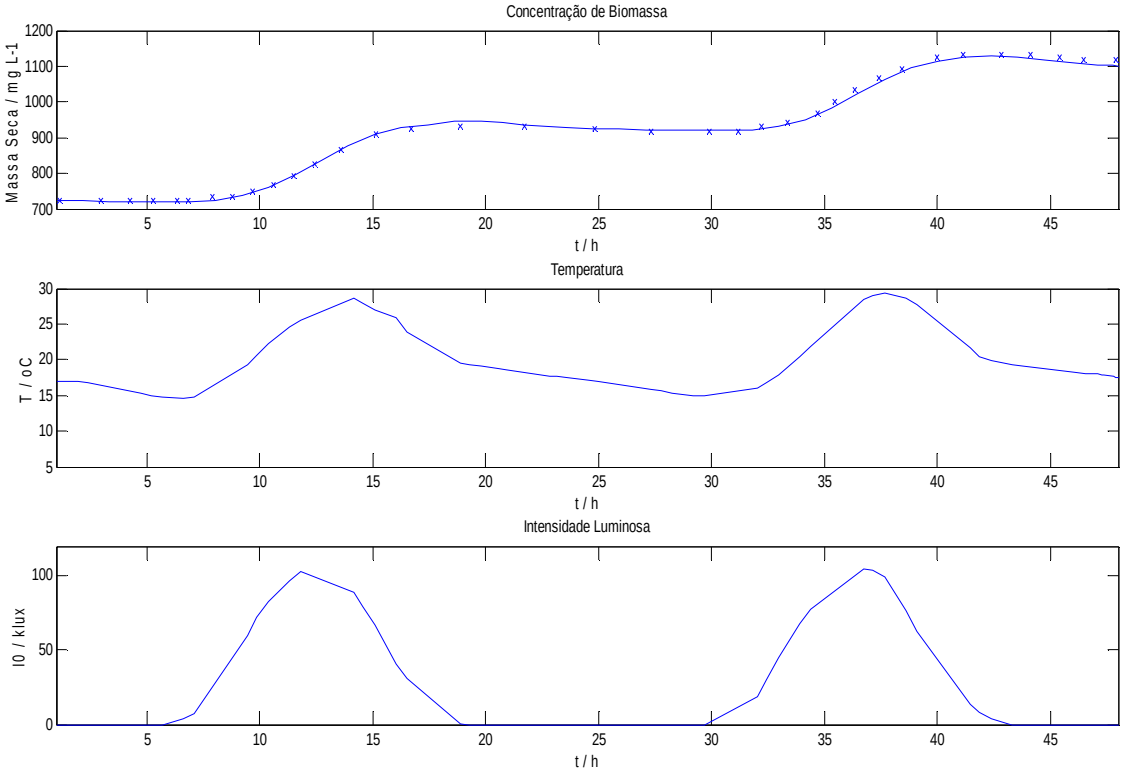


Figura 5.1 – Resultados de simulação (-) sobre dados experimentais (x) após ajuste de parâmetros

5.1.2 Influência dos parâmetros na produtividade do sistema

Utilizou-se, a seguir, o modelo para a determinação da influência dos principais parâmetros ambientais e de processo nas taxas de crescimento e produtividade do sistema. A Figura 5.2 mostra o efeito da concentração da biomassa na taxa de crescimento específico, em função da intensidade luminosa. O considerável decréscimo em μ_e para concentrações crescentes é conseqüência da atenuação luminosa pelo meio e está em acordo com valores observados experimentalmente por Vonshak et al. (1982), Qiang, Guterman e Richmond (1996) e Costa et al. (2000).

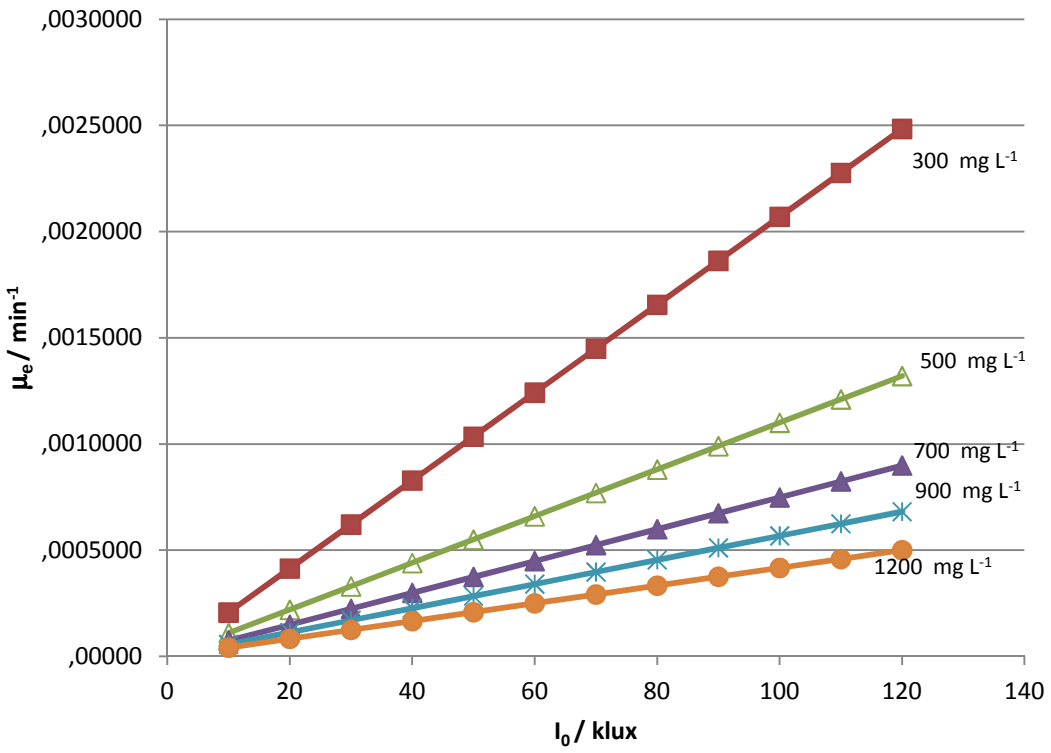


Figura 5.2 – Influência da concentração de biomassa e intensidade luminosa na taxa de crescimento fotossintético específico

A temperatura também tem um impacto importante na taxa de crescimento, afetando tanto a taxa de fotossíntese como a taxa de respiração nas zonas escuras do tanque. A Figura 5.3 mostra este efeito, de acordo com o modelo para *Spirulina platensis*. Comportamento semelhante foi reportado por Montagnes e Franklin (2001) para *Phaeodactylum tricornutum*.

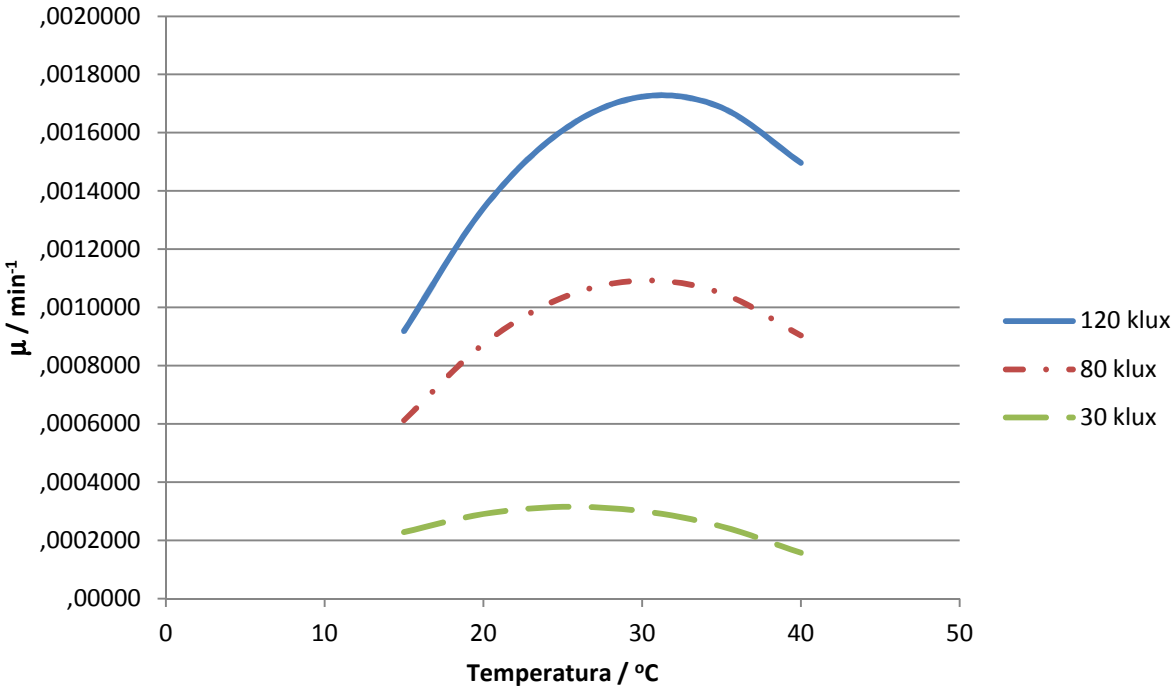


Figura 5.3 – Efeito da temperatura na taxa de crescimento, para diferentes valores de I_0

Para padronizar o efeito de parâmetros ambientais, foi utilizada uma série baseada na repetição dos valores médios das duas variáveis para o mês de janeiro para a região de Campinas, no Estado de São Paulo. Os valores de radiação solar foram obtidos no Atlas Solarimétrico do Brasil (GRUPO FAE, 1996) e as temperaturas médias obtidas no banco de dados do Centro Integrado de Informações Agrometereológicas do Estado de São Paulo (CIIAGRO, 2011). A Figura 5.4 sumariza a série utilizada nestas simulações.

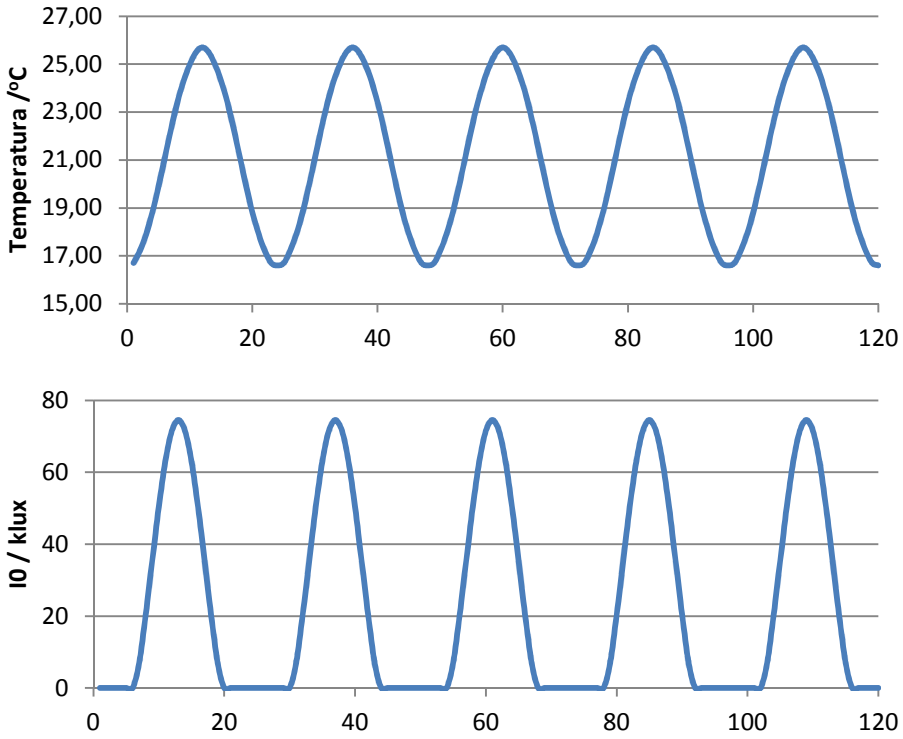


Figura 5.4 – Séries temporais de temperaturas e intensidades luminosas utilizadas nas simulações para determinação dos efeitos dos parâmetros de processo

A Figura 5.5 e a Figura 5.6 descrevem o efeito combinado da profundidade do tanque e concentrações iniciais de biomassa. Resultados semelhantes foram também observados para cultivo de *Isochrysis galbana* em tanques abertos por Sukenik et al. (1991). Profundidades menores permitem o melhor aproveitamento da luz no tanque, levando a produtividades elevadas para qualquer concentração de biomassa. Este efeito é utilizado em fotobiorreatores com densidades celulares ultra altas (QUIANG, 1996; QUIANG; ZARMI; RICHMOND, 1998; RICHMOND, 2004), mas não é viável em sistemas de tanques abertos pelas dificuldades na agitação do meio e desafios na construção, conforme será discutido na análise econômica. A baixa produtividade para maiores profundidades de tanque foi também validada em escala piloto em uma série de estudos patrocinados pelo Departamento de Energia Norte-Americano (SHEEHAN et al., 1998).

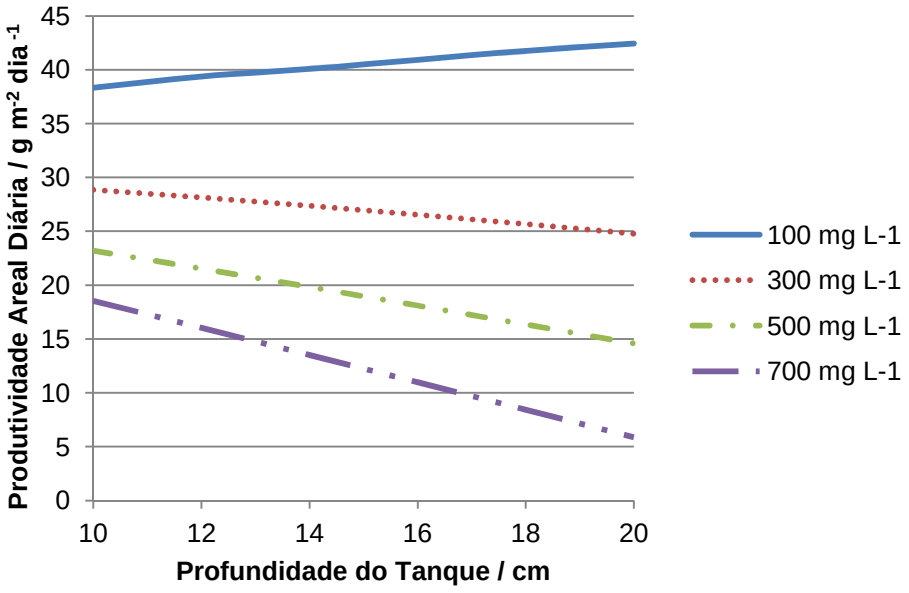


Figura 5.5 – Efeito da profundidade do tanque na produtividade para diferentes concentrações iniciais de biomassa

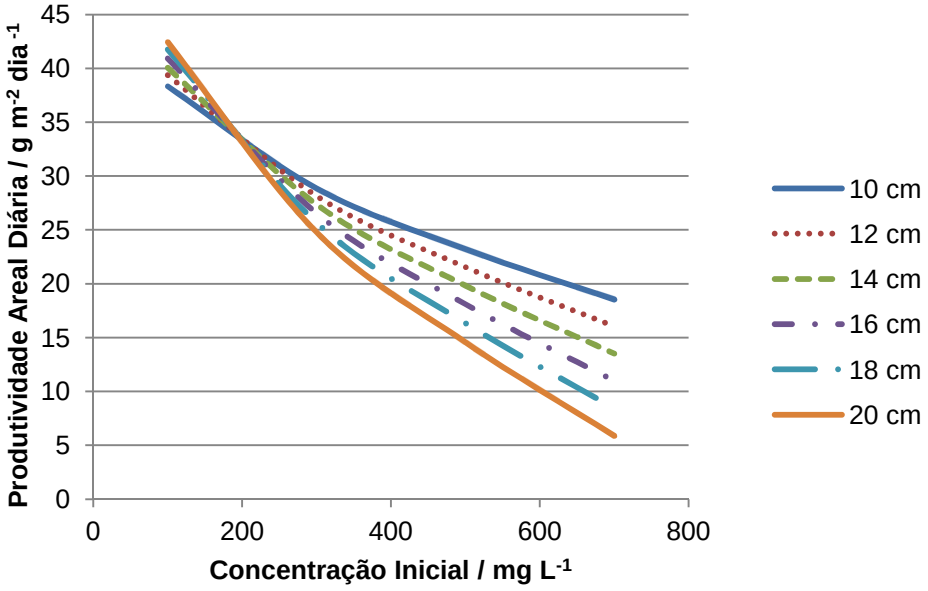


Figura 5.6 – Efeito da concentração inicial na produtividade areal diária

5.1.3 Variação da produtividade ao longo do ano

Os efeitos da temperatura e radiação solar nas taxas de crescimento implicam em uma oscilação ao longo do ano na produtividade do sistema, especialmente destacada em regiões com maiores diferenças entre estações. Este impacto foi exemplificado simulando-se a operação de um tanque com 15 cm de profundidade e concentração inicial de 400 mg L^{-1} situado na região de Campinas no Estado de São Paulo.

Utilizou-se para a simulação valores horários de radiação solar obtidos no Atlas Solarimétrico do Brasil (GRUPO FAE, 1996). As temperaturas horárias para cada mês foram aproximadas a partir da função cossenoidal (definida pela Equação 5-1), em que $T_{média}$, T_{max} e T_{min} são as temperaturas mensais médias, máximas e mínimas (SUKENIK et al., 1991).

$$T(t) = 0.9 \cdot \left[T_{media} - (T_{max} - T_{min}) \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{t}{24}\right)\right] \qquad \text{(Equação 5-1)}$$

A Figura 5.7 sumariza o comportamento diário médio da radiação solar e temperatura ao longo do ano.

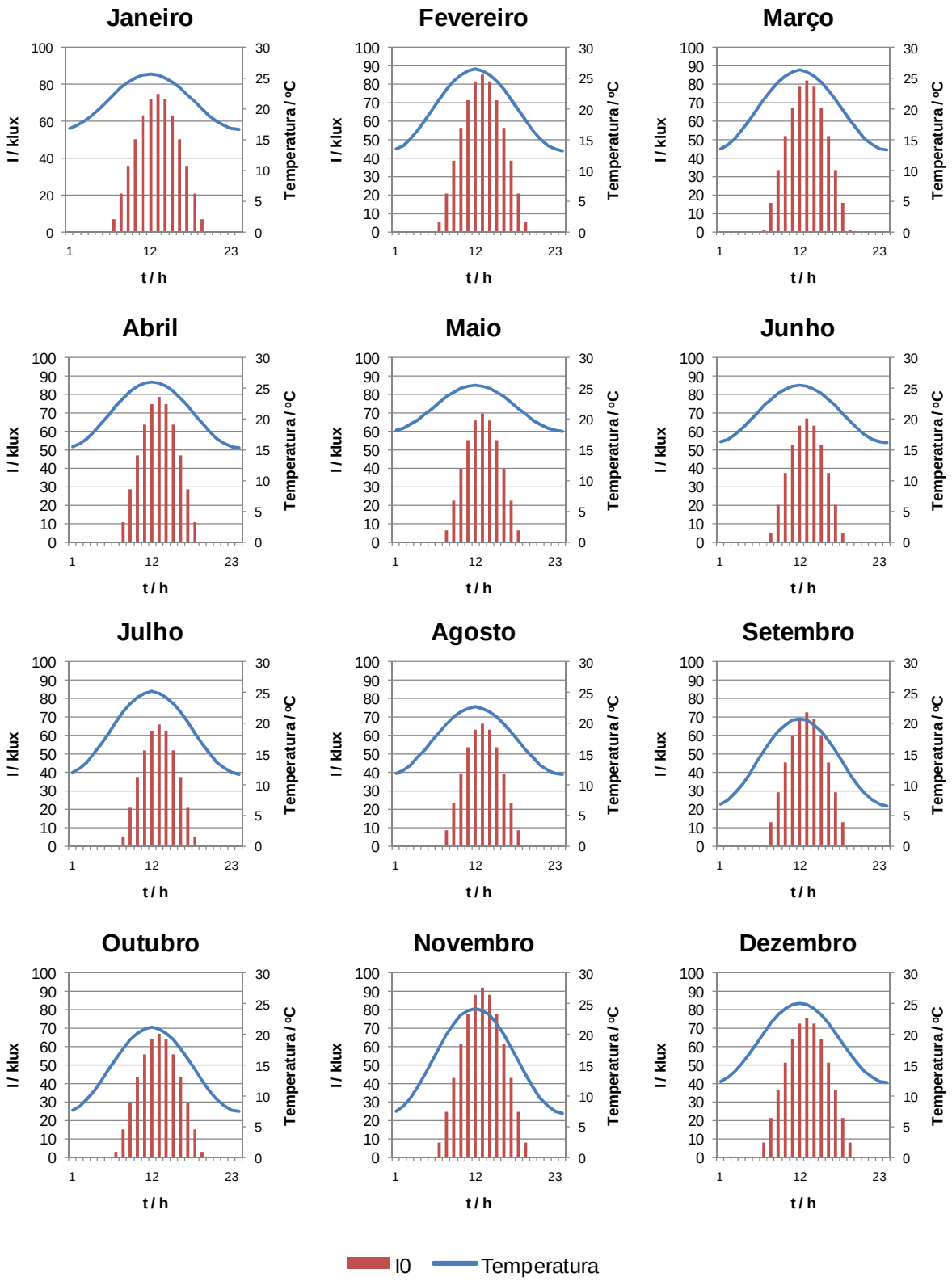


Figura 5.7 – Valores médios de temperatura e radiação solar para a região de Campinas ao longo do ano

A simulação forneceu produtividades entre 20 e 32 g m^{-2} dia^{-1}, coerente com valores demonstrados em escala piloto (SHEEHAN et al., 1998; STEPHENS et al., 2010). A influência da temperatura na respiração noturna e o impacto de dias nublados na radiação solar disponível na superfície são responsáveis por uma relação mais complexa do que altas produtividades no verão e baixas produtividades no inverno. A Figura 5.8 descreve a variação na produtividade ao longo do ano.

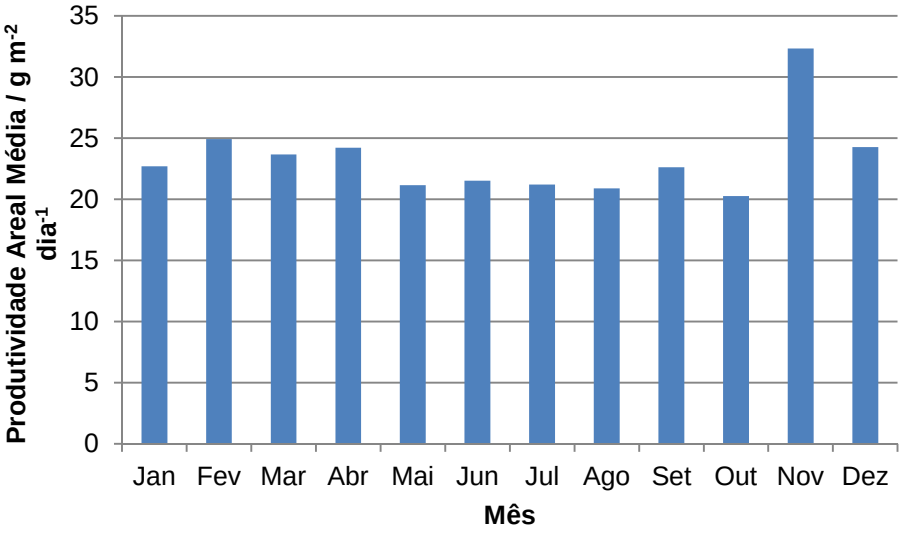


Figura 5.8 – Produtividade areal média ao longo do ano, simulada para tanque de cultura na região de Campinas

Para efeito de comparação, a Figura 5.9 mostra dados de produtividades máximas por mês para o cultivo de *Isochrysis galbana* em Eilat, Israel, que apresenta maiores variações de temperaturas ao longo do ano e tem o verão como a estação seca.

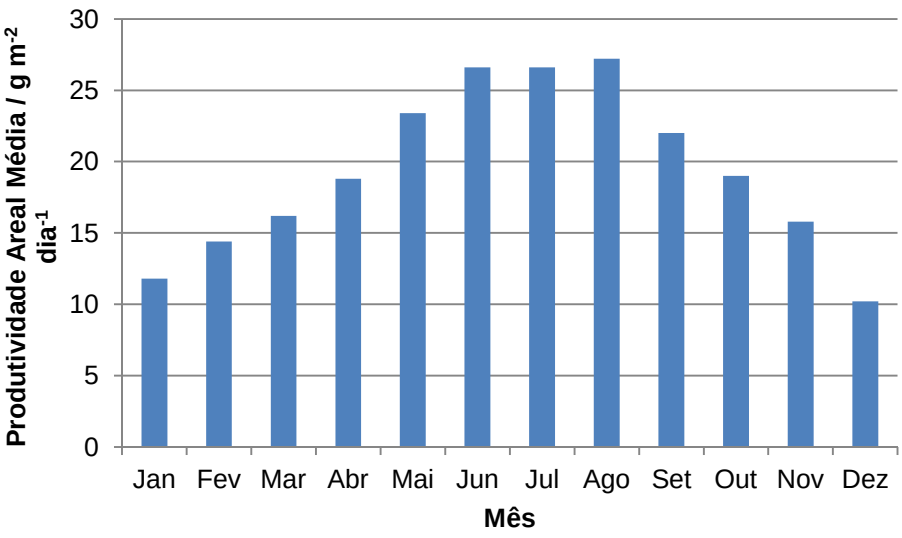


Figura 5.9 – Produtividade areal máxima ao longo do ano para cultivo de *Isochrysis galbana* em Eilat, Israel (SUKENIK et al. 1991)

5.1.4 Introdução de contaminação por predador no modelo

A inclusão de uma interação presa-predador no modelo, baseada em um único predador (zooplâncton) e uma única presa (a cianobactéria sendo cultivada) resultou em uma acentuada queda no crescimento em função da combinação entre o consumo da presa e a absorção de luz no tanque pelo organismo não fotossintetizante. A simulação com valores típicos de taxa de ataque (γ_1), eficiência de conversão (ε_1) e taxa de morte do predador (δ_z) para um sistema *Daphnia* – *Chlamudomonas reinhardii* mostrou diminuição na população da presa após 48h (Figura 5.10). A população do predador ultrapassou a população da presa em menos de 4 dias, demonstrando a importância de se evitar contaminação que comercialmente causaria não só uma diminuição na produção dos produtos de interesse, como também uma redução do potencial de absorção de CO_2, uma vez que a respiração torna-se predominante.

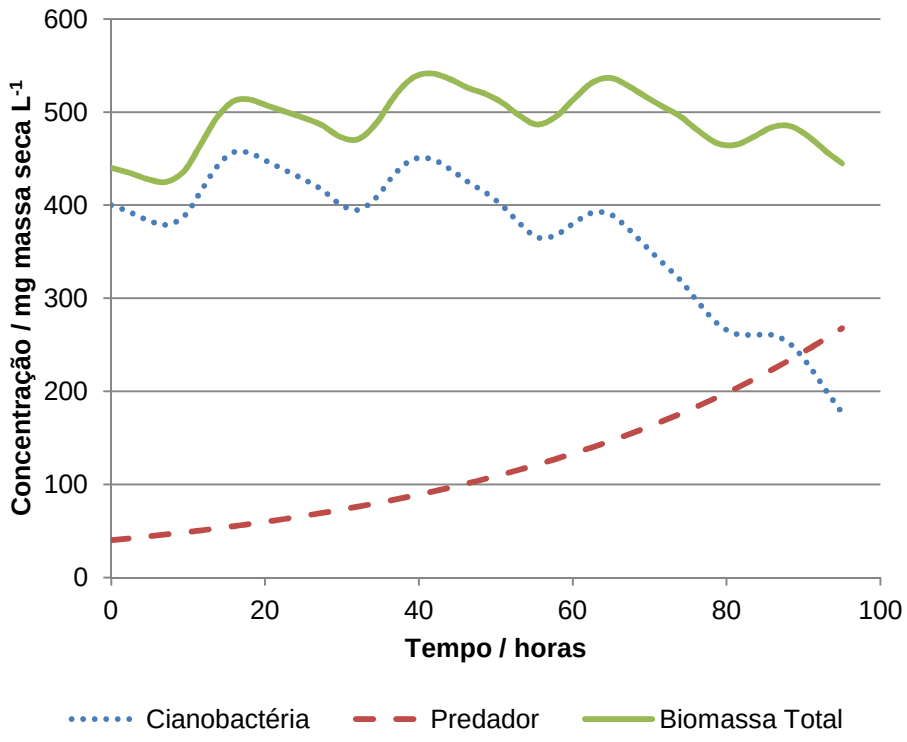


Figura 5.10 – Simulação do desenvolvimento de populações de presa e predador para uma contaminação inicial de 50 mg L^{-1}

Contaminações graves – por excesso de chuva ou meio de cultura contaminado, por exemplo – devem ser combatidas prontamente através da adição de biocidas, novo inóculo da espécie cultivada - no caso de contaminação por microalga ou cianobactéria competidora ou ainda descarga completa do tanque contaminado, desinfecção ou nova partida. A Figura 5.11 mostra o impacto na produtividade do tanque em função da intensidade da contaminação inicial.

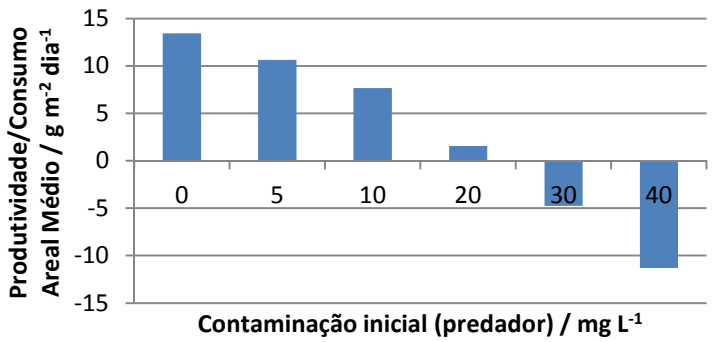


Figura 5.11 – Impacto da concentração de contaminação por predador na produtividade/consumo médio de cianobactéria no período de 5 dias

5.1.5 Otimização das condições de operação

Finalmente, utilizou-se o modelo para a determinação das condições ideais de operação, de forma a maximizar a produtividade areal média do sistema. Para a operação contínua em escala comercial, propõe-se a coleta periódica de parte do volume do tanque com conseqüente reposição com meio de cultura, conforme exemplificado na Figura 5.12. O impacto na taxa de crescimento é, portanto, influenciado pelos seguintes fatores:

- Operação do tanque a uma fração da capacidade volumétrica durante o período de coleta e reposição;
- Menores valores de H_t durante os períodos de coleta e reposição (ver seção 5.1.2);
- Diluição do meio de volta à concentração inicial (ver seção 5.1.2).

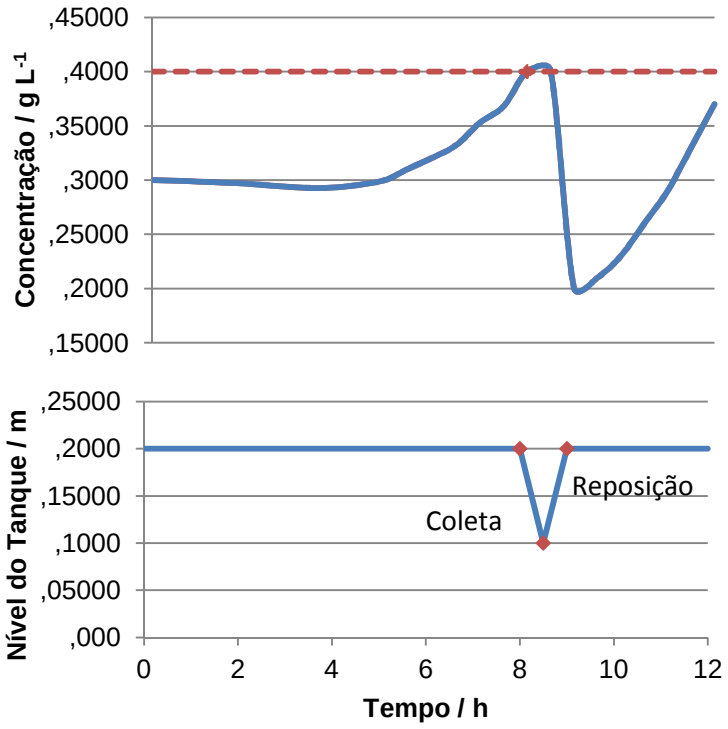


Figura 5.12 – Exemplo de ciclo de coleta e reposição e impacto na concentração e nível do tanque

Para a otimização das condições de operação e coleta, considerou-se como base de cálculo um tanque com área de 1.000 m^2 e profundidade de 0,2 m (volume inicial de 200 m^3) e a série baseada em temperatura e luminosidade médias para a região de Campinas, conforme descrito anteriormente.

Foram realizadas séries de simulações variando-se a concentração de coleta (C_{coleta}) de 0,4 a 1,0 g L^{-1} em intervalos de 0,1 g L^{-1} e a taxa de reposição (T_c, fração do volume coletado e reposto a cada ciclo de extração) de 0,2 a 0,7, em intervalos de 0,1. Cada simulação considerou o crescimento ao longo de cinco ciclos completos e levando em conta o tempo de coleta e reposição para uma vazão de bombeamento constante de 0,05 $m^3 s^{-1}$.

Ao término de cada simulação, a produtividade nas condições estudadas foi calculada conforme a Equação 5-2, onde t_5 representa o tempo total para cinco ciclos de coleta e V_t o volume do tanque. Os resultados estão resumidos na Tabela 5.2.

$$Produtividade = \sum_{i=1}^{5}(V_t \cdot T_c \cdot C_{coleta})/t_5 \qquad \text{(Equação 5-2)}$$

Tabela 5.2 - Valores de produtividade para um tanque com área de 1.000 m^2 e 0,20 m de profundidade, em kg dia^{-1}

Concentração para Coleta / g L^{-1}	**Taxa de Coleta / Reposição**					
	20%	**30%**	**40%**	**50%**	**50%**	**70%**
0,4	31,5	33,4	35,6	36,4	37,8	39,8
0,5	28,5	32,6	31,2	33,2	33,2	37,9
0,6	26,8	28,0	29,0	31,9	32,1	32,8
0,7	29,4	27,7	29,4	28,4	30,0	33,5
0,8	24,6	25,7	25,9	28,0	29,3	29,6
0,9	24,0	27,5	25,3	26,0	28,0	28,6
1,0	21,3	24,0	25,7	25,5	26,7	28,7

Os resultados sugerem que a operação e coleta a concentrações mais baixas, com altas taxas de coleta e reposição do meio de cultura levam a produtividades consideravelmente mais altas. Resultados semelhantes foram encontrados

utilizando-se a mesma equação para cálculo de produtividade para os resultados experimentais de cultivo semi-contínuo em laboratório, reportados por Reichert, Reinehr e Costa (2006), para duas cepas de *Spirulina platensis*, mostrados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Impacto de concentração para coleta e taxa de renovação na produtividade de *Spirulina platensis* em laboratório, a partir de dados de Reichert, Reinehr e Costa (2006)

Concentração para Blenda / g L^{-1}	**Taxa de Renovação / %**	**Cepa**	**Ciclos de Diluição**	**Taxa de Crescimento Específico Máximo / dia^{-1}**	**Produtividade de Biomassa / mg L^{-1} dia^{-1}**
0,50	25	Paracas	17	0,065	29,2
0,75	25	Paracas	10	0,050	34,3
0,50	50	Paracas	12	0,101	37,0
0,75	50	Paracas	7	0,070	36,4
0,50	25	LEB-52	22	0,095	42,3
0,75	25	LEB-52	10	0,052	33,2
0,50	50	LEB-52	13	0,111	41,7
0,75	50	LEB-52	8	0,073	41,6

As condições propostas (concentrações baixas e altas taxas de coleta) possuem atualmente inconvenientes como maior suscetibilidade a contaminações (em função das baixas concentrações do organismo de interesse no início do cultivo e maior quantidade de meio de cultura de reposição bombeado para o sistema) e maiores custos de bombeamento e separação. No entanto, microorganismos resistentes a contaminação, desenhos alternativos de tanques abertos de cultivo e avanços nos métodos de coleta e separação podem permitir no futuro a utilização desta janela de operação em escala comercial.

5.2 Balanços de massa

5.2.1 Definição do sistema de referência

A Tabela 5.4 descreve o sistema de referência com suas respectivas dimensões e os parâmetros utilizados como base para os balanços de massa e energia utilizados para a análise econômica e emergética do sistema. A produtividade utilizada é cerca de 50% da produtividade areal máxima prevista pelo modelo (GUTERMAN; VONSHAK; BEN-YAAKOV, 1989) e de uma ordem de grandeza já demonstrada em sistemas abertos em escala piloto (MOHEIMANI, 2005; SHEEHAN et al., 1998). Assumiu-se para o caso base o consumo de CO_2 proveniente de gás de queima.

Tabela 5.4 – Dimensões e parâmetros de operação para sistema de referência

	Unidade	Valor
Quantidade de tanques		63
Comprimento	m	632
Largura	m	127
Profundidade	m	0,4
Profundidade utilizada	m	0,3
Área	m^2	80.000
Volume	m^3	24.000
Área total	m^2	$5x10^6$
Área total	ha	500
Volume total	m^3	$1,5x10^6$
Produtividade	g dia^{-1} m^{-2}	25
% de óleo	%	25
Produção biomassa	ton dia^{-1}	125
Fixação teórica CO_2	ton dia^{-1}	220
Dias operação/ano	dia	330
Produção anual de biomassa	ton ano^{-1}	41.250
Fixação anual de CO_2	ton ano^{-1}	72.600

5.2.2 Balanço de água

A estimativa das perdas por evaporação, calculadas utilizando-se a Equação 4-13 para um tanque de 1,000 m^2, são resumidas na Tabela 5.5. Para a área considerada, perdas por evaporação calculadas pelo modelo podem chegar a 10-20 toneladas dia^{-1}, equivalente a 1-2 cm dia^{-1}, em acordo com os valores máximos observados por Stephens et al. (2010). Para o balanço de água nos tanques assumiu-se uma perda média de água de 0,4 cm dia^{-1} referente à diferença entre precipitação e evaporação. Para o sistema de referência, estes valores representam 6.600.000 ton de água por ano. Em função disso, o consumo de água na fotossíntese (21.503 ton ano^{-1}, ou 0.3% do consumo total) não foi incluído no balanço. Este consumo adicional de água é também suprido pelas fontes de nutrientes, uma vez que vários dos sais utilizados apresentam-se na sua forma hidratada.

Tabela 5.5 – Estimativa da taxa de evaporação de água nos tanques, em função de temperatura e velocidade do vento

Velocidade do vento na superfície / m s^{-1}	Temperatura / ^oC	Coeficiente de transferência de massa / cm s^{-1}	Pressão de vapor / mmHg	Taxa de evaporação / kg dia^{-1}	Taxa de evaporação / cm dia^{-1}
1,5	10	0,34	9,2	2.779	0,28
1,5	35	0,34	42,1	11.731	1,17
3	10	0,59	9,2	4.773	0,48
3	35	0,59	42,1	20.144	2,01

As perdas na coleta e secagem foram estimadas em 137.500 ton por ano considerando uma recuperação de 95% nas centrífugas, concentrando a biomassa a 22% de sólidos (MOLINA-GRIMA ET AL., 2003). Após a separação, o meio de cultura é reciclado para os tanques de cultivo, com reposição de nutrientes.

5.2.3 Balanços de CO_2 e nutrientes

Os balanços de CO_2 e nutrientes foram calculados com base na relação estequiométrica para fotossíntese definida por Cornet et al. (1992) para *Spirulina platensis* a partir da composição de biomassa ativa.

$$CO_2 + 0{,}724\ H_2O + 0{,}170\ HNO_3 + 0{,}007\ H_2SO_4 + 0{,}006\ H_3PO_4 \rightarrow CH_{1,650}O_{0,531}N_{0,170}S_{0,007}P_{0,006} \quad \text{(Equação 5-3)}$$

O balanço de nitrogênio a partir da equação 5.3 forneceu uma relação de 0,58 g de $NaNO_3$ por grama de biomassa, equivalente a 1,24 g da mistura de nutrientes do meio de Zarrouk adaptado (RAOOF et al., 2006) por grama de biomassa produzida. Para o sistema de referência, este fator representa o consumo de 51.560 ton de nutrientes por ano, demonstrando a importância de buscar fontes alternativas de nutrientes como efluentes domésticos e agroindustriais.

A equação 5-3 prevê um consumo de 1,76 gramas de CO_2 por grama de biomassa produzida, em concordância com o fator 1,8 genericamente proposto para fixação de CO_2 por microalgas e cianobactérias (FAO, 2009). Esta relação permitiu calcular o potencial de fixação total de CO_2 pelo sistema, mostrado anteriormente na Tabela 5.4.

Para efeito de comparação, a Tabela 5.6 mostra as emissões estimadas para uma usina termoelétrica de 200MW em função do combustível utilizado. O sistema proposto, totalizando 500 hectares, seria capaz de mitigar quase 28% das emissões de uma usina movida a gás natural.

Tabela 5.6 – Emissões estimadas de para uma usina termoelétrica de 200MW

Combustível	**Taxa de emissão/ ton CO_2 kWh^{-1}** (EIA, 2010)	**Emissões da usina/ ton CO_2 ano^{-1}**
Carvão betuminoso	$3{,}18 \times 10^{-4}$	$4{,}58 \times 10^{5}$
Gás Natural	$1{,}81 \times 10^{-4}$	$2{,}61 \times 10^{5}$
Resíduo Sólido Urbano	$1{,}81 \times 10^{-4}$	$2{,}05 \times 10^{5}$
Óleo Combustível	1,81 x10-^{4}	$3{,}60 \times 10^{5}$

5.2.4 Balanço Geral do Sistema

Considerando-se todas as saídas, reciclos e conversões para a totalidade do sistema (cultivo, coleta, secagem, extração, recuperação de solvente e acabamento do produto) obtêm-se o balanço geral mostrado na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Balanço geral do sistema

Entradas / ton ano^{-1}		**Saídas / ton ano^{-1}**	
CO_2	72.600	O_2	72.869
Água	6.729.473	Água (Evaporação)	6.739.448
Nutrientes	51.556	Biomassa (4,7% água, 1,8% nutrientes residuais)	31.551
Hexano	2.063	Hexano	2.063
		Óleo algal	9.699

Os detalhes do balanço de massa para cada etapa do processo estão disponíveis no Apêndice 2.

5.2.5 Consumo de Energia

A Figura 5.13 mostra o consumo de energia elétrica para sistema de referência, totalizando 59.570 MWh por ano^{-1}, ou 120.000 kWh ha^{-1} ano^{-1}, dos quais 65% estão relacionados com a operação de centrífugas e 16% com o bombeamento do gás de queima. O consumo de gás natural nas etapas de secagem, extração e acabamento é descrito na Figura 5.14 e totaliza 14,5 milhões de metros cúbicos por ano, quase 90% relacionados à secagem da biomassa. Como se verá a seguir, a demanda energética do processo tem considerável impacto nos resultados econômicos e índices de sustentabilidade do sistema. Os cálculos de consumo estão apresentados em detalhes no Apêndice 2.

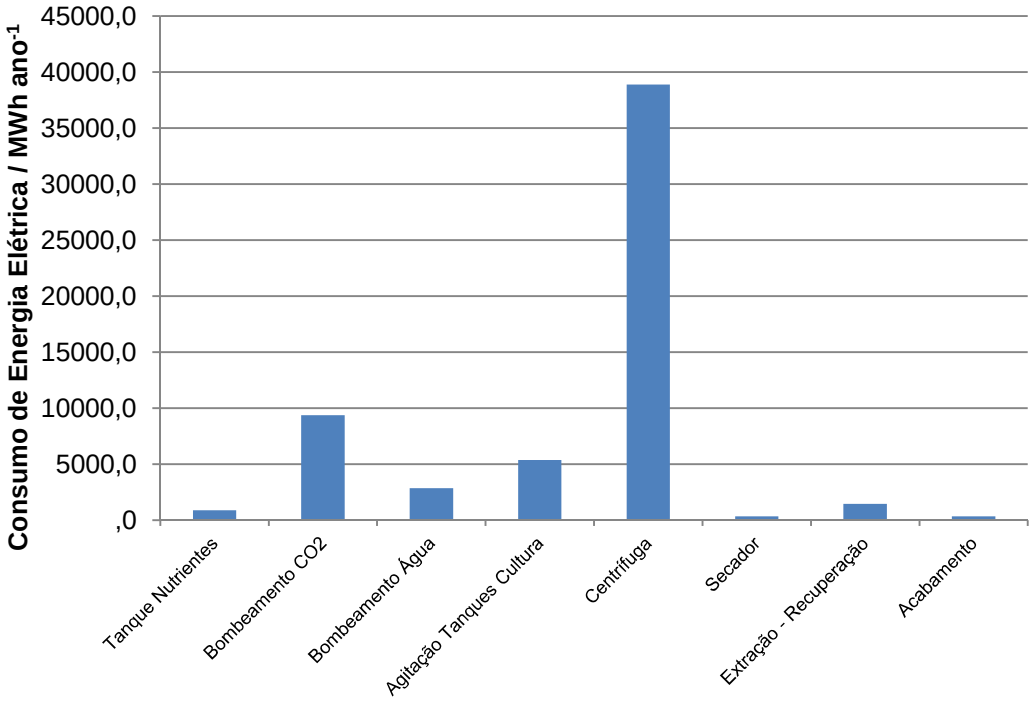


Figura 5.13 – Consumo de energia elétrica por etapa do processo para o sistema de referência

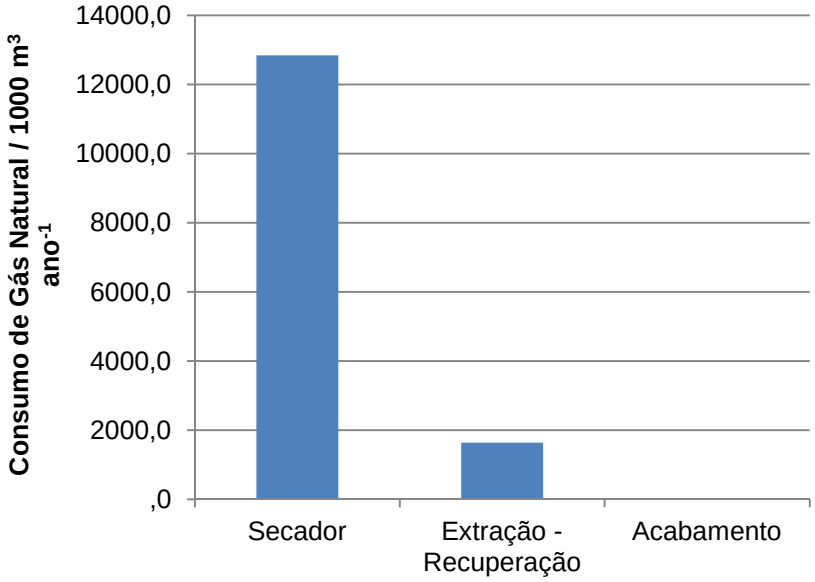


Figura 5.14 – Consumo de gás natural por etapa do processo para o sistema de referência

5.3 Análise econômica do processo

5.3.1 Modelo econômico simplificado

A análise de sensibilidade inicial para o modelo econômico do sistema foi baseada em estimativas de custos obtidas na literatura (STEPHENS et al., 2010, BENEMANN; OSWALD, 1996). Para o sistema de referência, este modelo fornece um custo de capital total de aproximadamente US$97 milhões (equivalente a US$193.725 por hectare) e custos operacionais de US$13 milhões por ano, excluindo depreciação. As receitas totais, com a venda do óleo e biomassa algais, totalizam US$22,3 milhões por ano.

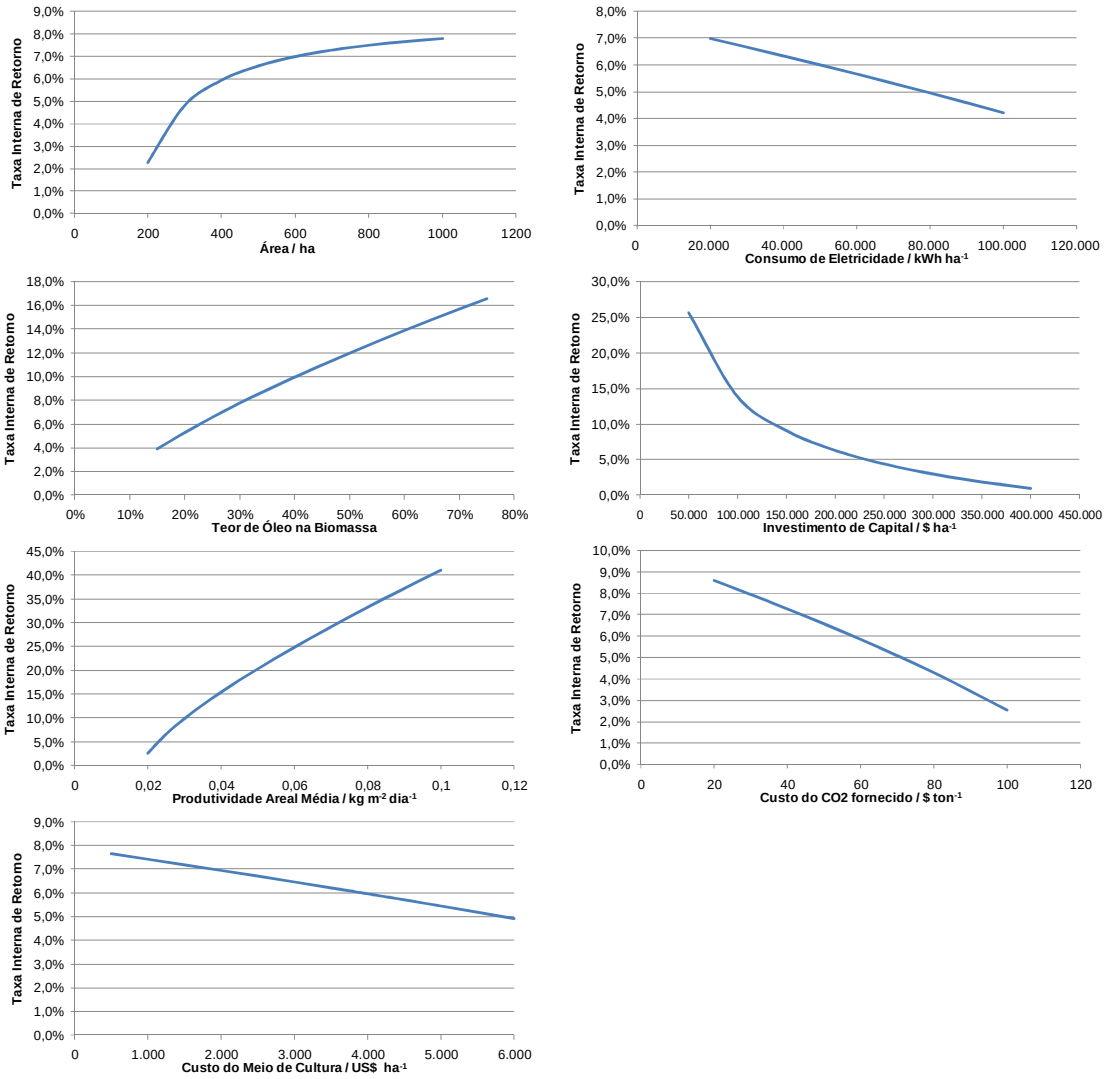


Figura 5.15 – Análise de sensibilidade para o modelo econômico simplificado

A Figura 5.15 mostra o impacto da área total, consumo de eletricidade, teor de óleo na biomassa, investimento de capital, produtividade areal média, custo do CO_2

entregue e custo do meio de cultura na taxa interna de retorno do projeto. Observa-se que a partir de uma capacidade mínima, não há benefícios de economia de escala para este tipo de projeto (exceto para alguns equipamentos na extração, recuperação de solvente e acabamento), uma vez que aumentos de capacidade implicam em maior número de tanques e centrífugas, aumentando linearmente custos de capital e operação.

A Figura 5.16 sumariza os efeitos normalizados dos fatores estudados. Os valores refletem a razão entre a variação percentual na taxa interna de retorno e a variação percentual do parâmetro na faixa estudada. Observa-se que capital, produtividade areal e teor de óleo são as variáveis mais importantes, o que destaca a importância de desenvolvimento em equipamentos, seleção ou modificação de microorganismos e otimização de condições de operação.

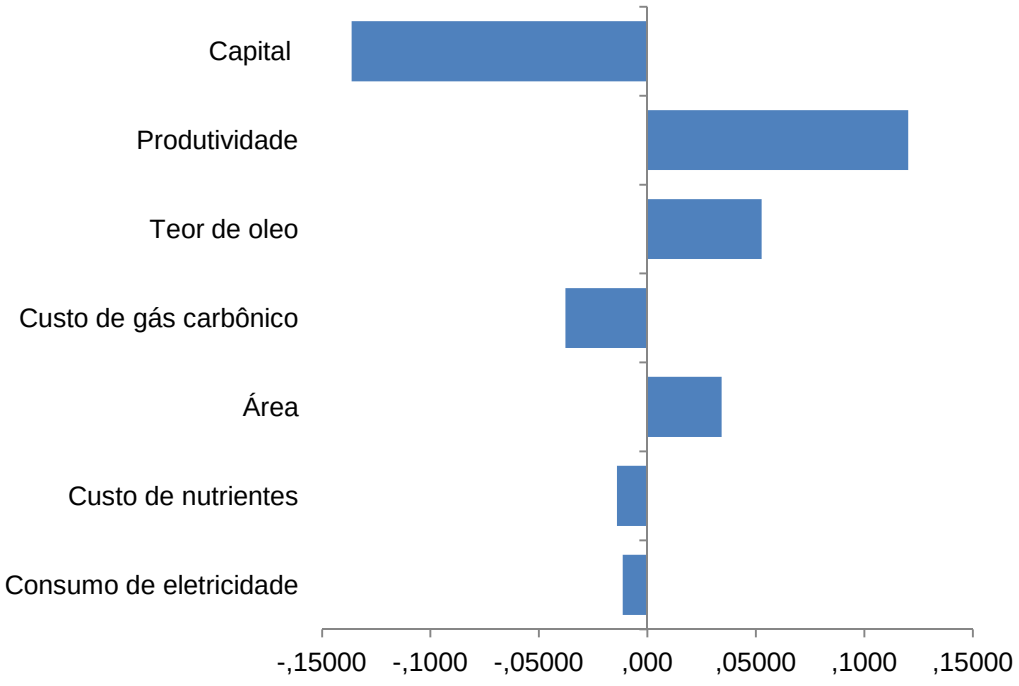


Figura 5.16 – Efeitos normalizados dos fatores na taxa interna de retorno do projeto

5.3.2 Detalhamento de custos de capital

A determinação dos custos de capital a partir de cotações (atualizadas em junho de 2011) e estimativas de custo de equipamento utilizando os diagramas e equações recomendados por Peters, Timmerhaus e West (2003) permitiu detalhar o impacto de cada uma das etapas e equipamentos no investimento total. A construção dos tanques de cultivo e a compra das centrífugas representam 27% do total. É importante destacar o impacto dos custos extras de projeto (instalação, instrumentação, elétrica, estrutura de serviços, etc), freqüentemente negligenciados ou subestimados em análises anteriores e que representam quase 65% do investimento total.

Tabela 5.8 – Detalhamento do investimento de capital para o sistema de referência

Item	Custo / US$ 10^6	% Total
Tanques de cultivo	14,61	14%
Centrífugas	13,35	13%
Secador	0,40	0,4%
Extração e Recuperação	1,16	1%
Armazenagem	5,78	6%
Terreno	1,35	1%
Instalação	8,07	8%
Instrumentação e Controle	5,38	5%
Tubulação	6,41	6%
Elétrica	2,07	2%
Prédios	6,00	6%
Pátio	2,48	2%
Estrutura de serviços	11,38	11%
Engenharia e Supervisão	6,62	6%
Despesas de Construção	7,04	7%
Empreiteiro	3,93	4%
Contingência	7,66	7%
Total	103,70	

Para a escala de 500 hectares de produção (terreno total de 600 hectares), foi obtido um custo de capital de US$ 207.000 ha^{-1}. Este valor é consideravelmente mais alto do que as estimativas de Benemann e Oswald (1996) para um sistema de 400 hectares (US$96.600-US$143.500 ha^{-1} em valores atualizados), em função da utilização de fatores mais otimistas por aqueles autores para o cálculo dos custos adicionais (instalação, instrumentação, estrutura, construção, etc.). Moheimani

(2005) calculou o custo de capital total para uma planta de 59,7 ha para cultivo de microalgas cocolitoforídeas em US$19,5 milhões, equivalente a US$326.100 ha^{-1}. Para esta mesma escala o modelo econômico desenvolvido neste trabalho para *Spirulina platensis* prevê um custo de capital de US$330.000 ha^{-1}.

5.3.3 Custo de operação e Receitas

Os custos de operação detalhados para o sistema de referência a partir dos balanços de massa e energia, cotações (atualizadas em maio-junho de 2010) e relatórios de preços de mercado totalizaram US$42,3 milhões por ano (US$ 84.600 ha^{-1}). A Tabela 5.9 mostra o impacto de cada item. Os gastos com nutrientes (ainda que utilizando um meio adaptado de baixo custo, baseado em fertilizantes agrícolas), o custo de energia, fornecimento de CO_2 (estimado em US$50 ton^{-1} para compressão e transporte do gás de queima) e o custo de manutenção (calculado como 6% do capital total), são predominantes.

Tabela 5.9 – Custos de operação para sistema de referência

Item	Custo / US$ 10^6 ano^{-1}	% Total
CO_2	3,63	9%
Nutrientes	12,52	30%
Hexano	2,36	6%
Água	0,48	1%
Energia Elétrica	3,98	9%
Gás Natural	2,25	5%
Mão-de-obra	1,21	3%
Manutenção	6,22	15%
Impostos e Seguros	3,11	7%
Outros	6,53	15%
Total	42,29	

Para o sistema de referência, as receitas dependem exclusivamente da venda de *commodities*: o óleo – cotado ao preço de óleo de soja para efeito de comparação em aplicações químicas ou de biocombustíveis – e da biomassa residual – cotada ao preço de farelo de soja. Neste cenário, a receita total é de US$ 24,4 milhões por ano, sendo que US$12,18 milhões provenientes do óleo e US$12,25 milhões da biomassa. Não foi considerado o potencial de venda de créditos de carbono neste caso.

5.3.4 Cenários alternativos e impacto de inovações

Dados os elevados custos de capital e operação, o sistema de referência apresentou um valor presente líquido de US$170 milhões negativos, sem expectativa de retorno do investimento ao longo dos 25 anos de vida do projeto. A partir destes resultados, foram propostos 10 cenários alternativos para estudar o impacto de avanços tecnológicos, integração e diferentes modelos de negócio nos resultados do projeto. A Tabela 5.10 descreve os cenários alternativos propostos e as hipóteses utilizadas na modificação do modelo. Exceto pelos itens identificados, todos os demais parâmetros de processo seguem iguais aos do sistema de referência descrito na Tabela 5.4.

Tabela 5.10 – Descrição dos cenários alternativos estudados

Cenário	Descrição e hipóteses
Especialidade 1	75% do Óleo produzido vendido como especialidade para indústria química (C8-C14) a US$ 1.700 ton^{-1}. Investimento 50% mais alto para a etapa de separação
Especialidade 2	0,2% da biomassa algal é vendida como produto de alto valor agregado a US$ 600 kg^{-1} (CARDOZO et al., 2007, STEPHENS et al., 2010). Investimento 100% mais alto para a etapa de separação
Integração com usina de cana-de-açúcar	Preço da Terra 8x maior. 50% vinhaça utilizada como nutriente sem impacto na produtividade ou composição (OUROFINO, 2008). CO_2 puro recebido das dornas de fermentação, sem custo. Custo de vinhaça baseado em equivalente em nutrientes. Custo de energia elétrica e vapor baseado no valor potencial de venda pela usina para a rede de distribuição. Cálculos detalhados no apêndice
Alta produtividade	Produtividade areal média de 60 g m^{-2} dia^{-1}
Alto teor de óleo	75% lipídeos na biomassa
Capital reduzido	25% de redução no custo de capital
Eficiência Energética 1	25% de redução no consumo de energia
Eficiência Energética 2	50% de redução no consumo de energia
Créditos de Carbono	Créditos de US$10 ton^{-1} CO_2 fixado
Floculação	Adiciona tanques de floculação antes da centrífuga para concentração do caldo. Apenas 33% do volume total coletado precisa ser centrifugado (SAZDANOFF, 2006)
Nutrientes alternativos	Uso de água marinha, efluentes domésticos ou agroindustriais na composição do meio de cultura. Custo resultante de US$60 ton^{-1} nutriente

O potencial de fixação de CO_2, a receita total, os custos de capital e operação, a taxa interna de retorno (quando aplicável) e o valor presente líquido para cada um dos cenários simulados são mostrados na Tabela 5.11. Apenas o cenário Especialidade 2 apresentou um valor presente líquido positivo com taxa interna de retorno superior a 15%, destacando a importância da produção paralela de materiais de alto valor agregado (aplicações farmacêuticas ou alimentícias) para a viabilidade econômica do projeto. O sistema com alta produtividade paradoxalmente apresentou os piores resultados, uma vez que os elevados custos de capital com separação e extração e gastos com energia e nutrientes anularam a maior produção de biomassa por tanque. Várias melhorias propostas, no entanto, tiveram um impacto positivo no modelo econômico, ainda que insuficiente para isoladamente tornar o projeto viável, como por exemplo, o cultivo de microorganismos com alto teor de lipídeos e os esforços para redução de investimento de capital e gastos com energia e nutrientes.

Tabela 5.11 – Resultados da análise econômica para os cenários alternativos

Cenário	**Potencial de fixação de CO_2 / ton ano^{-1}**	**Receita total / US$10^6**	**Custo de Capital / US$10^6**	**Custo de Operação / US$10^6**	**Taxa Interna de Retorno**	**Valor Presente Líquido US$10^6**
Base	72.600	24,4	103,7	42,3	-	-170
Especialidade 1	72.600	26,3	106,1	42,7	-	-164
Especialidade 2	72.600	71,5	108,6	44,8	18%	63
Integração com usina de cana-de-açúcar	72.600	24,4	109,2	32,6	-	-122
Alta produtividade	174.240	58,6	215,9	91,7	-	-332
Alto teor de óleo	72.600	41,3	109,1	43,7	-	-92
Capital reduzido	72.600	24,4	77,8	42,3	-	-151
Eficiência Energética 1	72.600	24,4	103,7	40,7	-	-162
Eficiência Energética 2	72.600	24,4	103,7	39,2	-	-153
Créditos de Carbono	72.600	25,2	103,7	42,3	-	-166
Floculação	72.600	24,4	57,7	27,0	-	-55
Nutrientes alternativos	72.600	24,4	103,7	32,9	-	-120

Com base nestes resultados, foi proposto um sistema modelo baseado na produção de especialidades de alto valor agregado, uso de pré-floculação e redução

de 25% no consumo de energia. Optou-se por não utilizar fontes alternativas de nutrientes neste modelo para minimizar a contaminação dos produtos. Os resultados da simulação são apresentados na Tabela 5.12 e mostram valores extremamente promissores para a taxa interna de retorno e valor presente líquido do projeto.

Tabela 5.12 – Resultados econômicos para o sistema modelo proposto

Potencial de fixação de CO_2 / ton ano^{-1}	72.600
Receita total / US$10^6	73,9
Custo de Capital / US$10^6	62,6
Custo de Operação / US$10^6	29,6
Taxa Interna de Retorno	44%
Valor Presente Líquido US$10^6	$191

Embora a venda de metabólitos de alto valor agregado mostre-se essencial para a viabilidade econômica do projeto com base no estado atual da tecnologia, no longo prazo projetos exclusivos para especialidades ou *commodities* devem ser preferíveis (STEPHENS et al, 2010), dadas as diferenças de escala, mercado e especificações de produto.

5.4 Análise Emergética

5.4.1 Análise do Sistema de Referência

O sistema considerado para a análise emergética do caso base está sumarizado na Figura 5.17, na qual sol, chuva, calor geotérmico e água de reposição são as contribuições de recursos naturais renováveis (R); nutrientes, concreto, ferro, hexano, eletricidade e gás natural representam materiais e combustíveis comprados (M) e o trabalho humano e demais gastos representam serviços (S). O sistema não apresenta consumo de recursos não-renováveis da natureza (N) (BASTIANONI et. Al, 2008).

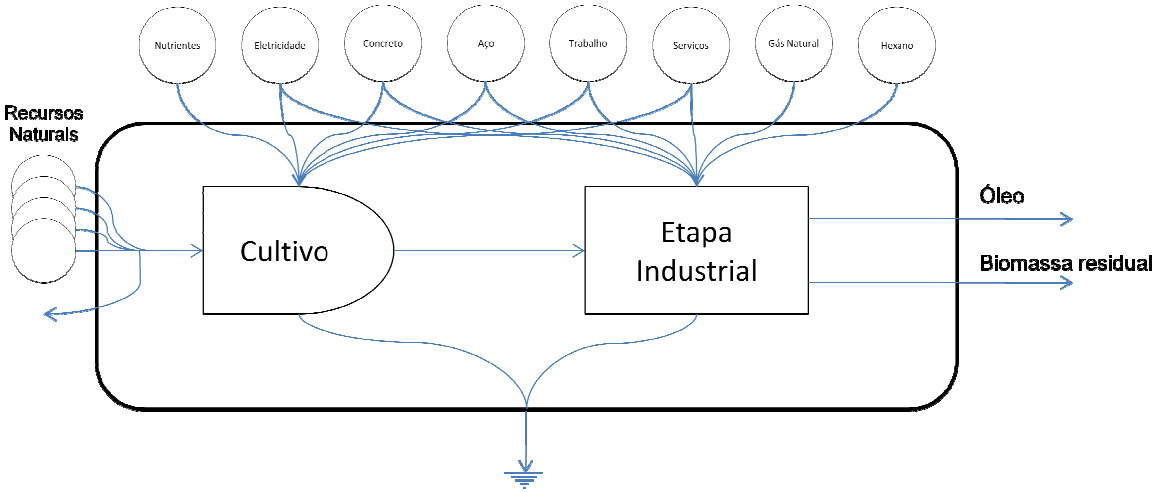


Figura 5.17 – Diagrama emergético para o sistema.

A Tabela 5.13 mostra a planilha de contabilidade emergética para o sistema de referência. O memorial de cálculo demonstrando as estimativas das entradas, incluindo notas e referências para os valores de transformidades empregados é apresentado no Apêndice 3. A transformidade conjunta do sistema, considerando o teor energético dos dois produtos (BASTIANONI; MARCHETINI, 2000), foi calculada em 1,32 x 10^5 sej J^{-1}, coerente com valores encontrados para a produção de óleos vegetais – 2,78 x 10^5 sej J^{-1} para óleo de girassol (BASTIANONI et al., 2008) e 3,51 x 10^5 sej J^{-1} para óleo de soja (CAVALETT; ORTEGA, 2009). A considerável

diferença em relação a transformidade encontrada por Bastianoni e Marchetini (2009) para óleo de macroalgas extraídas da Lagoa Orbetello ($2,64x10^7$ sej J^{-1}) é explicada pela baixa produtividade areal daquele sistema (41,1 kg óleo ha^{-1} ano^{-1} versus 19.400 kg óleo ha^{-1} ano^{-1} para o sistema estudado), mesmo considerando o maior investimento de recursos para o cultivo em tanques.

Tabela 5.13 – Planilha de contabilidade emergética para o sistema de referência

Notas	Item	Unidade	Quantidade / (unidade ano^{-1})	Emergia Solar / (sej $unidade^{-1}$)	Emergia Solar / (sej ano^{-1})	% Total
	Recursos Naturais Renováveis					
1	Sol	J	2,59E+16	1,00E+00	2,59E+16	0,0%
2	Chuva	kg	5,31E+09	1,51E+08	8,02E+17	0,7%
3	Calor geotérmico	J	1,50E+13	1,01E+04	1,52E+17	0,1%
4	Água (Reposição)	kg	6,73E+09	1,25E+09	8,41E+18	7,4%
	Recursos Não-renováveis					
	Materiais					
6	Nutrientes-Nitrogênio	kg	3,98E+06	2,41E+10	9,59E+16	0,1%
7	Nutrientes-Fósforo	kg	8,43E+05	1,13E+10	9,53E+15	0,0%
8	Concreto	kg	4,89E+05	9,26E+10	4,53E+16	0,0%
9	Ferro - Construção	kg	7,14E+03	1,13E+13	8,06E+16	0,1%
10	Aço - Tanques e Equipamentos	kg	6,24E+04	1,13E+13	7,05E+17	0,6%
11	Hexano	kg	2,06E+06	6,08E+12	1,25E+19	11,0%
12	Eletricidade	J	2,14E+14	2,00E+05	4,29E+19	37,7%
13	Gás natural	J	5,66E+14	4,35E+04	2,46E+19	21,7%
	Serviços					
14	Trabalho humano	J	1,33E+10	1,24E+07	1,65E+17	0,1%
15	Construção	$	1,55E+06	1,10E+12	1,70E+18	1,5%
16	Serviços e externalidades	$	1,64E+07	1,10E+12	1,80E+19	15,8%
17	Impostos, Taxas	$	3,11E+06	1,10E+12	3,42E+18	3,0%
	Total do Processo				**1,14E+20**	
	Produtos e subprodutos					
	Biomassa	kg	3,16E+07			
18	Biomassa	J	5,36E+14			
	Óleo algal	kg	9,70E+06			
19	Óleo algal	J	3,25E+14			

A Tabela 5.14 resume os resultados da análise dos índices emergéticos para o caso base. A fração renovável no fluxo total de emergia é de 8,3% e a razão de produção emergética (EYR), a razão de carga ambiental (ELR) são compatíveis com valores encontrados para tipos de biocombustíveis cujo processo de produção demanda grandes quantidades de energia, como a produção de etanol a partir de uvas na Itália (EYR = 1,22 e ELR=13,63) (BASTIANONI; MARCHETINI, 1996). O índice de sustentabilidade emergética (ESI) é inferior a referências para biocombustíveis (0,3-0,5) (BASTIANONI; MARCHETINI, 1996, FELIX; TILEY, 2009) ou óleos vegetais - ESI=0,99 para óleo de soja, segundo cálculo de Cavalett e Ortega (2009). A elevada carga ambiental do processo é função do elevado investimento de energia, materiais e serviços e foi observada também na produção de biocombustíveis derivados da palma (GOH; LEE, 2010).

Tabela 5.14 – Contribuições e índices emergéticos para o sistema de referência

Índice	Valor	Unidade
Y	1,14E+20	sej ano^{-1}
Ep	8,61E+14	J ano^{-1}
Tr	1,32E+05	sej J^{-1}
Tr	2,76E+12	sej kg^{-1}
R (Naturais renováveis)	9,39E+18	sej ano^{-1}
N (Naturais não-renováveis)	0,00E+00	sej ano^{-1}
M (Materiais)	8,10E+19	sej ano^{-1}
S (Serviços)	2,33E+19	sej ano^{-1}
I (Recursos da natureza)	9,39E+18	sej ano^{-1}
F (Recursos da economia)	1,04E+20	sej ano^{-1}
Receita	2,44E+07	$
% Renováveis	8,3%	
EYR	1,09	
EIR	11,10	
ELR	11,10	
ESI	0,10	
EER	4,23	

Considerando-se apenas a etapa de cultivo, o percentual renovável é de 30,5% e os índices de rendimento e carga ambiental tornam-se mais favoráveis, coerentes com valores típicos encontrados para sistemas agrícolas.

Tabela 5.15 – Contribuições e índices emergéticos considerando-se somente a etapa de cultivo

Índice	Valor	Unidade
Y	3,03E+19	sej ano^{-1}
Ep	8,71E+14	J ano^{-1}
Tr	3,48E+04	sej J^{-1}
Tr	7,35E+11	sej kg^{-1}
R (Naturais renováveis)	9,23E+18	sej ano^{-1}
N (Naturais não-renováveis)	0,00E+00	sej ano^{-1}
M (Materiais)	1,36E+19	sej ano^{-1}
S (Serviços)	7,52E+18	sej ano^{-1}
I (Recursos da natureza)	9,23E+18	sej ano^{-1}
F (Recursos da economia)	2,11E+19	sej ano^{-1}
% Renováveis	30,5%	
EYR	1,44	
EIR	2,28	
ELR	2,28	
SI	0,63	

A Figura 5.18 mostra a distribuição da demanda emergética do processo por tipo de fluxo, em função da etapa do processo, destacando a predominância dos fluxos de materiais e serviços.

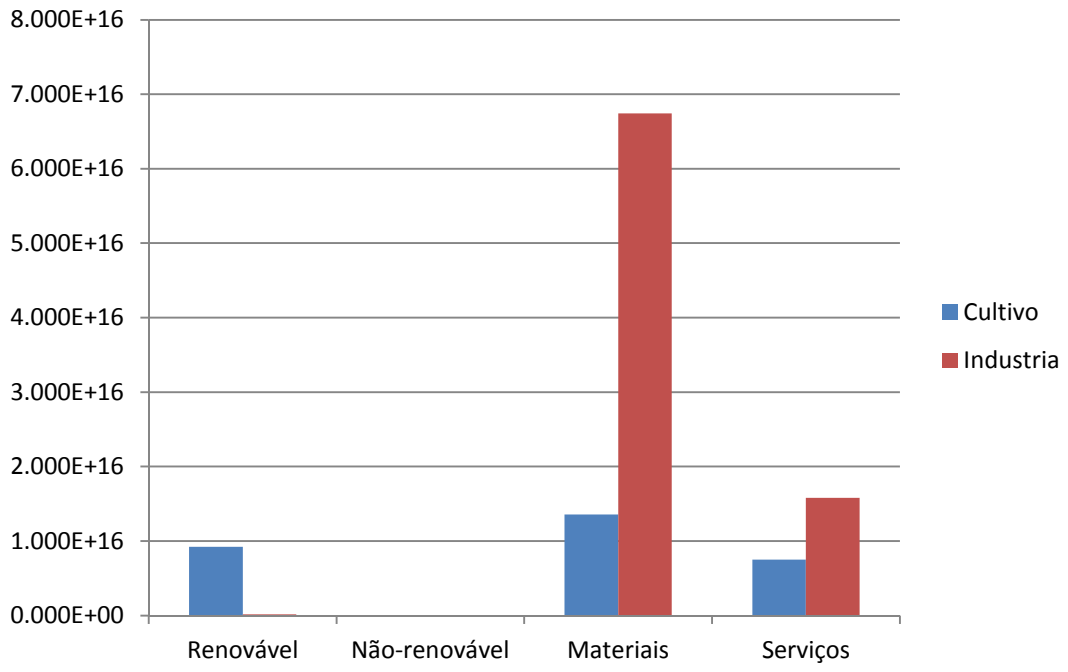


Figura 5.18 – Fluxos emergéticos para o sistema de referência, por etapa do processo

5.4.2 Análise de sensibilidade

Preliminarmente à análise dos cenários alternativos, foi estudado o impacto de algumas das variáveis de projeto e operação nos valores de transformidade (Tr) e do índice de sustentabilidade emergética (ESI) do processo.

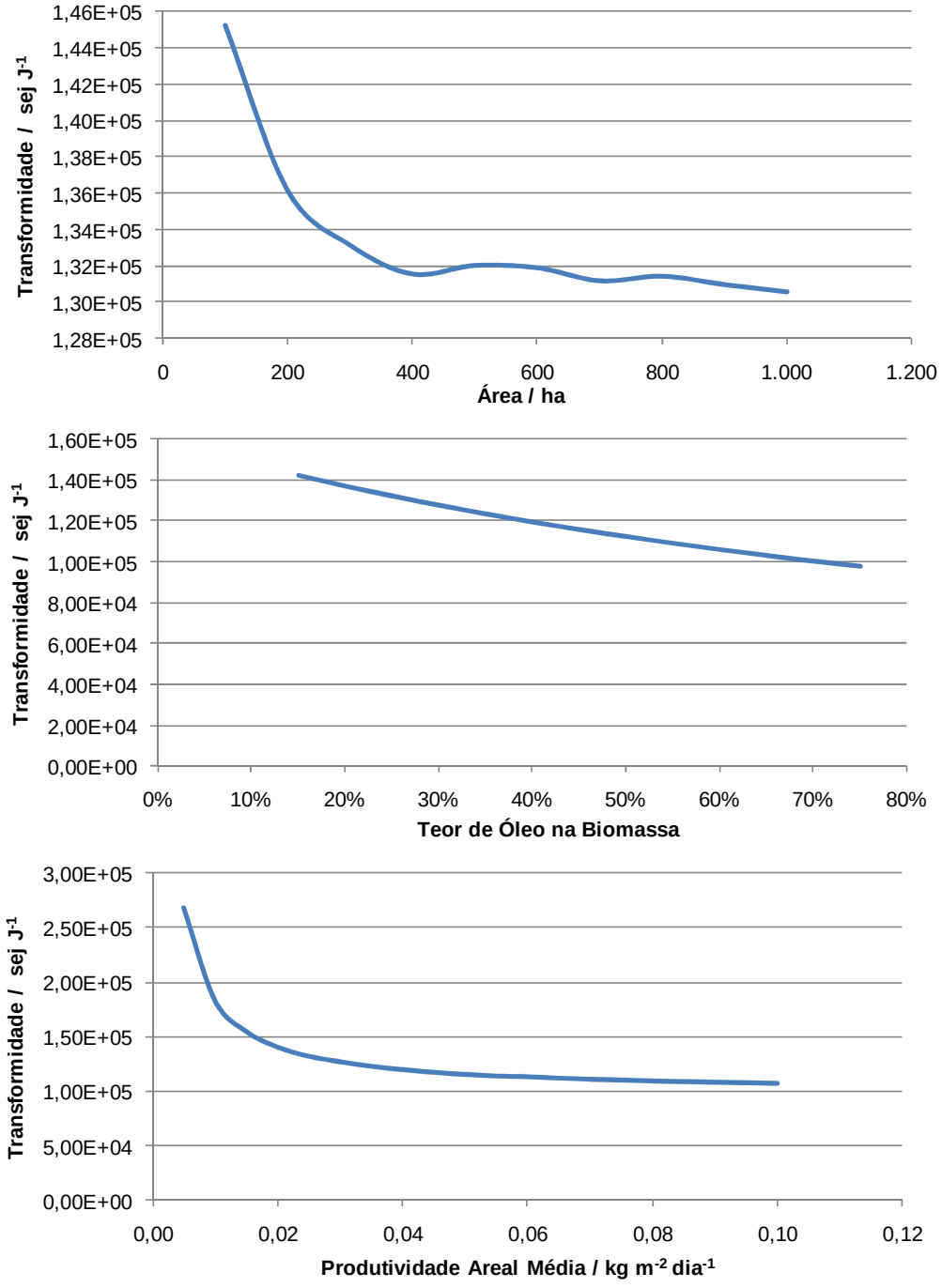


Figura 5.19 – Análise de sensibilidade para transformidade efetiva, função de algumas variáveis de processo

A Figura 5.19 descreve a relação entre área total, teor de óleo na biomassa e produtividade areal média do sistema. Em relação à área, observa-se um comportamento semelhante ao estudado para custos de capital, em que há um impacto positivo até uma escala mínima, em função da alocação de custos de serviços e investimentos com a construção, tornando-se aproximadamente constantes para áreas superiores a 400 hectares, uma vez que as demandas de recursos naturais, de energia, de nutrientes e gastos com mão-de-obra e serviços crescem linearmente com o aumento da área.

O efeito da concentração de óleo é explicado pelo maior teor energético dos lipídeos, que causa um aumento no total de energia contida nos produtos (Ep), utilizado na determinação da transformidade.

A produtividade areal média tem um efeito considerável na transformidade apenas na faixa de 5 a 40 g m^{-2} dia^{-1}. A alta demanda energética (eletricidade e gás natural) na extração e coleta novamente minimiza o impacto da alta produtividade.

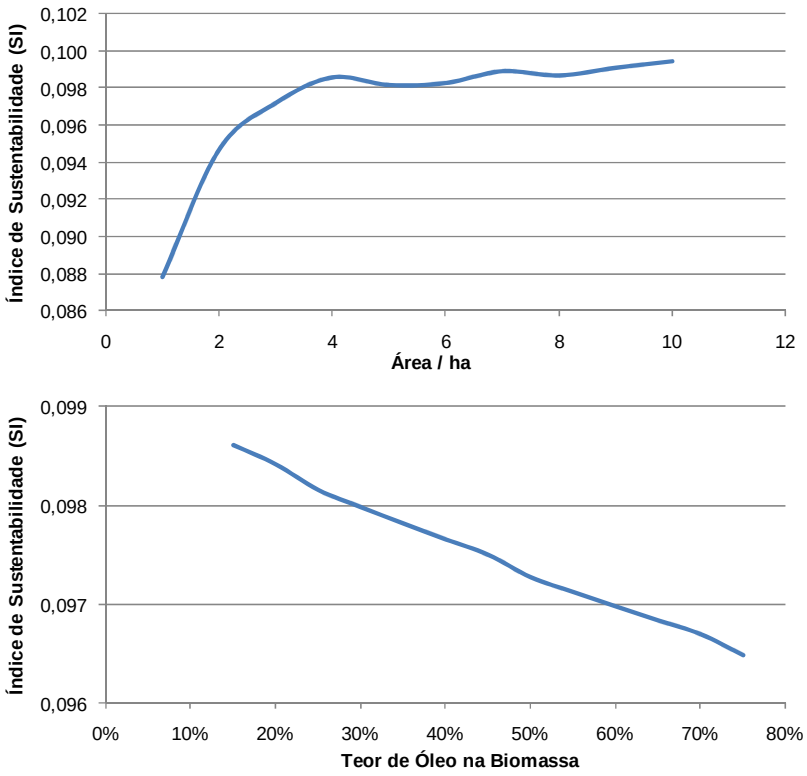


Figura 5.20 – Análise de sensibilidade para o índice de sustentabilidade Emergética (ESI) em função da área e teor de óleo na biomassa

Os efeitos da área total e teor de óleo no índice de sustentabilidade emergética (ESI) são desprezíveis, conforme mostrado na Figura 5.20, uma vez que estes dois fatores não impactam a razão de produção emergética (EYR) e causam apenas pequena variação na razão de carga ambiental (ELR).

O aumento na produtividade areal média paradoxalmente tem um efeito negativo e considerável no índice de sustentabilidade emergética, dado o aumento de 800% na razão de carga ambiental ao longo da faixa estudada, causada pelos investimentos de capital e alta demanda energética das etapas de coleta e extração.

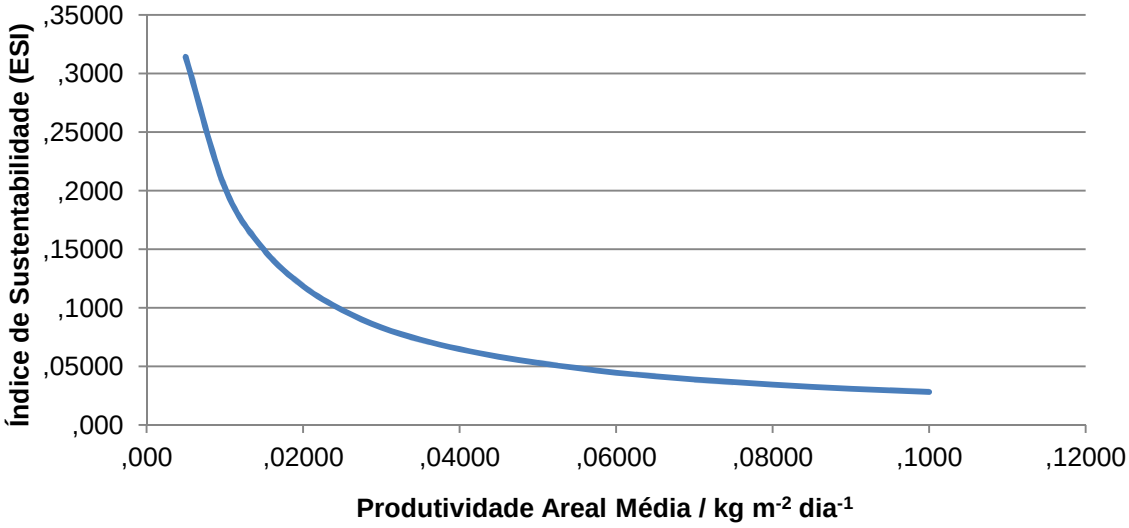


Figura 5.21 – Análise de sensibilidade para o índice de sustentabilidade emergética (ESI) em função da produtividade areal média

5.4.3 Cenários alternativos e impacto de inovações

Os dez cenários alternativos descritos na Tabela 5.10, repetida aqui para facilitar a interpretação dos resultados das próximas páginas, foram analisado do ponto de vista dos índices emergéticos. O memorial de cálculo para cada um dos casos, demonstrando as estimativas das entradas, incluindo notas e referências para os valores de transformidades empregados é apresentado no Apêndice 3.

Cenário	Descrição e hipóteses
Especialidade 1	75% do Óleo produzido vendido como especialidade para indústria química (C8-C14) a US$ 1.700 ton^{-1}. Investimento 50% mais alto para a etapa de separação
Especialidade 2	0,2% da biomassa algal é vendida como produto de alto valor agregado a US$ 600 kg^{-1} (CARDOZO et al., 2007, STEPHENS et al., 2010). Investimento 100% mais alto para a etapa de separação
Integração com usina de cana-de-açúcar	Preço da Terra 8x maior. 50% vinhaça utilizada como nutriente sem impacto na produtividade ou composição (OUROFINO, 2008). CO_2 puro recebido das dornas de fermentação, sem custo. Custo de vinhaça baseado em equivalente em nutrientes. Custo de energia elétrica e vapor baseado no valor potencial de venda pela usina para a rede de distribuição. Cálculos detalhados no apêndice
Alta produtividade	Produtividade areal média de 60 g m^{-2} dia^{-1}
Alto teor de óleo	75% lipídeos na biomassa
Capital reduzido	25% de redução no custo de capital
Eficiência Energética 1	25% de redução no consumo de energia
Eficiência Energética 2	50% de redução no consumo de energia
Créditos de Carbono	Créditos de US$10 ton^{-1} CO_2 fixado
Floculação	Adiciona tanques de floculação antes da centrífuga para concentração do caldo. Apenas 33% do volume total coletado precisa ser centrifugado (SAZDANOFF, 2006)
Nutrientes alternativos	Uso de água marinha, efluentes domésticos ou agroindustriais na composição do meio de cultura. Custo resultante de US$60 ton^{-1} nutriente

Para os casos estudados, a transformidade do sistema variou entre 9,28 x 10^4 sej J^{-1} (para sistema com alta eficiência energética, reduzindo em 50% os fluxos emergéticos associados com eletricidade e gás natural) e 1,86 x 10^4 sej J^{-1} (para a integração com uma usina de cana-de-açúcar, causada pelo alto fluxo emergético

relativo ao bagaço consumido para geração de calor), conforme mostrado na Figura 5.22.

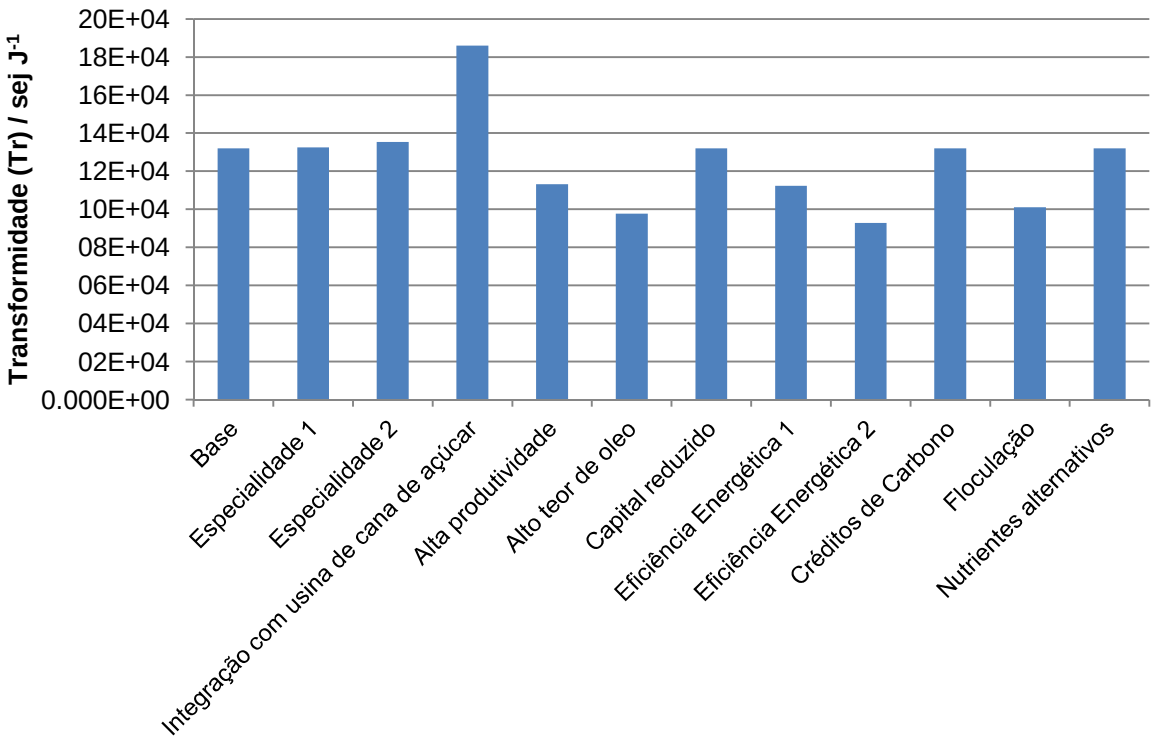


Figura 5.22 – Transformidades efetivas para os cenários alternativos

O percentual renovável é igualmente impactado pela demanda de energia elétrica e gás natural do sistema, conforme mostra a Figura 5.23. A redução de 50% na energia consumida pelo sistema (concentrada principalmente nas etapas de centrifugação e secagem) eleva este índice a 11,7% (em comparação com 8,3% para o sistema de referência). Analogamente, a instalação dos tanques de sedimentação, reduzindo o volume de líquido a ser centrifugado, eleva o percentual de renováveis a 10,8%. O sistema com alta produtividade apresenta o menor percentual de renováveis (4,1%) dado o aumento no número de centrífugas e energia na separação e secagem.

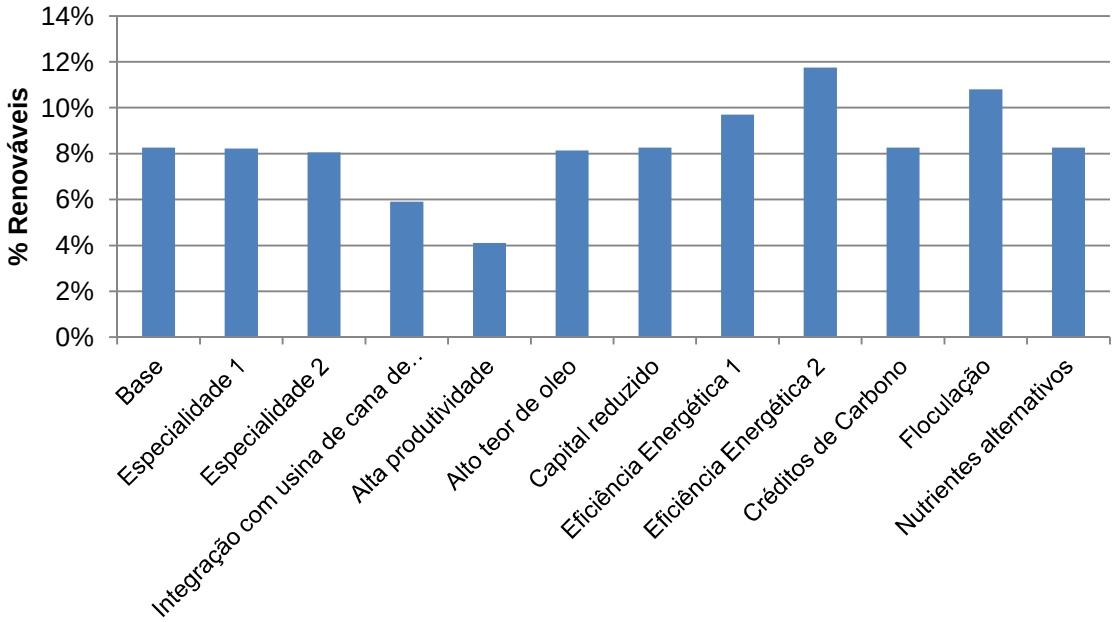


Figura 5.23 – Percentuais de emergia renovável para os cenários alternativos

Nenhum dos cenários alternativos apresentou alterações significativas no Índice de Sustentabilidade Emergética, mostrado na Figura 5.24.

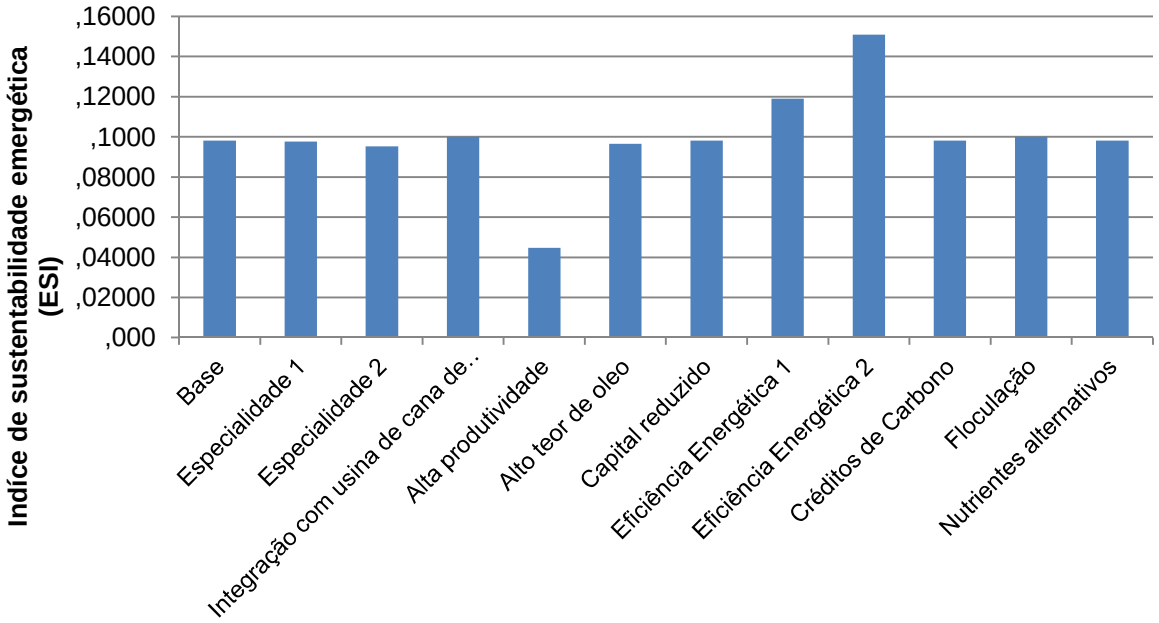


Figura 5.24 – Índices de Sustentabilidade Emergética para os cenários alternativos

O estudo da taxa de intercâmbio emergético (EER), definida como fluxo de emergia contido no produto dividido pelo valor em emergia solar das receitas, forneceu resultados semelhantes aos obtidos na análise econômica. O único cenário que se aproximou do ponto de equilíbrio (EER=1) foi a produção de especialidade de alto valor agregado (Especialidade 2), conforme mostra a Figura 5.25.

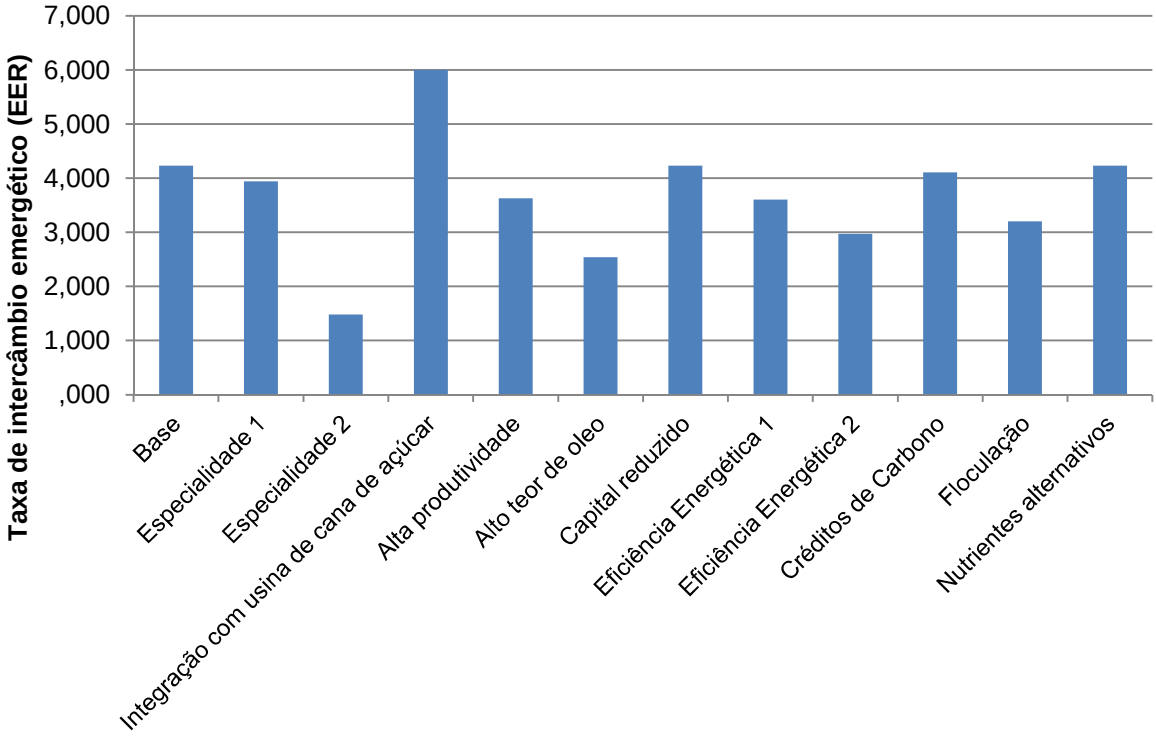


Figura 5.25 – Taxa de intercâmbio emergético para cenários alternativos

Os resultados da análise emergética comparando os dez cenários alternativos com o sistema de referência são resumidos na Tabela 5.16. Os valores em negrito representam índices mais favoráveis do que o caso base.

Tabela 5.16 – Resumo dos índices emergéticos para os cenários alternativos

Cenário	Tr / sej J^{-1}	% Renováveis	EYR	EIR	ELR	ESI	EER
Base	1,32E+05	8,3%	1,09	11,10	11,10	0,10	4,23
Especialidade 1	1,33E+05	8,2%	1,09	11,16	11,16	0,10	**3,94**
Especialidade 2	1,35E+05	8,1%	1,09	11,41	11,41	0,10	**1,48**
Integração com usina de cana-de-açúcar	1,86E+05	5,9%	**1,10**	16,00	16,00	0,10	6,00
Alta produtividade	**1,13E+05**	4,1%	1,04	23,32	23,32	0,04	**3,63**
Alto teor de oleo	**9,76E+04**	8,1%	1,09	11,28	11,28	0,10	**2,54**
Capital reduzido	1,32E+05	8,3%	1,09	11,10	11,10	0,10	4,23
Eficiência Energética 1	**1,12E+05**	**9,7%**	**1,11**	**9,31**	**9,31**	**0,12**	**3,60**
Eficiência Energética 2	**9,28E+04**	**11,7%**	**1,13**	**7,51**	**7,51**	**0,15**	**2,97**
Créditos de Carbono	1,32E+05	8,3%	1,09	11,11	11,11	0,10	**4,11**
Floculação	**1,01E+05**	**10,8%**	**1,10**	**8,20**	**8,20**	**0,10**	**3,20**
Nutrientes alternativos	1,32E+05	8,3%	1,09	11,10	11,10	0,10	4,23

A análise do sistema ideal proposto (tanques de sedimentação, especialidade de alto valor agregado e redução de 25% no consumo energético) mostrou uma redução considerável da carga ambiental, um aumento no percentual de renováveis e uma melhora no Índice de Sustentabilidade Emergética de 30% em relação ao caso base. No entanto, ao contrário do observado na análise econômica, estas melhorias são ainda insuficientes para tornar a tecnologia atrativa do ponto de vista de utilização de recursos naturais, quando comparada com outras fontes potenciais de biocombustíveis e matérias-primas renováveis.

Tabela 5.17 - Índices emergéticos para sistema ideal proposto

Índice	Valor
Tr / sej J^{-1}	1,05E+05
% Renováveis	10,50%
EYR	1,12
EIR	8,55
ELR	8,55
ESI	0,13
EER	1,11

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O cultivo de microalgas e cianobactérias, utilizando-se fotobiorreatores ou tanques abertos é uma tecnologia extremamente atraente em função da elevada produtividade areal e potencial de fixação de CO_2, a possibilidade de utilizar áreas em regiões áridas com aproveitamento de água salina ou efluentes agroindustriais e o considerável número de matérias-primas de interesse comercial que podem ser produzidas por estes microorganismos - entre alimentos, *commodities* e especialidades de altíssimo valor agregado. Entretanto, a análise do processo do ponto de vista de produtividade, demanda de matérias-primas e energia, econômico e emergético mostra que o atual estado da tecnologia inviabiliza a sua aplicação em grande escala (400-500 hectares, necessários para um potencial de mitigação de CO_2 expressivo).

O estudo do crescimento de microalgas e cianobactérias e o desenvolvimento de modelos confiáveis para cultivo em tanques abertos é um importante passo inicial. O modelo apresentado neste trabalho permitiu o estudo do impacto das variáveis ambientais e de processo na produtividade e foi utilizado para a otimização da estratégia de operação dos tanques, demonstrando que aumentos de produtividades areais em 30 a 100% são possíveis, alterando-se a freqüência de coleta e quantidade do meio de cultura extraído, sugerindo que um desenho de reator alternativo que permitisse a coleta e reposição contínuas em janelas de operação de alta produtividade – condicionado a uma solução para a separação da biomassa a baixas concentrações – poderia apresentar grandes vantagens competitivas.

O modelo desenvolvido mostrou-se também uma ferramenta útil para avaliação de locais para cultivo, simulando o impacto de variações na radiação solar e temperaturas diárias no crescimento dos microorganismos e balanço entre fotossíntese e respiração. Uma vez feito o ajuste de parâmetros para um novo sistema microorganismo-meio de cultura-reator, o modelo também pode ser utilizado para auxiliar o controle do processo, em especial se acoplado com equações para consumo de nutrientes (PACKER et al., 2011), trocas gasosas (GUTERMAN; VONSHAK; BEN-YAAKOV, 1989) e hidrodinâmicas (JAMES; BORIAH, 2011).

A análise econômica e balanços de massa para um sistema padrão mostraram que as atrativas produtividades destacadas - em alguns casos exageradamente – na literatura técnica e patentes, são compensadas pelas dimensões dos equipamentos e quantidades de matérias-primas e energia necessárias para operação. A partida de uma planta de 500 hectares nas condições estudadas, por exemplo, utilizaria 1,5 milhões de metros cúbicos de meio de cultura, com um custo total de quase dois milhões de dólares.

A análise de sensibilidade e estudos de cenários alternativos mostrou a importância de minimizar os custos de capital, através de técnicas de construção alternativas - para os tanques de cultivo – e novas tecnologias e equipamentos – para a coleta, separação e extração. As etapas de separação também são responsáveis por 18% do custo variável (para o caso base) em função da eletricidade e gás natural consumidos. Para o cultivo de *Spirulina platensis* no meio de cultura proposto, 37% do custo variável está associado ao consumo de nutrientes – mesmo utilizando-se as mais baixas cotações disponíveis para os fertilizantes e outras matérias-primas utilizadas na formulação. A exploração de fontes alternativas de nutrientes (como água do mar ou salina, efluentes agroindustriais), a utilização de microorganismos com menor demanda de nutrientes inorgânicos ou ainda a utilização de cianobactérias fixadoras de nitrogênio (ou seus genes) deve ser uma prioridade de pesquisa para aumento da viabilidade econômica do processo.

Em função altos custos de operação proporcionados pela tecnologia atual, projetos de cultivo de microalgas e cianobactérias possuem forte dependência da receita de produtos de alto valor agregado. De todos os cenários estudados, os únicos que apresentaram indicadores econômicos positivos eram baseados na extração e venda de um produto de valor nutricional ou farmacêutico presente na biomassa. De fato, a maioria dos projetos em grande escala (até 45 hectares) em operação atualmente baseia-se neste modelo de negócio. O modelo econômico desenvolvido mostra que sem melhorias de pelo menos uma ordem de magnitude no processo, um projeto baseado exclusivamente na produção de *commodities* será inviável.

A análise emergética mostrou-se bastante útil para avaliar os índices de sustentabilidade e utilização de recursos do sistema, permitindo também a

comparação com outras fontes potenciais de biocombustíveis e matérias-primas renováveis baseadas em culturas terrestres. Em ordem de importância, a elevada demanda de energia (eletricidade e gás natural), os custos de operação (compras externas, serviços, manutenção) e as perdas do solvente utilizado na extração são os maiores obstáculos para a sustentabilidade do sistema. Mesmo para o melhor cenário estudado, a eficiência no uso de recursos é inferior aos biocombustíveis tradicionais menos competitivos, como etanol de milho ou uva na Europa. Fica evidente mais uma vez a importância do desenvolvimento de métodos mais eficientes de coleta e extração, com menor custo de capital e demanda energética. Os índices de sustentabilidade também podem ser melhorados – embora não necessariamente os resultados econômicos – utilizando-se fontes de energia com elevado percentual de emergia renovável, como hidroelétrica, eólica ou biomassa. Uma possibilidade bastante promissora consiste em utilizar a biomassa residual para geração de biogás em um digestor, aproveitando-o na geração da energia que seria utilizada pelo sistema, ou ainda, para geração de gás de síntese pelo processo de reforma, isoladamente ou em combinação com uma outra fonte de biomassa.

Com base nas conclusões deste trabalho, propõe-se uma lista de prioridades para pesquisa, em função do impacto na viabilidade econômica e sustentabilidade no processo, resumida na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Lista de prioridades de pesquisa, em função do impacto na viabilidade econômica e índices de sustentabilidade

Concentração	Impacto Econômico	Impacto na Sustentabilidade	Possíveis áreas de estudo
Coleta, secagem e extração	Alto	Alto	• Flotação no tanque de cultivo • Auto floculação • Extração *in vivo* • Extração livre de solvente • Lise com vapor
Eficiência energética	Alto	Alto	• Otimização de agitação e bombeamento • Tecnologia de baixa demanda energética para coleta, secagem e extração • Extração livre de solvente • Uso da biomassa residual para geração de energia
Redução de investimento de capital	Alto	Médio	• Desenhos alternativos de reatores abertos e fechados • Métodos alternativos de construção • Sistemas de separação de baixo custo • Integração com biorrefinaria
Fontes de nutrientes	Alto	Médio	• Organismos geneticamente modificados ou adaptados • Simbiose com fixadores de nitrogênio • Aproveitamento de efluentes agroindustriais
Matérias-primas de alto valor agregado	Alto	Baixo	• Extração • Seleção de espécies ou modificação genética visando a maiores concentrações dos produtos
Alto teor de lipídeos	Médio	Baixo	• Extração • Seleção de espécies ou modificação genética visando a maiores concentrações dos produtos • Cultivo alternado (autotrófico/heterotrófico ou excesso/depleção de nutrientes)

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APT, K.E.; BEHRENS, P.W. Commercial developments in microalgal biotechnology. **Journal of Phycology**, vol. 35, p. 215-226, 1999.

ARIAS, M.E.; BROWN, M.T. Feasibility of using constructed treatment wetlands for municipal wastewater treatment in the Bogotá Savannah, Colombia. **Ecological Engineering**, vol. 25, p. 1070-1078, 2009.

ARRANZ, A.; BORDEL, S.; VILLAVERDE, S.; ZAMARRENO, J. M.; GUIEYSSE, B.; MUNOZ, R. Modeling photosynthetically oxygenated biodegradation processes using artificial neural networks. **Journal of Hazardous Materials**, vol. 155, n. 1-2, p 51-57, 2008.

ARRANZ, A.; BORDEL, S.; VILLAVERDE, S.; ZAMARREÑO, J. M.; GUIEYSSE, B.; MUÑOZ, R. Modeling photosynthetically oxygenated biodegradation process using artificial neural networks. **Journal of Hazardous Materials**, vol. 155, p. 51-57, 2008.

BAQUERISSE, D.; NOUALS, S.; ISAMBERT, A.; SANTOS, P.F.; DURAND, G. Modeling of a continuous pilot photobioreactor for microalgae production. **Journal of Biotechnology**, vol. 70, p. 335-342, 1999.

BASTIANONI, S.; COPPOLA, F.; TIEZZI, E.; COLACEVICH, A.; BORGHINI, F.; FOCARDI, S. Biofuel potential production from the Orbetello lagoon macroalgae: A comparison with sunflower feedstock. **Biomass and Bioenergy**, vol. 32, n. 7, p. 619-628, 2008.

BASTIANONI, S.; MARCHETTINI, N. Ethanol production from biomass: Analysis of process efficiency and sustainability. **Biomass and Bioenergy**, vol. 11, n. 5, p. 411-418, 1996.

BASTIANONI, S.; MARCHETTINI, N. The problem of co-production in environmental accounting by emergy analysis. **Ecological Modelling**, vol. 129, p. 187-193, 2000.

BENEMANN, J.R. CO_2 mitigation with microalgae systems. **Energy Conversion Management**, vol. 38 (suplemento), p. S475-S479, 1997.

BENEMANN, J.R. **Opportunities and challenges in algae biodiesel production.** Singapura: Centre for Management Technology, 2008. 15p.

BENEMANN, J.R.; OSWALD, W.J. **Systems and economic analysis of microalgae ponds for conversion of CO2 to biomass**: Final report to the Department of Energy Pittsburgh Energy Technology Center under grant no. DE-FG22-93PC93203. Pittsburgh: DOE, 1996. 201 p.

BILANOVIC, D.; SHELEF, G.; SUKENIK, A. Flocculation of microalgae with cationic polymers – effects of medium salinity. **Biomass**, vol. 17, p. 65-76, 1988.

BINAGHI, L.; DEL BORGHI, A.; LODI, A.; CONVERTI, A.; DEL BORGHI, M. Batch and fed-batch uptake of carbon dioxide by *Spirulina platensis*. **Process Biochemistry**, vol. 38, p. 1341-1346, 2003.

BOROWITZKA, M.A. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. **Journal of Biotechnology**, vol. 70, p. 313-321, 1999.

BOROWITZKA, M.A. Microalgae for aquaculture: Opportunities and constraints. **Journal of Applied Phycology**, vol. 9, p. 393-401, 1997.

BRANDI, R. J.; ALFANO, O. M.; CASSANO, A. E. Modeling of radiation absorption in a flat plate photocatalytic reactor. **Chemical Engineering Science**, vol. 51, n. 11, p. 3139-3174, 1996.

BRANDT-WILLIAMS, S. **Handbook of Emergy Evaluation Folio 4:** Emergy of Florida Agriculture. Gainesville: University of Florida, Center for Environmental Policy, 2002. Disponível em: <http://www.emergysystems.org/folios.php>. Acesso em: 27 Feb. 2010.

BROWN, M. T.; ULGIATI, S. Emergy-based indices to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. **Ecological Engineering**, vol. 9, p. 51-69, 1997.

BROWN, M.T.; BARDI, E.. **Handbook of Emergy Evaluation Folio 3:** Emergy of Ecosystems. Gainesville: University of Florida, Center for Environmental Policy, 2001. Disponível em: <http://www.emergysystems.org/folios.php>. Acesso em: 27 Feb. 2010.

BROWN, M.T.; HERENDEEN, R.A. Embodied energy analysis and EMERGY analysis: a comparative view. **Ecological Economics**, vol. 19, p. 219-235, 1996.

BROWN, M.T.; MCCLANAHAN, T.R. EMergy analysis perspectives of Thailand and Mekong river dam proposals. **Ecological Modelling**, vol. 91, p. 105-130, 1996.

BROWN, M.T.; ULGIATI, S. Energy quality, emergy, and transformity: H.T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems. **Ecological Modelling**, vol. 178, p. 201-213, 2004.

BUELMA, G.; BHATTARIA, K.K.; NOUE, J.; TAIGANIDES, E.P. Evaluation of various flocculants for the recovery of algae biomass growth on pig-waste. **Biological Waters**, vol. 31, p. 211-222, 1990.

CARDOZO, K. H.M.; GUARATINI, T.; BARROS, M.P.; FALCÃO, V.R.; TONON, A.P.; LOPES, N.P. ; CAMPOS, S.; TORRES, M.A.; SOUZA, A.O.; COLEPICOLO, P.; PINTO, E. Metabolites from algae with economical impact. **Comparative Biochemistry and Physiology, Part C**, v. 146, p. 60-78, 2007.

CARVALHO, A.P.; MEIRELES, L.A.; MALCATA, F.X. Microalgal reactors: A review of enclosed system designs and performances. **Biotechnology Progress**, vol. 22, p. 1490-1506, 2006.

CASSANO, A.E.; MARTÍN, C.A.; BRANDI, R.J.; ALFANO, O.M. Photoreactor analysis and design: Fundamentals and applications. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, vol. 34, p. 2155-2201, 1995.

CAVALETT, O. ORTEGA, E. Emergy, nutrients balance, and economic assessment of soybean production and industrialization in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, vol. 17, p. 762-771, 2009.

CAVALETT, O.; QUEIROZ, J.F.; ORTEGA, E. Emergy assessment of integrated production systems of grains, pig and fish in small farms in the South Brazil. **Ecological Modelling,** vol. 193, p. 205-224, 2006.

CHELF, P.; BROWN, L.M.; WYMAN, C.E. Aquatic biomass resources and carbon dioxide trapping. **Biomass and Bioenergy**, vol. 4, n. 3, p. 175-183, 1993.

CHENG, Y.; LU, Y.; GAO, G.; WU, Q. Alga-based biodiesel production and optimization using sugar cane as feedstock. **Energy & Fuels**, vol. 23, p. 4166-4177, 2009.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. **Trends in Biotechnology**, vol. 26, n. 3, p. 126-131, 2008.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances**, vol. 25, p. 294-306, 2007.

CHISTI, Y. Response to Reijnders: do biofuels from microalgae beat biofuels from terrestrial plants? **Trends in Biotechnology**, vol. 28, n. 7, p. 351-352, 2008.

CHRISTENSEN, C.H.; RAS-HANSEN, J.; MARSDEN, C.C.; TAARNING, E.; EGEBLAD, K. The Renewable Chemicals Industry. **ChemSusChem**, vol. 1, p. 283-289, 2008.

CIFERRI, O. *Spirulina*, the edible microorganism. **Microbiological Reviews**, vol. 47, n. 4, p. 551-578, 1983.

CIIAGRO. **Centro integrado de informações metereológicas.** São Paulo, 2011. Disponível em <http://www.ciiagro.sp.gov.br/>. Acesso em 15 abr. 2011.

COPELAND, C.H.; PIER, P.; WHITEHEAD, S.; ENLOW, P.; STRICKLAND, R.; BEHEL, D. **Chemical fixation of CO2 in coal combustion products and recycling through biosystems**: Final technical report. Muscle Shoals: Tennessee Valley Authority, 2003. 29 p.

CORNET, J.F., DUSSAP, C.G., CLUZEL, P., DUBERTRET, G. A structured model for simulation of cultures of cyanobacterium *Spirulina platensis* in photobioreactors: II. Indentification of kinetic parameters under light and mineral limitations. **Biotechnology and Bioengineering**, vol. 40, p. 826-834, 1992.

CORNET, J.F.; DUSSAP, C.G. A simple and reliable formula for assessment of maximum volumetric productivities in photobioreactors. **Biotechnology Progress**, vol. 25, n. 2, p. 424-435, 2009.

COSTA, J. A. V.; COLLA, L.M.; DUARTE FILHO, P.; KABKE, K.; WEBER, A. Modelling of *Spirulina platensis* growth in fresh water using response surface methodology. **World Journal of Microbiology & Biotechnology**, vol. 18, p.603-607, 2002.

COSTA, J. A. V.; LINDE, G. A.; ATALAZ, D. I. P.; MIBIELLI, G.M.; KRÜGER, R T. Modelling of growth conditions for cyanobacterium *Spirulina platensis* in microcosms. **World Journal of Microbiology & Biotechnology**, vol. 16, p.15-18, 2000.

COSTA, J.A.V.; MORAIS, M.G. The role of biochemical engineering in the production of biofuels from microalgae. **Biosource Technology**, vol. 102, p. 2-9, 2011.

COUTTEAU, P. Micro-algae. In: LAVENS, P; SORGELOOS, P. (eds.) **Manual on the production and use of live food for aquaculture**: FAO Fisheries Technical Paper, no. 361. Roma: FAO, 1996. p. 7-48.

CSÖGÖR, Z.; HERRENBAUER, M.; SCHIMIDT, K.; POSTEN, C. Light distribuition in a novel photobiorreactor – modeling for optimization. **Journal of Applied Phycology**, vol. 13, p. 325-333, 2001.

CUADRA, M.; RYDBERG, T. Emergy evaluation on the production, processing and export of coffee in Nicaragua. **Ecological Modelling,** vol. 196, p. 421-433, 2006.

DAYANANDA, C.; SARADA. R.; USHA RANI, M.; SHAMALA, T.R.; RAVISHANKAR, G.A. Autotrophic cultivation of *Botryococcus braunii* for the production of hydrocarbons and exopolysaccharides in various media. **Biomass and Bioenergy**, vol. 31, p. 87-93, 2007.

DOUCHA, J.; STRAKA, F.; LíVANSKY, K. Utilization of flue gas for cultivation of microalgae (*Chlorella* sp.) in an outdoor open thin-layer photobioreactor. **Journal of Applied Phycology**, v. 17, p. 403-412, 2005.

EIA. Voluntary reporting of greenhouse gases program fuel and energy source codes and emission coefficients. Disponível em: <http://www.eia.doe.gov/oiaf/1605/ coefficients.html>. Acesso em: 5 mar. 2010.

ELIA NETO, A.; NAKAHODO, T. Caracterização físico-química da vinhaça. Projeto nº 9500278. **Relatório Técnico da Seção de Tecnologia de Tratamento de Águas do Centro de Tecnologia Copersucar**, Piracicaba, 1995.

EPA. **Technical Guidance for Hazard Analysis**. U.S. EPA, 1987. Disponível em: <http://www.epa.gov/OEM/docs/chem/tech.pdf>. Acesso em 1 Jul. 2011.

ERIKSEN, N.T. The technology of microalgal culturing. **Biotechnology Letters**, v. 30, p. 1525-1526, 2008.

FAO. **Algae-Based Biofuels**: Review of challenges and opportunities for developing countries. FAO, 2009. Disponível em: <http://www.fao.org/bioenergy >. Acesso em 2 Nov. 2010.

FELIX, E.; TILLEY, D.R. Integrated energy, environmental and financial analysis of ethanol production from cellulosic switchgrass. **Energy**, vol. 34, p. 410-436, 2009.

FERNANDEZ, F. G. A.; CAMACHO, F.G.; PEREZ, J. A. S.; SEVILLA, J. M. F.; GRIMA, E. M. Modeling of biomass productivity in tubular photobioreactors for microalgal cultures: effects of dilution rate, tube diameter, and solar irradiance. **Biotechnology and Bioengineering**, vol. 58, n. 6, p. 605-612, 1998.

FERNANDEZ, F. G. A.; CAMACHO, F.G.; PEREZ, J. A. S.; SEVILLA, J. M. F.; 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, n. 5, p. 701-714, 1997.

FUKUDA, H.; KONDO, A.; NODA, H. Biodiesel fuel production for transesterification of oils. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, vol. 92, n. 5, p. 405-416, 2001.

GAFFRON, H. Photosynthesis, photoreduction and dark reduction of CO2 in certain algae. **Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society**, vol.19, p. 1-20, 1943.

GARCÍA, M.C.C.; SEVILLA, J.M.F.; FERNÁNDEZ, F.G.A.; GRIMA, E.M.; CAMACHO, F.G. Mixotrophic growth of *Phaeodactylum tricornutum* on glycerol: growth rate and fatty acid profile. **Journal of Applied Phycology**, vol. 12, p. 239-248, 2000.

GAVRILESCU, M.; CHISTI, Y. Biotechnology – a sustainable alternative for chemical industry. **Biotechnology Advances**, vol. 23, p. 471-499, 2005.

GEIDER, R.J. A dynamic regulatory model of phytoplanktonic acclimation to light, nutrients, and temperature. **Limnology and Oceanography**, vol. 43, n. 4, p. 679-694, 1998.

GOFFAUX, F.; VANDE WOUWER, A.; BERNARD, O. Continuous-discrete interval observers for monitoring microalgae cultures. **Biotechnology Progress**, vol. 25, n. 3, p. 667-675, 2009.

GOH, C.S.; LEE, K.T. Palm-based biofuel refinery (PBR) to substitute petroleum refinery: An energy and emergy assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 14, p. 2986-2996, 2010.

GOLDMAN, J.C. Outdoor algal mass cultures: II. Photosynthetic yield limitations. **Water Research**, vol. 13, p. 119-136, 1979.

GREENWELL, L.M.L.; LAURENS, L.; SHIELDS, R.J.; LOVITT; R.W.; FLYNN, K.J. Placing microalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges. **Journal of the Royal Society Interface**, vol. 7, p. 703-726, 2010.

GRIMA, E. M.; CAMACHO, F. G.; PEREZ, J. A. S.; FERNANDEZ, F. G. A.; SEVILLA, J. M.F. Evaluation of photosynthetic efficiency in microalgal cultures using averaged irradiance. **Enzyme and Microbial Technology**, vol. 21, n. 5, p. 375-381, 1997.

GRIMA, E. M.; PEREZ, J. A. S.; SANCHEZ, J. L. G.; CAMACHO, F. G.; ALONSO, D. L. EPA from *Isochrysis galbana*: Growth conditions and productivity. **Process Biochemistry**, vol. 27, p. 299-305, 1992.

GRIMA, E.M. Microalgae, mass culture methods. In: FLICKINGER, M.C.; DREW, S.W. (editores). **Encyclopedia of Bioprocess Technology**: Fermentation, Biocatalysis and Bioseparation. New York: Wiley, 1999. p. 1753-1769.

GRIMA, E.M.; BELARBI, E.H.; FERNÁNDEZ, F.G.A.; MEDINA, A.R.; CHISTI, Y. Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. **Biotechnology Advances**, vol. 20, p. 491-515, 2003.

GRIMA, E.M.; CAMACHO, F.G.; PÉREZ, J.A.S.; SEVILLA, J.M.F.; FERNÁNDEZ, F.G.A.; GÓMEZ, A.C. A mathematical model of microalgal growth in light-limited chemostat culture. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, vol. 61, p. 167-173, 1994.

GRIMA, E.M.; FERNANDEZ, F.G.A.; CAMACHO, F.G.; CHISTI, Y. Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scale-up. **Journal of Biotechnology**, vol. 70, p. 231-247, 1999.

GRIMA, E.M.; FERNANDEZ, F.G.A.; CAMACHO, F.G.; RUBIO, F.C.; CHISTI, Y. Scale-up of tubular photobioreactors. **Journal of Applied Phycology,** vol. 12: p. 355-368, 2000.

GROBBELAAR, J.U. Physiological and technological considerations for optimizing mass algal cultures. **Journal of Applied Phycology**, vol. 12, p. 201-206, 2000.

GROBBELAAR, U. Algal nutrition: Mineral nutrition. In: RICHMOND, A. (editor). **Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology**. New York: Blackwell Publishing Ltd, 2004. p. 97-115.

GROOT, W.T. Modelling the multiple nutrient limitation of algal growth. **Ecological Modelling**, vol. 18, p. 99-119, 1983.

GRUPO FAE. Grupo de Pesquisa em Fontes Alternativas de Energia. **Atlas Solarimétrico do Brasil**, 1996. 1 CD-ROM.

GUTERMAN, H.; VONSHAK, A.; BEN-YAAKOV, S. A macromodel for outdoor algal mass production. **Biotechnology and Bioengineering**, vol. 35, p. 809-819, 1990.

HAGIWARA, H.; MITSCH, W.J. Ecosystem modeling of a multi-species integrated aquaculture pond in South China. **Ecological Modelling**, vol. 72, p. 41-73, 1994.

HALL, D.O.; HOUSE, J.I. Biomass: a modern and environmentally acceptable fuel. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, vol. 38, p. 521-542, 1995.

HAMMOUDA, O.; GABER, A.; ABDEL-RAOUF, N. Microalgae and wastewater treatment. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, vol. 31, p. 205-210, 1995.

HAU, J.L.; BAKSHI, B.R. Promise and problems of emergy analysis. **Ecological Modelling**, vol. 178, p. 215-225, 2004.

HEPBURN, C. Carbon trading: a review of the Kyoto Mechanism. **Annual Review of Environment and Resources**, vol. 32, p. 375-393, 2007.

HERENDEEN, R.A. Energy analysis and EMERGY analysis – a comparison. **Ecological Modelling**, vol. 189, p. 227-237, 2004.

HILL, J.; NELSON, E.; TILMAN, D.; POLASKY, S.; TIFFANY, D. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels.

Proceedings of the National Academy of Sciences USA, vol. 103, n. 30, p. 11206-11210, 2006.

HIRANO, A.; UEDA, R.; HIRAYAMA, S.; OGUSHI, Y. CO2 fixation and ethanol production with microalgal photosynthesis and intracellular anaerobic fermentation. **Energy**, vol. 22, n. 2/3, p. 137-142, 1997.

HUGHES, E.; BENEMANN, J.R. Fossil fuel CO2 mitigation. **Energy Conversion Management**, vol. 38 (suplemento), p. S467-S473, 1997.

HUNTLEY, M.E.; REDALJE, D.G. CO2 mitigation and renewable oil production from photosynthetic microbes: a new appraisal. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, vol. 12, p. 573-608, 2007.

INCROPERA, F.P.; THOMAS, J.F. A model for solar radiation conversion to algae in a shallow pond. **Solar Energy**, vol. 20, p. 157-165, 1978.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA. **Banco de dados de terra rural**. São Paulo, 2011. Disponível em: <http://ciagri.iea.sp.gov.br>. Acesso em 14 jul. 2011.

JAMES, S.C.; BORIAH, V. Modeling algae growth in an open-channel raceway. **Journal of Computational Biology**, v. 17, n. 7, p. 895-906, 2010.

KADAM, K.L. Power plant flue gas as a source of CO2 for microalgae cultivation: economic impact of different process options. **Energy Conversion Management**, vol. 38 (suplemento), p. S505-S510, 1997.

KANGAS, R.C. **Handbook of Emergy Evaluation Folio 5:** Emergy of Landforms. Gainesville: University of Florida, Center for Environmental Policy, 2002. Disponível em: <http://www.emergysystems.org/folios.php>. Acesso em: 27 Feb. 2010.

KATHIRESAN, S.; SARADA, R.; BHATTACHARYA, S.; RAVISHANKAR, G.A. Culture media optimization for growth and phycoerythrin production from *Phorphyridium purpureum*. **Biotechnology and Bioengineering**, vol. 96, n. 3, 2007.

KRETZSCHMAR, M.; NISBET, R.M.; MCCAULEY, E. A predator-prey model for zooplankton grazing on competing algal populations. **Theorethical Populational Biology**, vol. 44, p. 32-46, 1993.

KURANO, N.; IKEMOTO, H.; MYASHITA, H.; HASEGAWA, T.; HATA, H.; MIAYCHI, S. Fixation and utilization of carbon dioxide by microalgal photosynthesis. **Energy Conversion**, vol. 36, n. 6-9, p. 689-692, 1995.

LANZOTTI, C.R. **Uma análise emergética de tendências do setor sucroalcooleiro**. 2000. 95 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

LARDON, L.; HÉLIAS, A.; SIALVE, B.; STEYER, P.; BERNARD, O. Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae. **Environmental Science and Technology**, vol. 42, n. 17, p. 6475-6481, 2009.

LAWS, E.A.; TERRY, K.L.; WICKMAN, J.; CHALUP, M.S. A simple algal production system designed to utilize the flashing light effect. **Biotechnology and Bioengineering**, vol. 25, p. 2319-2335, 1983.

LEE, J.Y.; YOO, C.; JUN, S.Y.; AHN, C.Y.; OH, H.M. Comparison of several methods for effective lipid extraction from microalgae. **Bioresource Technology**, vol. 101, n. 1, supl. 1, p. S75-S77, 2010.

LEE, Y.K. Microalgal mass culture systems and methods: their limitations and potential. **Journal of Applied Phycology**, vol. 13, p. 307-315, 2001.

LEE, Y.K.. Algal nutrition: Heterotrophic carbon nutrition. In: RICHMOND, A. (editor). **Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology**. New York: Blackwell Publishing Ltd, 2004. p. 116-124.

LEFROY, E.; RYDBERG, T. Emergy evaluation of three cropping systems in southwestern Australia. **Ecological Modelling**, vol. 161, p. 195-211, 2003.

LEVIN, G.V.; CLENDENNING, J.R.; GIBOR, A.; BOGAR, F.D. Harvesting of algae by froth flotation. **Applied Microbiology**, vol. 10, p.169-175, 1962.

LOURENÇO, S.O. **Cultivo de Microalgas Marinhas**: Princípios e Aplicações. São Carlos: RiMa, 2006. 606 p.

LOURENÇO, S.O.; BARBARINO, E.; MANCINI-FILHO, J.; SCHINKE, K.P.; AIDAR, E. Effects of different nitrogen sources on the growth and biochemical profile of 10 marine microalgae in batch culture: an evaluation for aquaculture. **Phycologia**, vol. 41, n. 2, p. 158-168, 2002.

LUO, H.P.; AL-DAHAN, M.H. Analyzing and modeling of photobioreactors by combining first principles of physiology and hydrodynamics. **Biotechnology and Bioengineering**, vol. 85, no. 4, p. 382-393, 2004.

LUO, H.P.; KEMOUN, A.; AL-DAHHAN, M. H.; SEVILLA, J. M. F.; SANCHEZ, J. L. G.; CAMACHO, F. G.; GRIMA, E. M. Analysis of photobioreactors for culturing high-value microalgae and cyanobacteria via an advanced diagnostic technique: CARPT. **Chemical Engineering Science**, vol. 58, n. 12, p. 2519-2527, 2003.

MALLICK, N. Biotechnological potential of immobilized algae for wastewater N,P and metal removal: a review. **BioMetals**, vol. 15, p. 377-390, 2002.

MASOJIDEK, J. KOBLIZEK, M.; TORZILLO, G. Photosynthesis in Microalgae In: RICHMOND, A. (editor). **Handbook of Microalgal Culture:** Biotechnology and Applied Phycology. New York: Blackwell Publishing Ltd, 2004. p. 20-39.

MCGRIFF JR.; E.C.; MCKINNEY, R.E. The removal of nutrients and organics by activated algae. **Water Research**, vol.6, p. 1155-1164, 1972.

MERCHUK, J.C.; RONEN, M.; GIRIS, S.; ARAD, S.M. Light/Dark cycles in the growth of the red microalga *Porphyridium* sp. **Biotechnology and Bioengineering**, vol. 59, p. 705-713, 1998.

METTING JR.; F.B. Biodiversity and application of microalgae. **Journal of Industrial Microbiology**, vol. 17, p. 477-489, 1996.

MIRÓN, A.S.; GÓMEZ, A.C.; CAMACHO, F.G.; GRIMA, E.M.; CHISTI. Y. Comparative evaluation of compact photobioreactors for large-scale culture of microalgae. **Journal of Biotechnology**, vol. 70, p. 249-270, 1999

MITRA, A.; FLYNN, K.J. Promotion of harmful algal blooms by zooplankton predatory activity. **Biology Letters**, vol. 2, p. 194-197, 2006.

MOHEIMANI, N.R. **The culture of coccolithophorid algae for carbon dioxide remediation**. 2005. 252 f. Tese de Doutorado – Murdoch University, Perth, Austrália, 2005.

MONTAGNES, D.J.S.; FRANKLIN, D.J. Effect of temperature on diatom volume, growth rate, and carbon and nitrogen content: reconsidering some paradigms. **Limnology and Oceanography**, v. 46, p. 2008-2018, 2001.

MOSTERT, E. S.; GROBBELAAR, J. U. The influence of nitrogen and phosphorus on algal growth and quality in outdoor mass algal cultures. **Biomass**, vol. 13, p. 219-233, 1987.

MUÑOZ, R.; GUIEYSSE, B. Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review. **Water Research**, vol. 40, p. 2799-2815, 2006.

MUÑOZ, R.; KÖLLNER, C.; GUIEYSSE, B.; MATTIASSON, B. Photosynthetically oxygenated salicylate biodegration in a continuous stirred tank photobioreactor. **Biotechnology and Bioengineering**, vol. 87, n. 6, p. 797-803, 2004.

NILSSON, D. Energy, exergy and emergy analysis of using straw as fuel in district heating plants. **Biomass and Bioenergy**, vol 13, n. 1-2, p. 63-73, 1997.

NISBET, R.M.; MCCAULEY, E.; DE ROOS, A.M.; GURNEY, W.S.C. Population dynamics and element recycling in an aquatic plant-herbivore system. **Theoretical Population Biology**, vol. 4, p. 125-147, 1991.

ODUM, H.T. **Environmental accounting:** Emergy and environmental decision making. New York, 1996. 370 p.

ODUM, H.T. **Handbook of Emergy Evaluation Folio 2**: Emergy of Global Processes. Gainesville: University of Florida, Center for Environmental Policy, 2000. Disponível em: <http://www.emergysystems.org/folios.php>. Acesso em: 27 Feb. 2010.

ODUM, H.T.; BROWN, M.T.; BRANDT-WILLIAMS, S. **Handbook of Emergy Evaluation Folio 1**: Introduction and Global Budget. Gainesville: University of Florida, Center for Environmental Policy, 2000. Disponível em: <http://www.emergysystems.org/folios.php>. Acesso em: 27 Feb. 2010.

OGBONNA, J.C.; SOEKIMA, T.; TANAKA, H. An integrated solar and artificial light system for internal illumination of Photobioreactors. **Journal of Biotechnology**, vol. 70, p. 289-297, 1999.

OGBONNA, J.C.; TANAKA, H. Light requirement and photosynthetic cell cultivation – development of processes for efficient light utilization in Photobioreactors. **Journal of Applied Phycology**, vol. 12, p. 207-218, 2000.

OH, H.M.; LEE, S.J.; PARK, M.H.; KIM, H.S.; KIM, H.C.; YOON, J.H.; KWON, G.S.; YOON, B.D. Harvesting of *Chlorella vulgaris* using a bioflocculant from *Paenibacillus* sp. AM49. **Biotechnology Letters**, vol. 23, p. 1229-1234, 2001.

OUROFINO PARTICIPAÇÕES E EMPREENDIMENTOS LTDA. Carlos Ricardo Soccol; Cristina Elisabete Knoerr; Jorge Alberto Vieira Costa. **Processo to produce biomass and proteins by microalgae**. WO 2008/083453 A1. 17 Jul. 2008.

PACKER, A.; LI, Y.; ANDERSEN, T.; HU, Q.; KUANG, Y.; SOMMERFELD, M. Growth and neutral lipid synthesis in green microalgae: a mathematical model. **Biosource Technology**, vol. 102, p. 111-117, 2010.

PEREIRA, C. L. F. **Avaliação da sustentabilidade ampliada de produtos agroindustriais**. 2008. 268 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

PETERS, M.; TIMMERHAUS, K.; WEST, R. **Plant design for chemical engineers.** 5a. ed**.** New York: McGraw-Hill, 2003. 1008 p.

POPOVA, P.; BOYADJIEV, C. About microalgae growth kinetics modeling. **Chemical and Biochemical Engineering Quarterly**, vol. 22, n. 4, p. 491-497, 2008.

POWELL, E.E.; MAPIOUR, M.L.; EVITTS, R.W.; HILL. G.A. Growth kinetics of *Chlorella vulgaris* and its use as a cathodic half cell. **Bioresource Technology**, vol. 100, p. 269-274, 2009.

POWELL. E.E.; HILL. G.A. Economic assessment of an integrated Bioethanol-biodiesel microbial fuel facility utilizing yeast and photosynthetic algae. **Chemical Engineering Research and Design**, vol. 87, n. 9, p. 1340-1348, 2009.

PRADHAN, A.; SHRESTHA, D.S.; VAN GERPEN, J.; DUFFIELD, J. The energy balance of soybean production: a review of past studies. **Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers**, vol. 51, n. 1, p. 185-194, 2008.

PULZ, O. Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. **Applied Microbiology and Biotechnology**, vol. 57, p. 287-293, 2001.

QIANG, H.; GUTERMAN, H.; RICHMOND, A Physiological characteristics of *Spirulina platensis* (cyanobacteria) cultured in ultrahigh cell densities. **Journal of Phycology**, vol. 32, p. 1066-1073, 1996.

QIANG, H.; ZARMI, Y.; RICHMOND, A. Combined effects of light intensity, light-path and culture density on output rate of *Spirulina platensis* (Cyanobacteria). **European Journal of Phycology**, vol. 33, p. 165-171, 1998.

RAOOF, B.; KAUSHIK, B.D.; PRASANNA, R. Formulation of low-cost medium for mass production of *Spirulina*. **Biomass and Bioenergy**, vol. 30, p. 537-542, 2006.

REICHERT, C.C.; REINEHR, C.O.; COSTA, A.V. Semicontinous cultivation of the cyanobacterium *Spirulina platensis* in a closed photobioreactor. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, vol. 23, no. 01, p. 23-28, 2006.

RICHMOND, A. Microalgal biotechnology at the turn of the millennium: a personal view. **Journal of Applied Phycology**, vol. 12, p. 441-451, 2000.

RICHMOND, A. Principles for attaining maximal microalgal productivity in photobioreactors: an overview. **Hydrobiologia**, vol. 512, p. 33-37, 2004.

ROCKSTRÖM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, Å.; CHAPIN, III, F.S.; et al. A safe operating space for humanity. **Nature**, vol. 461, p. 472-475, 2009.

RODOLFI, L.; ZITTELLI, G.C.; BASSI, N.; PADOVANI, G.; BIONDI, N.; BONINI, G.; TREDICI, M.R. Microalgae for oil: strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor. **Biotechnology and Bioengineering**, vol. 102, n. 1, p. 100-112, 2009.

RODRIGUES, M.S. **Avaliação do cultivo de *Spirulina platensis* utilizando simultaneamente nitrato de potássio e cloreto de amônio como fontes de nitrogênio**. 2008. 149 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Bioquímico-Farmacêutica) – Faculdade de Ciência Farmacêuticas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

ROMANOWICZ, R.; PETERSEN, W. Statistical modeling of algae concentrations in the Elbe river in the years 1985-2001 using observations of daily dissolved oxygen, temperature and pH. **Acta hydrochimica et hydrobiologica**, vol. 31, n. 4-5, p. 319-333, 2003.

RORRER, G. L.; MULLIKIN, R. K.; Modeling and simulation of a tubular recycle photobioreactor for macroalgal cell suspension cultures. **Chemical Engineering Science**, vol. 54 n. 15-16, p. 3153-3162, 1999.

RUBIO, F. C.; CAMACHO, F. G.; SEVILLA, J. M. F.; CHISTI, Y.; GRIMA, E. M. A Mechanistic model of photosyntesis in microalgae. **Biotechnology and Bioengineering**, vol. 81, n. 4, p. 459-473, 2003.

RUBIO, F. C.; FERNANDEZ, F. G. A.; PEREZ, J. A. S.; CAMACHO, F. F.; GRIMA, E. M. Prediction of dissolved oxygen and carbon dioxide concentration profiles in tubular photobioreactors for Microalgal culture. **Biotechnology and Bioengineering**, vol. 62, n. 1, p. 71-86, 1999.

SASSANO, C.E.N.; GIOIELLI, L.A.; ALMEIDA, K.A.; SATO, S.; PEREGO, P.; CONVERTI, A.; CARVALHO, J.C.M. Cultivation of *Spirulina platensis* by continuous process using ammonium chloride as nitrogen source. **Biomass and Bioenergy**, vol. 31, p. 593-598, 2007.

SAZDANOFF, N. **Modeling and simulation of the algae to biodiesel fuel cycle**. Columbus: Ohio State University, 2006.

SCHENK, P.M.; THOMAS-HALL, S.R.; STEPHENS, E.; MARX U.; MUSSGNUG, J.H.; POSTEN, C.; KRUSE, O.; HANKAMER, B. Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. **Bioenergy Research,** vol. 1 p. 20–43, 2008.

SEDYKH, E.M.; LYABUSHEVA, O.A.; TAMBIEV, A.K.; BANNYKH, L.N. Determination of the elemental composition of cyanobacteria cells and cell fractions

by atomic emission and atomic absorption spectrometry. **Journal of Analytical Chemistry**, v. 60, n. 1, p. 29–33, 2005.

SHEEHAN. J.; DUNAHAY, T.; BENEMANN, J.; ROESSLER, P. **A look back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from algae.** U.S. Report NREL/TP-580-24190. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 1998. 323 p.

SIRACUSA, G.; LA ROSA, A.D. Design of a constructed wetland for wastewater treatment in a Sicilian town and environmental evaluation using the emergy analysis. **Ecological Modelling**, vol. 197, p. 490-497, 2006.

SPOLAORE, P.; JOANNIS-CASSAN, C.; DURAN, E.; ISAMBERT, A. Commercial applications of microalgae. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, vol. 101, n. 2, p. 87-96, 2006.

SRIVASTAVA, A.; PRASAD, R. Triglycerides-based diesel fuels. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 4, p. 111-133, 2000.

STEPHENS, E.; ROSS, I.L.; KING, Z.; MUSSGNUG, J.H.; KRUSE, O.; POSTEN, C.; BOROWITZKA, M.A.; HANKAMER, B. An economical and technical evaluation of microalgal fuels. **Nature Biotechnology**, vol. 28, n. 2, p. 126-128, 2010.

STERN, N.; PETERS, S.; BAKHSHI, V.; BOWEN, A.; CAMERON, C.; CATOVSKY, S.; CRANE, D.; CRUICKSHANK, S.; DIETZ, S.;EDMONSON, N.; GARBETT, S.L.; HAMID, L.; HOFFMAN, G.; INGRAM, D.; JONES, B.; PATMORE, N.; RADCLIFFE, H.; SATHIYARAJAH, R.; STOCK, M.; TAYLOR, C.; VERNON, T.; WANJIE, H.; ZENGHELIS, D. **Stern Review**: The economics of climate change. Londres: HM Treasury, 2006. 713 p.

STERNER, R.W.; GROVER, J.P. Algal growth in warm temperate reservoirs: kinetic examination of nitrogen, temperature, light, and other nutrients. **Water Research**, vol. 32, n. 12, p. 3539-3548, 1998.

SUKENIK, A.; FALKOWSKI, P.G.; BENNETT, J. Potential enhancement of photosynthetic energy conversion in algal mass culture. **Biotechnology and Bioengineering,** vol. 30, p. 970-977, 1987.

SUKENIK, A.; LEVY, R.S.; LEVY, Y.; FALKOWSKI, P.G.; DUBINSKY, Z. Optimizing algal biomass in an outdoor pond: a simulation model. **Journal of Applied Phycology**, vol. 3, p. 191-201, 1991.

TAKAHASHI, F. **Desenvolvimento de ferramentas computacionais para análise emergética de sistemas agrícolas**. 2007. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

TOMASELLI, L. The Microalgal Cell. In: RICHMOND, A. (editor). **Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology**. New York: Blackwell Publishing Ltd, 2004. p. 3-18.

TRAVIESO, L.; HALL, D.O.; RAO, K.K.; BENÍTEZ, F.; SÁNCHEZ, E.; BORJA, R. A helical tubular fotobioreactor producing *Spirulina* in a semicontinuous mode. **International Biodeterioration and Biodegradation**, vol.47, p. 151-155, 2001.

TREDICI, M.R. Mass production of microalgae: Photobioreactors. In: RICHMOND, A. (editor). **Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology**. New York: Blackwell Publishing Ltd, 2004. p. 178-212.

ULGIATI, S.; BROWN, M.T.; BASTIANONI, S.; MARCHETTINI, N. Emergy-based indices and ratios to evaluate the sustainable use of resources. **Ecological Engineering**, vol. 5, p. 519-531, 1995.

ULGIATI, S.; ODUM, H.T.; BASTIANONI, S. Emergy use, environmental loading and sustainability: An emergy analysis of Italy. **Ecological Modelling**, vol. 73, p. 215-268, 1994.

VAISHAMPAYAN, A.; SINHA, R.P.; HÄDER, D.P.; DEY, T.; GUPTA, A.K.; BHAN, U.; RAO, A.L. Cyanobacterial biofertilizers in rice agriculture.**The Botanical Review**, vol. 67, n. 4, p. 453-516, 2001.

VALYI, R.; ORTEGA, E. Emergy Simulator, an open source simulation platform dedicated to systems ecology and emergy studies. In: ORTEGA, E.; ULGIATI, S. (editores): **Proceedings of the IV Biennial International Workshop "Advances in Energy Studies",** 2004, Campinas. Campinas: Unicamp, p.349-360.

VASTEMAN, V.; ROOMAN, M.; BOGAERTS, P. A robust method for the joint estimation of yield coefficients and kinetic parameters in bioprocess models. **Biotechnology Progress**, vol. 25, n. 3, p. 606-618, 2009.

VOET, D.; VOET, J.G. **Biochemistry**. New York: John Wiley & Sons, 1995, 1361 p.

VONSHAK, A,; ABELIOVITCH, A.; BOUSSIBA, S.; ARAD, S.; RICHMOND, A. Production of *Spirulina* biomass: effects of environmental factors and population density. **Biomass**, vol. 2, p. 175-185, 1982.

VONSHAK, A.; RICHMOND, A. Mass production of the blue-green alga *Spirulina*: an overview. **Biomass**, vol. 15, p. 233-247, 1988.

WATANABE, Y.; HALL, D.O. Photosynthetic CO_2 conversion technologies using a photobioreactor incorporating microalgae – energy and material balances. **Energy Conversion Management**, vol. 37, n. 6-8, p. 1321-1326, 1996.

WATANABE, Y.; HALL, D.O. Photosynthetic CO_2 fixation technologies using a helical tubular bioreactor incorporating the filamentous cyanobacterium *Spirulina plutensis*. **Energy Conversion Management**, vol. 36, n. 6-9, p. 721-724, 1995.

WATANABE, Y.; SAIKI, H. Development of a photobioreactor incorporating *Chlorella* sp. for removal of CO_2 in stack gas. **Energy Conversion and Management**, vol. 38, (suplemento), p. S499-S503, 1997.

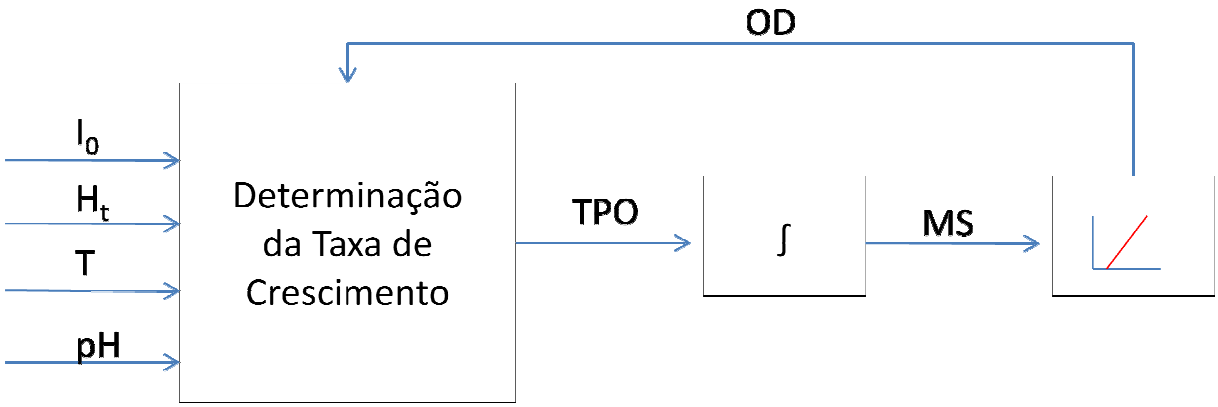
WEISSMAN, J.C.; GOEBEL, R.P. Photobioreactor design: mixing, carbon utilization, and oxygen accumulation. **Biotechnology and Bioengineering**, vol. 31, p. 336-344, 1988.

WOLFE, J.R.; ZWEIG, R. D.; ENGSTROM, D. G. A computer simulation model of the solar-algae pond ecosystem. **Ecological Modelling**, vol. 34, n. 1-2, p. 1-59, 1986.

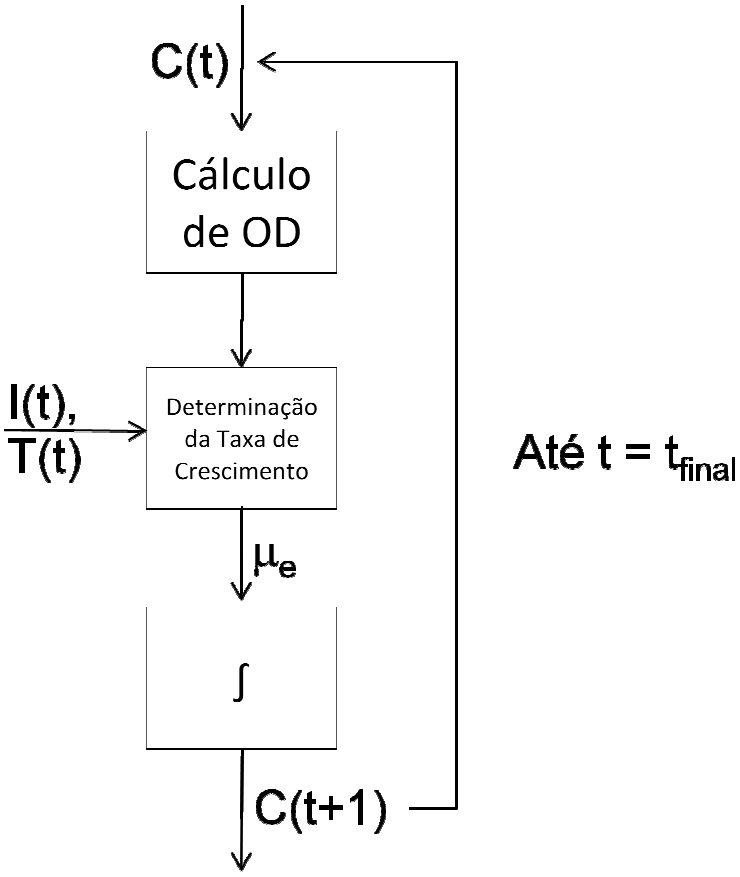
YUN, Y.S.; PARK, J.M. Kinetic modeling of the light-dependent photosynthetic activity of the green microalga *Chlorella vulgaris*. **Biotechnology and Bioengineering**, vol. 83, n. 3, p. 303-311, 2003.

Apêndice 1: Fluxogramas e detalhamento do modelo

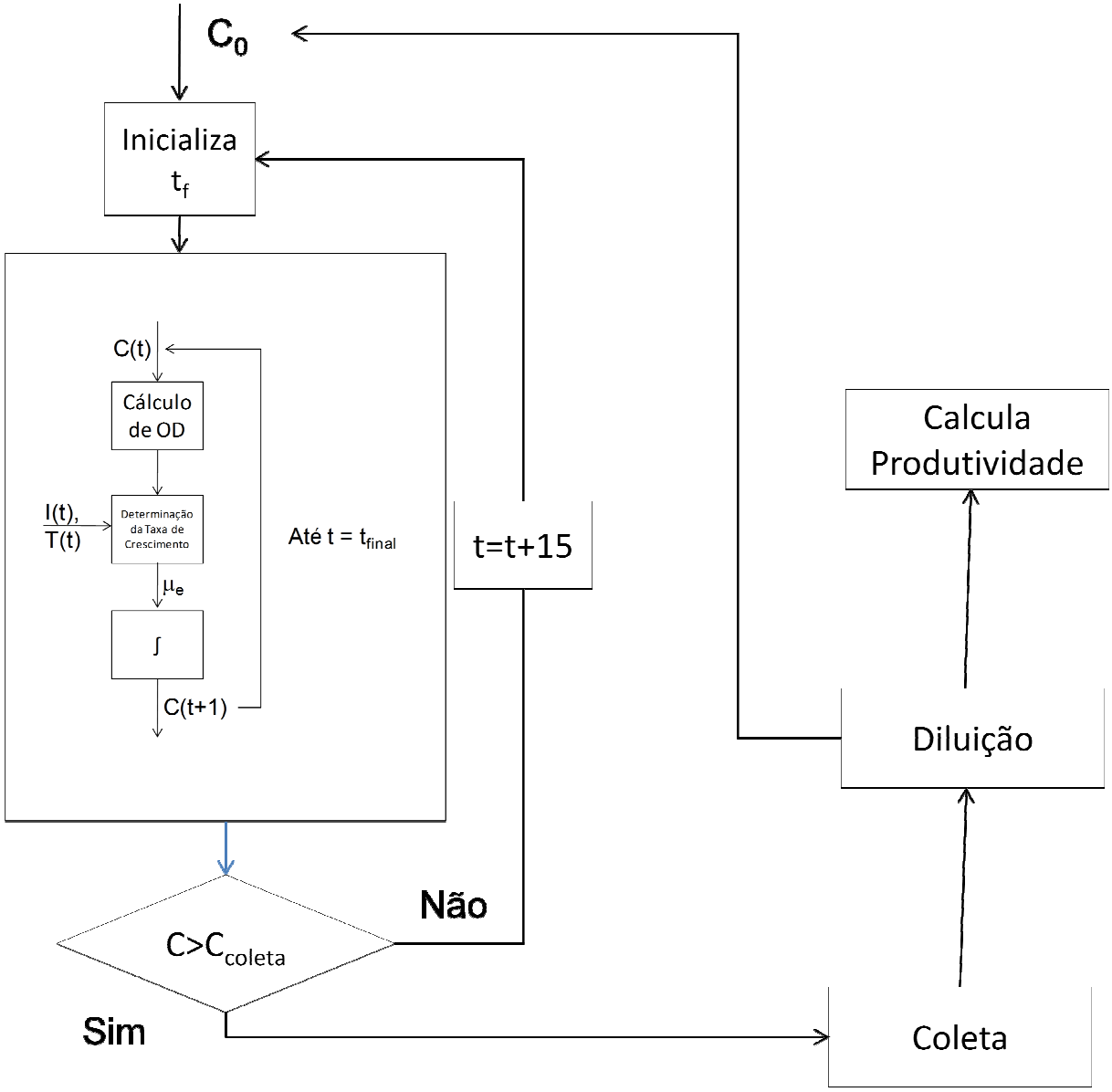
Diagrama de blocos para modelo de Guterman, Vonshak e Ben-Yaakov (1990)



Fluxograma de implementação do modelo em MATLAB



Fluxograma para estudo de produtividade e efeito de coleta e diluição



Apêndice 2: Balanços de Massa

Sistema de Referência

Tanques

Entradas			Saídas		
CO2	72.600	ton ano-1			
Meio rep	41.250.269	ton ano-1	Meio	*41.250.000*	ton ano-1
Água	41.030.075	ton ano-1	**Água**	41.039.539	ton ano-1
Nutrientes	220.194	ton ano-1	**Nutrientes**	169.211	ton ano-1
			Biomassa	41.250	ton ano-1
			O2	72.869	ton ano-1
Água Evaporação	6.600.000	ton ano-1	**Evaporação**	6.600.000	ton ano-1
	47.922.869	ton ano-1		47.922.869	ton ano-1

Coleta

Entradas			Saídas		
Meio	*41.250.000*	ton ano-1	Concentrado	178.125	
Água	41.039.539	ton ano-1	**Água**	138.938	ton ano-1
Nutrientes	169.211	ton ano-1	**Nutrientes**	573	ton ano-1
Biomassa	41.250	ton ano-1	**Biomassa**	39.188	ton ano-1
			Meio	41.069.240	
			Água	40.900.602	ton ano-1
			Nutrientes	168.638	ton ano-1
			Biomassa	2.063	
Lavagem			Lavagem		
Água	-	ton ano-1	**Água**		ton ano-1
			Nutrientes		ton ano-1
			Biomassa		ton ano-1
	41.250.000	ton ano-1		41.250.000	

Reposição do Meio

Entradas			Saídas		
Água	47.630.075	ton ano-1	Meio de Reposição		
Reciclo	40.900.602	ton ano-1	**Água**	47.630.075	
Água adicional	6.729.473	ton ano-1	**Nutrientes**	220.194	
Nutrientes	220.194	ton ano-1			
Reciclo	168.638	ton ano-1			
Reposição	51.556	ton ano-1			
	47.850.269			47.850.269	

Secador

Entradas			Saídas		
Torta	178.698	ton ano-1	Biomassa Seca	41.250	ton ano-1
Água	138.938	ton ano-1	**Água**	1.490	ton ano-1
Nutrientes	573	ton ano-1	**Nutrientes**	573	ton ano-1
Biomassa	39.188	ton ano-1	**Biomassa**	39.188	ton ano-1
			Vapor/Agua	137.448	ton ano-1
	178.698	ton ano-1		178.698	ton ano-1

Extrator

Entradas			Saídas		
Biomassa Seca	41.250	ton ano-1	Fase orgânica	48.886	ton ano-1
Água	1.490	ton ano-1	**Hexano**	39.188	ton ano-1
Nutrientes	573	ton ano-1	**Óleo**	9.699	ton ano-1
Biomassa	39.188	ton ano-1			
			Água	1.490	ton ano-1
Hexano	41.250	ton ano-1	**Nutrientes**	573	ton ano-1
			Biomassa	29.489	ton ano-1
			Hexano	2.063	ton ano-1
	82.500	ton ano-1		82.500	ton ano-1

Recuperação de Solvente

Entradas			Saídas		
Fase orgânica	48.886	ton ano-1	**Hexano**	39.188	ton ano-1
Hexano	39.188	ton ano-1			
Óleo	9.699	ton ano-1	**Óleo**	9.699	ton ano-1
	48.886	ton ano-1		48.886	ton ano-1

Acabamento

Entradas			Saídas		
Água	1.490		**Hexano**	2.063	ton ano-1
Nutrientes	573	ton ano-1			
Biomassa	29.489	ton ano-1	Biomassa		
Hexano	2.063	ton ano-1	**Água**	1.490	ton ano-1
			Nutrientes	573	ton ano-1
			Biomassa	29.489	ton ano-1
	33.614	ton ano-1		33.614	ton ano-1

Balanço Global

Entradas			Saídas		
CO2	**72.600**	ton ano-1	**O2**	72.869	ton ano-1
Agua	**6.729.473**	ton ano-1	**Agua (evaporação)**	6.739.448	ton ano-1
Nutrientes	**51.556**	ton ano-1	**Biomassa seca**	31.551	ton ano-1
Hexano	**2.063**	ton ano-1	Água	1.490	ton ano-1
			Nutrientes	573	ton ano-1
			Biomassa	29.489	ton ano-1
			Hexano	2.063	ton ano-1
			Óleo	9.699	ton ano-1
	6.855.692	ton ano-1		6.855.630	ton ano-1
		Fechamento	0,001%		

http://www.eia.gov/dnav/ng/ng_pri_sum_dcu_STX_m.htm

Energia	0,07	$0,16		
	Eletricidade / kWh ano-1	**Gás Natural / m3 ano-1**		
Tanque Nutrientes	**885.000**		*1770 kWh ha-1 ano-1*	Bennemann e Oswald, 1996
Bombeamento CO2	**9.385.000**		*18770 kWh ha-1 ano-1 (queima), 10460 (puro)*	Bennemann e Oswald, 1996
Bombeamento Água	**2.865.000**		*5730 kWh ha-1 ano-1*	Bennemann e Oswald, 1996
Tanques Cultura	**5.375.000**		*10750 kWh ha-1 ano-1*	Bennemann e Oswald, 1996
Centrífuga	**38.892.857**		Especificação equipamento Westfalia Decanter UCD 755 (GEA Mechanical Equipment US, Inc.)	
Secador	**348.480**	**12.843.897**	*Peters, Timmerhaus, West*	
Extração - Recuperação	**1.471.175**	**1.638.797**	*Pradhan et al. 2008, analogia soja*	
Remoção	**348.480**	**26.234**	*Peters, Timmerhaus, West*	
Total	**59.570.992**	**14.508.928**		
	$ 4.217.626	$ 2.254.463		

Apêndice 3: Planilhas de Análise Econômica e Emergética

Sistema de Referência

Investimento de Capital

	Equipamentos	Dimensão		Quantidade	Custo un.	Custo Total			Custo / ha
	Tanques de inóculo	1.000	m2	**2**	$ 2.898	**$ 5.796**	BENEMANN; OSWALD, 1996 - corrigido por inflação		$ 12
	Tanques abertos em pista	80.000	m2	**63**	$ 231.840	**$ 14.605.920**	BENEMANN; OSWALD, 1996 - corrigido por inflação		$ 29.212
	Total tanques de cultivo					**$ 14.611.716**			$ 29.223
	Tanque de Meio de Cultura	5.000	m3	**6**	$ 686.755	**$ 4.120.532**	aço 304	Peters, Timmerhaus, West, 2003	$ 8.241
	Tanque de Coleta	5.000	m3	**2**	$ 686.755	**$ 1.373.511**	aço 304	Peters, Timmerhaus, West, 2003	$ 2.747
	Tanque de Solvente	200	m3	**1**	$ 93.838	**$ 93.838**	aço 304	Peters, Timmerhaus, West, 2003	$ 188
	Extração e Recuperação			**1**	$ 1.163.224	**$ 1.163.224**	Cotação extrator soja 50 ton/dia. Fator de escala 0.6		$ 2.326
	Tanque de Estocagem de Óleo	200	m3	**2**	$ 93.838	**$ 187.677**	aço 304	Peters, Timmerhaus, West, 2003	$ 375
	Centrífuga			**41**	$ 325.581	**$ 13.348.816**	Peters, Timmerhaus, West, 2003		$ 26.698
	Secadoras			**2**	$ 201.970	**$ 403.940**	Peters, Timmerhaus, West, 2003		$ 808
1	**Total Equipamentos (MEC)**					**$ 20.691.537**			$ 41.383
2	Instalação	39%	MEC			**$ 8.069.699**	Peters, Timmerhaus, West, 2003		$ 16.139
3	Instrumentação e Controle	26%	MEC			**$ 5.379.800**	Peters, Timmerhaus, West, 2003		$ 10.760
4	Tubulação	31%	MEC			**$ 6.414.376**	Peters, Timmerhaus, West, 2003		$ 12.829
5	Elétrica	10%	MEC			**$ 2.069.154**	Peters, Timmerhaus, West, 2003		$ 4.138
6	Prédios	29%	MEC			**$ 6.000.546**	Peters, Timmerhaus, West, 2003		$ 12.001
7	Pátio	12%	MEC			**$ 2.482.984**	Peters, Timmerhaus, West, 2003		$ 4.966
8	Estrutura de serviços	55%	MEC			**$ 11.380.345**	Peters, Timmerhaus, West, 2003		$ 22.761
9	Engenharia e Supervisão	32%	MEC			**$ 6.621.292**	Peters, Timmerhaus, West, 2003		$ 13.243
10	Despesas de Construção	34%	MEC			**$ 7.035.123**	Peters, Timmerhaus, West, 2003		$ 14.070
11	Empreiteiro	19%	MEC			**$ 3.931.392**	Peters, Timmerhaus, West, 2003		$ 7.863
12	Contingência	37%	MEC			**$ 7.655.869**	Peters, Timmerhaus, West, 2003		$ 15.312
	Terreno	**600**	ha		$ 2.255	**$ 1.352.902**	Cotação, Texas, EUA, Julho 2011		$ 2.706
	Total Investimento Fixo					**$ 103.696.735**			**$ 207.393**
	Investimento total					**$ 103.696.735**			**$ 207.393**

Custos de Operação

				Custo				$ ha-1
CO2	72.600	ton ano-1	Balanço	50	$ ton-1	$	3.630.000	$ 7.260
Nutrientes	51.556	ton ano-1	Balanço	$ 242,84	$ ton-1	$	12.520.119	$ 25.040
Hexano	2.063	ton ano-1	Balanço	$ 1.145,00	$ ton-1	$	2.361.563	$ 4.723
Agua	6.729.473	ton ano-1	Balanço	0,0708		$	476.447	
Energia Elétrica	59.570.992	kWh ano-1	Balanço	0,0668	$ kWh-1	$	3.979.342	
Gás Natural	14.508.928	m3 ano-1	Balanço	$0,16	$ m-3	$	2.254.463	
Mão de obra operação						$	1.051.200	
Mão de obra supervisão		0,15	MO Op			$	157.680	
Manutenção		0,06	Cap Fixo			$	6.221.804	
Items de operação		0,15	Manutenção			$	933.271	
Laboratório		0,15	MO Op			$	157.680	
Custo Variável						**$**	**33.743.568**	
Impostos sobre propriedade		0,02	Cap Fixo			$	2.073.935	
Seguro		0,01	Cap Fixo			$	1.036.967	
Custo Fixo						**$**	**3.110.902**	
Extras, geral		0,6	MO, Sup, Man			$	4.458.410	
Custo de Produção						**$**	**41.312.881**	
Administração, Vendas e P&D		0,04	Receitas			$	977.146	
Custo total de produção, ex depreciação						**$**	**42.290.027**	

Receitas

				Valor				
CO2	72.600	ton ano-1	Balanço		$ ton-1	$	-	
Óleo	9.699	ton ano-1	Balanço	$ 1.255,67	$ ton-1	$	12.178.626	Chicago Soybean Oil Futures
Biomassa	31.551	ton ano-1	Balanço	$ 388,26	$ ton-1	$	12.250.028	Chicago Soybean Oil Futures
Especialidade		ton ano-1		$ 600.000,00	$ ton-1	$	-	Stephens et al.,2010
Total						**$**	**24.428.653**	

Planilha financeira (extrato dos primeiros 10 anos do projeto)

	Ano	10%								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Capital	$51.848.367	$51.848.367								
Receita			**$24.428.653**	**$24.428.653**	**$24.428.653**	**$24.428.653**	**$24.428.653**	**$24.428.653**	**$24.428.653**	**$24.428.653**
Custo de Produção	$0	$0	($42.290.027)	($42.290.027)	($42.290.027)	($42.290.027)	($42.290.027)	($42.290.027)	($42.290.027)	($42.290.027)
Depreciação	$0	$0	($10.369.673)	($10.369.673)	($10.369.673)	($10.369.673)	($10.369.673)	($10.369.673)	($10.369.673)	($10.369.673)
Custo Total	**$0**	**$0**	**($52.659.701)**	**($52.659.701)**	**($52.659.701)**	**($52.659.701)**	**($52.659.701)**	**($52.659.701)**	**($52.659.701)**	**($52.659.701)**
Margem Bruta	$0	$0	($28.231.047)	($28.231.047)	($28.231.047)	($28.231.047)	($28.231.047)	($28.231.047)	($28.231.047)	($28.231.047)
EBIT	$0	$0	($28.231.047)	($28.231.047)	($28.231.047)	($28.231.047)	($28.231.047)	($28.231.047)	($28.231.047)	($28.231.047)
IR (29%)	$0	$0	($8.187.004)	($8.187.004)	($8.187.004)	($8.187.004)	($8.187.004)	($8.187.004)	($8.187.004)	($8.187.004)
LUCRO - IR	$0	$0	($20.044.044)	($20.044.044)	($20.044.044)	($20.044.044)	($20.044.044)	($20.044.044)	($20.044.044)	($20.044.044)
Fluxo de Caixa	($51.848.367)	($51.848.367)	($9.674.370)	($9.674.370)	($9.674.370)	($9.674.370)	($9.674.370)	($9.674.370)	($9.674.370)	($9.674.370)

IRR	#DIV/0!	
VPL	($170)	MM

Análise emergética

Notas	Item	Unidade ano-1 (J, g, $)	Quantidade	Emergia Solar / Unidade (sej unidade-1)	Emergia Solar (sej ano-1)	% Total	Referência
	Recursos Naturais Renováveis						
1	Sol	J	2,59E+16	1,00E+00	2,59E+16	0,0%	Odum, 1996
2	Chuva	kg	5,31E+09	1,51E+08	8,02E+17	0,7%	Odum, 1996
3	Calor geotérmico	J	1,50E+13	1,01E+04	1,52E+17	0,1%	Odum, 1996
4	Água (Reposição)	kg	6,73E+09	1,25E+09	8,41E+18	7,4%	Brandt-Williams, 2002
	Recursos Não-renováveis						
	Materiais						
6	Nutrientes-Nitrogênio	kg	3,98E+06	2,41E+10	9,59E+16	0,1%	Brandt-Williams, 2002
7	Nutrientes-Fósforo	kg	8,43E+05	1,13E+10	9,53E+15	0,0%	Brandt-Williams, 2002
8	Concreto	kg	4,89E+05	9,26E+10	4,53E+16	0,0%	Bastianoni e Marchettini, 2000
9	Ferro - Construção	kg	7,14E+03	1,13E+13	8,06E+16	0,1%	Cavalett e Ortega, 2009
10	Aço - Tanques e Equipamentos	kg	6,24E+04	1,13E+13	7,05E+17	0,6%	Brandt-Williams, 2002
11	Hexano	kg	2,06E+06	6,08E+12	1,25E+19	11,0%	Odum, 2000
12	Eletricidade	J	2,14E+14	2,00E+05	4,29E+19	37,7%	Brandt-Williams, 2002
13	Gás natural	J	5,66E+14	4,35E+04	2,46E+19	21,7%	Bastianoni et al., 2009
	Serviços						
14	Trabalho humano	J	1,33E+10	1,24E+07	1,65E+17	0,1%	Brandt-Williams, 2002
15	Construção	$	1,55E+06	1,10E+12	1,70E+18	1,5%	Felix e Tilley, 2009
16	Serviços e externalidades	$	1,64E+07	1,10E+12	1,80E+19	15,8%	Felix e Tilley, 2009
17	Impostos, Taxas	$	3,11E+06	1,10E+12	3,42E+18	3,0%	Felix e Tilley, 2009
	Total do Processo				**1,14E+20**		
	Produtos e subprodutos						
	Biomassa	kg	3,16E+07				
18	Biomassa	J	5,36E+14				
	Óleo algal	kg	9,70E+06				
19	Óleo algal	J	3,25E+14				

Notas Para planta no Texas, EUA

Y	1,14E+20	sej ano-1
Ep	8,61E+14	J ano-1
Tr	1,32E+05	sej J-1
Tr	2,76E+12	sej kg-1
R (Naturais renováveis)	9,39E+18	sej ano-1
N (Naturais não renováveis)	0,00E+00	sej ano-1
M (Materiais)	8,10E+19	sej ano-1
S (Serviços)	2,33E+19	sej ano-1
I (Recursos na natureza)	9,39E+18	sej ano-1
F (Recursos da economia)	1,04E+20	sej ano-1
Receita	2,44E+07	$
% Renováveis	8,3%	
EYR	1,09	
EIR	11,10	
ELR	11,10	
SI	0,10	
EER	4,23	

1	**Radiação solar**					
	Insolação	1,65E+06	Wh m- 2 ano-1	Média anual para 22 anos		http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi
	Albedo	1,30E-01		Média anual para 22 anos		http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi
	Conversão	3,60E+03	J Wh-1			
	Energia de Insolação	5,17E+09	J m-2 ano-1			
	Área	5,00E+06	m2			
	Energia solar	2,59E+16	J ano-1			
2	**Chuva**					http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi
	Precipitação média	1,06E+03	mm ano-1		6,72E+02	
	Área	5,00E+06	m2		2,53E+07	m2
	Massa de chuva	5,31E+09	kg ano-1		1,70E+10	kg ano-1
		1,06E+03			6,72E+02	
3	**Calor Geotérmico**					
	Fluxo médio areal	3,00E+06	J m2 ano-1			Odum, 1996
	Área	5,00E+06	m2			
	Energia	1,50E+13	J ano-1			
4	**Água (Reposição)**					
	Fluxo de água de reposição	6,73E+09	kg ano-1			
5	**Nutrientes - Nitrogênio**					
	Teor de N no meio de cultura	7,72E-02	kg N kg Nutrientes Totais			
	Fluxo de Nutrientes	5,16E+04	ton ano-1			
	Fluxo de N	3,98E+06	kg N ano-1			
6	**Nutrientes - Potássio**					

Teor de P no meio de cultura	1,64E-02	kg P kg Nutrientes Totais
Fluxo de Nutrientes	5,16E+04	ton ano-1
Fluxo de P	8,43E+05	kg N ano-1

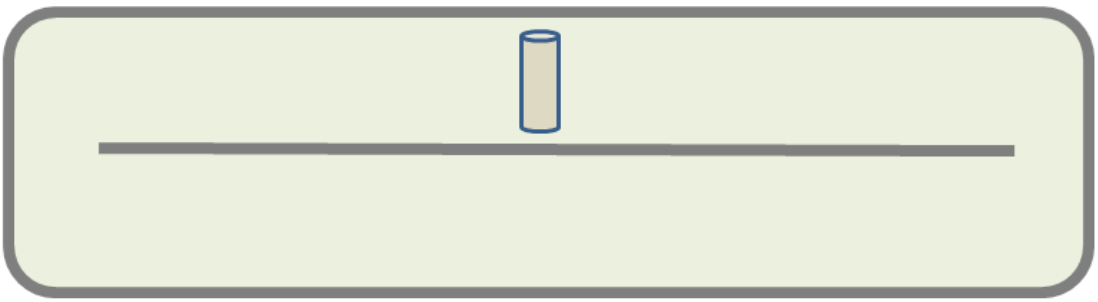
7	**Concreto**		
	Perímetro	1,52E+03	m
	Parede Interna	5,05E+02	m
	Total	2,02E+03	m
	Espessura	1,00E-01	m
	Altura	4,00E-01	m
	Volume	8,09E+01	m3
	Densidade	2,40E+03	kg m-3
	Massa de concreto por tanque	1,94E+05	kg concreto tanque -1
	N tanques	63	tanques
	Vida do projeto	25	anos
	Demanda de concreto	4,89E+05	kg concreto ano-1

Desenho simplificado do campo de cultura, para estimativa de materiais de construção.

Area 1 Tanque

8,00E+04	m2	L/C	0.20

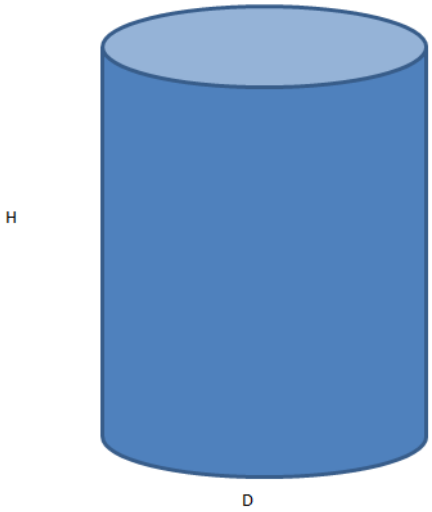
Comprimento	632	m
Largura	127	m



Perímetro	1517,164557	m	
Parede Interna	505	m	
Total	2023	m	
Espessura	0,1	m	
Altura	0,4	m	
Volume	80,9	m3	Concreto
Densidade	2400	kg m-3	
Massa	194.168	kg concreto tanque-1	

8	**Ferro**			
	Reforço de ferro no concreto	3,50E+01	kg m-3	Cavalett e Ortega, 2009
	Volume de concreto por tanque	8,09E+01	m3	
	N tanques	63	tanques	
	Vida do projeto	25	anos	
	Demanda de ferro	7,14E+03	kg ferro ano-1	
9	**Aço**			
	Alocação no Equipamento	1,00E-04	kg kg biomassa-1 ano-1	Cavalett e Ortega, 2009
	Massa extrator	1,03E+05	kg	
	Massa secadora	5,00E+04	kg	http://www.baker-rullman.com/Dehydration/index.html
	N secadores	2		
	Massa secadoras	1,00E+05	kg	
	Massa centrífuga	1,00E+04	kg	Estimativa a partir de modelos semelhantes de equipamentos
	N centrífugas	41		
	Massa total centrífugas	4,10E+05	kg	
	Massa aço em tanques 5,000 m3	1,56E+05	kg	
	N tanques grandes	8		
	Massa tanques 200 m3	1,82E+04		
	N tanques 200 m3	3		
	Massa total tanques	1,30E+06	kg	
	Massa total equipamentos	1,56E+06	kg	
	Vida do projeto	25	anos	
	Demanda de aço	6,24E+04	kg aço ano-1	

Desenho simplificado dos tanques, para estimativas de materiais de construção.



D	15,8	m		
H	25,4	m	H/D	1,6
Volume	5000			
Espessura	10	mm		
Espessura	0,01	m		
Area tampas	197,210473	m2		
Volume tampas	3,9	m3		
Area lateral	1262,14703	m2		
Volume lateral	12,6			
Volume total	16,6	m3		
Densidade aço	7.833	kg m-3		
Massa tanque gr	155.711	kg	+20%	
			Peters, Timmerhaus, West, 2003	

D	5,4	m		
H	8,7	m	H/D	1,6
Volume	200			
Espessura	10	mm		
Espessura	0,01	m		
Area tampas	23,0658769	m2		
Volume tampas	0,5	m3		
Area lateral	148	m2		
Volume lateral	1,5			
Volume total	1,9	m3		
Densidade aço	7.833	kg m-3		
Massa tanque gr	18.212	kg	+20%	
			Peters, Timmerhaus, West, 2003	

10	**Hexano**		
	Demanda de Hexano (balanço)	2,06E+03	ton ano-1
11	**Eletricidade**		
	Eletricidade	5,96E+07	kWh ano-1
	Conversão	3,60E+03	J Wh-1
	Total	2,14E+14	J ano-1
12	**Gás natural**		
	Quantidade	1,45E+07	m3 ano-1
	Conversão	3,90E+07	J m-3
	Demanda Gás Natural	5,66E+14	J ano-1
13	**Trabalho humano**		
	Total funcionários turno-1	3	
	Total supervisores	1	

	Horas de trabalho	25410	h ano-1
	Energia metamólica humana diária	1,26E+07	J dia-1
	Energia metamólica humana horária	5,25E+05	J h-1
	Energia total	1,33E+10	J ano-1
14	**Construção**		
	Total custos de construção	$38.693.174	
	Vida do projeto	25	anos
	Total Construção	$ 1.547.727	ano-1
14	**Serviços e externalidades**		
	Transporte CO2	$ 3.630.000	ano-1
	Manutenção	$ 6.221.804	ano-1
	Items de operação	$ 933.271	ano-1
	Laboratório	$ 157.680	ano-1
	Extras, geral	$ 4.458.410	ano-1
	Administração, Vendas e P&D	$ 977.146	ano-1
	Total Extras	$16.378.311	ano-1
15	**Impostos e Taxas**		
	Impostos sobre propriedade	$ 2.073.935	ano-1
	Seguro	$ 1.036.967	ano-1
	Total Impostos e Taxas	$ 3.110.902	ano-1
16	Biomassa		
	Densidade Energética	17	kJ g-1
	(Proteínas e Carboidratos)	1,70E+07	J kg-1
17	Óleo algal		
	Densidade energética	33,5	kJ g-1
	BASTIANONI et al., 2009	3,35E+07	J kg-1

Cenário Especialidade 1

Notas	Item	Unidade ano-1 (J, g, $)	Quantidade	Emergia Solar / Unidade (sej unidade-1)	Emergia Solar (sej ano-1)		Referência
	Recursos Naturais Renováveis						
1	Sol	J	2,59E+16	1,00E+00	2,59E+16	0,0%	Odum, 1996
2	Chuva	kg	5,31E+09	1,51E+08	8,02E+17	0,7%	Odum, 1996
3	Calor geotérmico	J	1,50E+13	1,01E+04	1,52E+17	0,1%	Odum, 1996
4	Água (Reposição)	kg	6,73E+09	1,25E+09	8,41E+18	7,4%	Brandt-Williams, 2002
	Recursos Não-renováveis						
	Materiais						
6	Nutrientes-Nitrogênio	kg	3,98E+06	2,41E+10	9,59E+16	0,1%	Brandt-Williams, 2002
7	Nutrientes-Fósforo	kg	8,43E+05	1,13E+10	9,53E+15	0,0%	Brandt-Williams, 2002
8	Concreto	kg	4,89E+05	9,26E+10	4,53E+16	0,0%	Bastianoni e Marchettini, 2000
9	Ferro - Construção	kg	7,14E+03	1,13E+13	8,06E+16	0,1%	Cavalett e Ortega, 2009
10	Aço - Tanques e Equipamentos	kg	6,24E+04	1,13E+13	7,05E+17	0,6%	Brandt-Williams, 2002
11	Hexano	kg	2,06E+06	6,08E+12	1,25E+19	11,0%	Odum, 2000
12	Eletricidade	J	2,14E+14	2,00E+05	4,29E+19	37,6%	Brandt-Williams, 2002
13	Gás natural	J	5,66E+14	4,35E+04	2,46E+19	21,6%	Bastianoni et al., 2009
	Serviços						
14	Trabalho humano	J	1,33E+10	1,24E+07	1,65E+17	0,1%	Brandt-Williams, 2002
15	Construção	$	1,59E+06	1,10E+12	1,75E+18	1,5%	Felix e Tilley, 2009
16	Serviços e externalidades	$	1,67E+07	1,10E+12	1,84E+19	16,1%	Felix e Tilley, 2009
17	Impostos, Taxas	$	3,18E+06	1,10E+12	3,50E+18	3,1%	Felix e Tilley, 2009
	Total do Processo				**1,14E+20**		
	Produtos e subprodutos						
	Biomassa	kg	3,16E+07				
18	Biomassa	J	5,36E+14				
	Óleo algal	kg	9,70E+06				
19	Óleo algal	J	3,25E+14				

Notas Para planta no Texas, EUA

Y	1,14E+20	sej ano-1	Y / sej ano-1
Ep	8,61E+14	J ano-1	Ep / J ano-1
Tr	1,33E+05	sej J-1	Tr / sej J-1
Tr	2,77E+12	sej kg-1	Tr / sej kg-1
R (Naturais renováveis)	9,39E+18	sej ano-1	R (Naturais renováveis) / sej ano-1
N (Naturais não renováveis)	0,00E+00	sej ano-1	N (Naturais não renováveis) / sej ano-1
M (Materiais)	8,10E+19	sej ano-1	M (Materiais) / sej ano-1
S (Serviços)	2,38E+19	sej ano-1	S (Serviços) / sej ano-1
I (Recursos na natureza)	9,39E+18	sej ano-1	I (Recursos na natureza) / sej ano-1
F (Recursos da economia)	1,05E+20	sej ano-1	F (Recursos da economia) / sej ano-1
Receita	2,63E+07	$	Receita / $
% Renováveis	8,2%		% Renováveis
EYR	1,09		EYR
EIR	11,16		EIR
ELR	11,16		ELR
SI	0,10		SI
EER	3,94		EER

1	**Radiação solar**					
	Insolação	1,65E+06	Wh m- 2 ano-1	Média anual para 22 anos		http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi
	Albedo	1,30E-01		Média anual para 22 anos		http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi
	Conversão	3,60E+03	J Wh-1			
	Energia de Insolação	5,17E+09	J m-2 ano-1			
	Área	5,00E+06	m2			
	Energia solar	2,59E+16	J ano-1			
2	**Chuva**					http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi
	Precipitação média	1,06E+03	mm ano-1		6,72E+02	
	Área	5,00E+06	m2		2,53E+07	m2
	Massa de chuva	5,31E+09	kg ano-1		1,70E+10	kg ano-1
		1,06E+03			6,72E+02	

3	**Calor Geotérmico**			
	Fluxo médio areal	3,00E+06	J m2 ano-1	Odum, 1996
	Área	5,00E+06	m2	
	Energia	1,50E+13	J ano-1	
4	**Água (Reposição)**			
	Fluxo de água de reposição	6,73E+09	kg ano-1	
5	**Nutrientes - Nitrogênio**			
	Teor de N no meio de cultura	7,72E-02	kg N kg Nutrientes Totais	
	Fluxo de Nutrientes	5,16E+04	ton ano-1	
	Fluxo de N	3,98E+06	kg N ano-1	
6	**Nutrientes - Potássio**			
	Teor de P no meio de cultura	1,64E-02	kg P kg Nutrientes Totais	
	Fluxo de Nutrientes	5,16E+04	ton ano-1	
	Fluxo de P	8,43E+05	kg N ano-1	
7	**Concreto**			
	Perímetro	1,52E+03	m	
	Parede Interna	5,05E+02	m	
	Total	2,02E+03	m	
	Espessura	1,00E-01	m	
	Altura	4,00E-01	m	
	Volume	8,09E+01	m3	
	Densidade	2,40E+03	kg m-3	
	Massa de concreto por tanque	1,94E+05	kg concreto tanque -1	
	N tanques	63	tanques	
	Vida do projeto	25	anos	
	Demanda de concreto	4,89E+05	kg concreto ano-1	
8	**Ferro**			
	Reforço de ferro no concreto	3,50E+01	kg m-3	Cavalett e Ortega, 2009
	Volume de concreto por tanque	8,09E+01	m3	
	N tanques	63	tanques	
	Vida do projeto	25	anos	
	Demanda de ferro	7,14E+03	kg ferro ano-1	
9	**Aço**			

	Alocação no Equipamento	1,00E-04	kg kg biomassa-1 ano-1	Cavalett e Ortega, 2009
	Massa extrator	1,03E+05	kg	
	Massa secadora	5,00E+04	kg	http://www.baker-rullman.com/Dehydration/index.html
	N secadores	2		
	Massa secadoras	1,00E+05	kg	
	Massa centrífuga	1,00E+04	kg	Estimativa a partir de modelos semelhantes de equipamentos
	N centrífugas	41		
	Massa total centrífugas	4,10E+05	kg	
	Massa aço em tanques 5,000 m3	1,56E+05	kg	
	N tanques grandes	8		
	Massa tanques 200 m3	1,82E+04		
	N tanques 200 m3	3		
	Massa total tanques	1,30E+06	kg	
	Massa total equipamentos	1,56E+06	kg	
	Vida do projeto	25	anos	
	Demanda de aço	6,24E+04	kg aço ano-1	
10	**Hexano**			
	Demanda de Hexano (balanço)	2,06E+03	ton ano-1	
11	**Eletricidade**			
	Eletricidade	5,96E+07	kWh ano-1	
	Conversão	3,60E+03	J Wh-1	
	Total	2,14E+14	J ano-1	
12	**Gás natural**			
	Quantidade	1,45E+07	m3 ano-1	
	Conversão	3,90E+07	J m-3	
	Demanda Gás Natural	5,66E+14	J ano-1	
13	**Trabalho humano**			
	Total funcionários turno-1	3		
	Total supervisores	1		
	Horas de trabalho	25410	h ano-1	
	Energia metamólica humana diária	1,26E+07	J dia-1	
	Energia metamólica humana horária	5,25E+05	J h-1	
	Energia total	1,33E+10	J ano-1	

14	**Construção**		
	Total custos de construção	$ 39.780.788	
	Vida do projeto	25	anos
	Total Construção	$ 1.591.232	ano-1
14	**Serviços e externalidades**		
	Transporte CO2	$ 3.630.000	ano-1
	Manutenção	$ 6.369.766	ano-1
	Itens de operação	$ 955.465	ano-1
	Laboratório	$ 157.680	ano-1
	Extras, geral	$ 4.547.188	ano-1
	Administração, Vendas e P&D	$ 1.053.434	ano-1
	Total Extras	$ 16.713.533	ano-1
15	**Impostos e Taxas**		
	Impostos sobre propriedade	$ 2.123.255	ano-1
	Seguro	$ 1.061.628	ano-1
	Total Impostos e Taxas	$ 3.184.883	ano-1
16	Biomassa		
	Densidade Energética	17	kJ g-1
	(Proteínas e Carboidratos)	1,70E+07	J kg-1
17	Óleo algal		
	Densidade energética	33,5	kJ g-1
	Bastianoni et al., 2009	3,35E+07	J kg-1

Cenário Especialidade 2

Notas	Item	Unidade ano-1 (J, g, $)	Quantidade	Emergia Solar / Unidade (sej unidade-1)	Emergia Solar (sej ano-1)		Referência
	Recursos Naturais Renováveis						
1	Sol	J	2,59E+16	1,00E+00	2,59E+16	0,0%	Odum, 1996
2	Chuva	kg	5,31E+09	1,51E+08	8,02E+17	0,7%	Odum, 1996
3	Calor geotérmico	J	1,50E+13	1,01E+04	1,52E+17	0,1%	Odum, 1996
4	Água (Reposição)	kg	6,73E+09	1,25E+09	8,41E+18	7,2%	Brandt-Williams, 2002
	Recursos Não-renováveis						
	Materiais						
6	Nutrientes-Nitrogênio	kg	3,98E+06	2,41E+10	9,59E+16	0,1%	Brandt-Williams, 2002
7	Nutrientes-Fósforo	kg	8,43E+05	1,13E+10	9,53E+15	0,0%	Brandt-Williams, 2002
8	Concreto	kg	4,89E+05	9,26E+10	4,53E+16	0,0%	Bastianoni e Marchettini, 2000
9	Ferro - Construção	kg	7,14E+03	1,13E+13	8,06E+16	0,1%	Cavalett e Ortega, 2009
10	Aço - Tanques e Equipamentos	kg	6,24E+04	1,13E+13	7,05E+17	0,6%	Brandt-Williams, 2002
11	Hexano	kg	2,06E+06	6,08E+12	1,25E+19	10,7%	Odum, 2000
12	Eletricidade	J	2,14E+14	2,00E+05	4,29E+19	36,8%	Brandt-Williams, 2002
13	Gás natural	J	5,66E+14	4,35E+04	2,46E+19	21,1%	Bastianoni et al., 2009
	Serviços						
14	Trabalho humano	J	1,33E+10	1,24E+07	1,65E+17	0,1%	Brandt-Williams, 2002
15	Construção	$	1,63E+06	1,10E+12	1,80E+18	1,5%	Felix e Tilley, 2009
16	Serviços e externalidades	$	1,89E+07	1,10E+12	2,08E+19	17,8%	Felix e Tilley, 2009
17	Impostos, Taxas	$	3,26E+06	1,10E+12	3,58E+18	3,1%	Felix e Tilley, 2009
	Total do Processo				**1,17E+20**		
	Produtos e subprodutos						
	Biomassa	kg	3,16E+07				
18	Biomassa	J	5,36E+14				
	Óleo algal	kg	9,70E+06				
19	Óleo algal	J	3,25E+14				

Notas Para planta no Texas, EUA

Y	1,17E+20	sej ano-1
Ep	8,61E+14	J ano-1
Tr	1,35E+05	sej J-1
Tr	2,83E+12	sej kg-1
R (Naturais renováveis)	9,39E+18	sej ano-1
N (Naturais não renováveis)	0,00E+00	sej ano-1
M (Materiais)	8,10E+19	sej ano-1
S (Serviços)	2,63E+19	sej ano-1
I (Recursos na natureza)	9,39E+18	sej ano-1
F (Recursos da economia)	1,07E+20	sej ano-1
Receita	7,39E+07	$
% Renováveis	8,0%	
EYR	1,09	
EIR	11,43	
ELR	11,43	
SI	0,10	
EER	1,43	

1 Radiação solar

Insolação	1,65E+06	Wh m- 2 ano-1	Média anual para 22 anos	http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi
Albedo	1,30E-01		Média anual para 22 anos	http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi
Conversão	3,60E+03	J Wh-1		
Energia de Insolação	5,17E+09	J m-2 ano-1		
Área	5,00E+06	m2		
Energia solar	2,59E+16	J ano-1		

2 Chuva http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi

Precipitação média	1,06E+03	mm ano-1	6,72E+02	
Área	5,00E+06	m2	2,53E+07	m2
Massa de chuva	5,31E+09	kg ano-1	1,70E+10	kg ano-1
	1,06E+03		6,72E+02	

3 Calor Geotérmico

	Fluxo médio areal	3,00E+06	J m2 ano-1	Odum, 1996
	Área	5,00E+06	m2	
	Energia	1,50E+13	J ano-1	
4	**Água (Reposição)**			
	Fluxo de água de reposição	6,73E+09	kg ano-1	
5	**Nutrientes - Nitrogênio**			
	Teor de N no meio de cultura	7,72E-02	kg N kg Nutrientes Totais	
	Fluxo de Nutrientes	5,16E+04	ton ano-1	
	Fluxo de N	3,98E+06	kg N ano-1	
6	**Nutrientes - Potássio**			
	Teor de P no meio de cultura	1,64E-02	kg P kg Nutrientes Totais	
	Fluxo de Nutrientes	5,16E+04	ton ano-1	
	Fluxo de P	8,43E+05	kg N ano-1	
7	**Concreto**			
	Perímetro	1,52E+03	m	
	Parede Interna	5,05E+02	m	
	Total	2,02E+03	m	
	Espessura	1,00E-01	m	
	Altura	4,00E-01	m	
	Volume	8,09E+01	m3	
	Densidade	2,40E+03	kg m-3	
	Massa de concreto por tanque	1,94E+05	kg concreto tanque -1	
	N tanques	63	tanques	
	Vida do projeto	25	anos	
	Demanda de concreto	4,89E+05	kg concreto ano-1	
8	**Ferro**			
	Reforço de ferro no concreto	3,50E+01	kg m-3	Cavalett e Ortega, 2009
	Volume de concreto por tanque	8,09E+01	m3	
	N tanques	63	tanques	
	Vida do projeto	25	anos	
	Demanda de ferro	7,14E+03	kg ferro ano-1	
9	**Aço**			
	Alocação no Equipamento	1,00E-04	kg kg biomassa-1 ano-1	Cavalett e Ortega, 2009
	Massa extrator	1,03E+05	kg	
	Massa secadora	5,00E+04	kg	http://www.baker-rullman.com/Dehydration/index.html

	N secadores	2		
	Massa secadoras	1,00E+05	kg	
	Massa centrífuga	1,00E+04	kg	Estimativa a partir de modelos semelhantes de equipamentos
	N centrífugas	41		
	Massa total centrífugas	4,10E+05	kg	
	Massa aço em tanques 5,000 m3	1,56E+05	kg	
	N tanques grandes	8		
	Massa tanques 200 m3	1,82E+04		
	N tanques 200 m3	3		
	Massa total tanques	1,30E+06	kg	
	Massa total equipamentos	1,56E+06	kg	
	Vida do projeto	25	anos	
	Demanda de aço	6,24E+04	kg aço ano-1	
10	**Hexano**			
	Demanda de Hexano (balanço)	2,06E+03	ton ano-1	
11	**Eletricidade**			
	Eletricidade	5,96E+07	kWh ano-1	
	Conversão	3,60E+03	J Wh-1	
	Total	2,14E+14	J ano-1	
12	**Gás natural**			
	Quantidade	1,45E+07	m3 ano-1	
	Conversão	3,90E+07	J m-3	
	Demanda Gás Natural	5,66E+14	J ano-1	
13	**Trabalho humano**			
	Total funcionários turno-1	3		
	Total supervisores	1		
	Horas de trabalho	25410	h ano-1	
	Energia metamólica humana diária	1,26E+07	J dia-1	
	Energia metamólica humana horária	5,25E+05	J h-1	
	Energia total	1,33E+10	J ano-1	
14	**Construção**			
	Total custos de construção	$ 40.868.403		
	Vida do projeto	25	anos	
	Total Construção	$ 1.634.736	ano-1	
14	**Serviços e externalidades**			
	Transporte CO2	$ 3.630.000	ano-1	
	Manutenção	$ 6.517.728	ano-1	

	Itens de operação	$ 977.659	ano-1
	Laboratório	$ 157.680	ano-1
	Extras, geral	$ 4.635.965	ano-1
	Administração, Vendas e P&D	$ 2.957.146	ano-1
	Total Extras	$ 18.876.179	ano-1
15	**Impostos e Taxas**		
	Impostos sobre propriedade	$ 2.172.576	ano-1
	Seguro	$ 1.086.288	ano-1
	Total Impostos e Taxas	$ 3.258.864	ano-1
16	Biomassa		
	Densidade Energética	17	kJ g-1
	(Proteínas e Carboidratos)	1,70E+07	J kg-1
17	Óleo algal		
	Densidade energética	33,5	kJ g-1
	Bastianoni et al., 2009	3,35E+07	J kg-1

Cenário Integração com Usina de Cana-de-Açúcar

Notas	Item	Unidade ano-1 (J, g, $)	Quantidade	Emergia Solar / Unidade (sej unidade-1)	Emergia Solar (sej ano-1)		Referência
	Recursos Naturais Renováveis						
1	Sol	J	2,59E+16	1,00E+00	2,59E+16	0,0%	Odum, 1996
2	Chuva	kg	5,31E+09	1,51E+08	8,02E+17	0,5%	Odum, 1996
3	Calor geotérmico	J	1,50E+13	1,01E+04	1,52E+17	0,1%	Odum, 1996
4	Água (Reposição)	kg	6,73E+09	1,25E+09	8,41E+18	5,3%	Brandt-Williams, 2002
	Recursos Não-renováveis						
	Materiais						
6	Nutrientes-Nitrogênio	kg	3,98E+06	2,41E+10	9,59E+16	0,1%	Brandt-Williams, 2002
7	Nutrientes-Fósforo	kg	8,43E+05	1,13E+10	9,53E+15	0,0%	Brandt-Williams, 2002
8	Concreto	kg	4,89E+05	9,26E+10	4,53E+16	0,0%	Bastianoni e Marchettini, 2000
9	Ferro - Construção	kg	7,14E+03	1,13E+13	8,06E+16	0,1%	Cavalett e Ortega, 2009
10	Aço - Tanques e Equipamentos	kg	6,24E+04	1,13E+13	7,05E+17	0,4%	Brandt-Williams, 2002
11	Hexano	kg	2,06E+06	6,08E+12	1,25E+19	7,8%	Odum, 2000
12	Eletricidade	J	1,99E+14	2,00E+05	3,99E+19	24,9%	Brandt-Williams, 2002
13	Bagaço	J	5,34E+14	1,44E+05	7,71E+19	48,2%	Bastianoni et al., 2009
	Serviços						
14	Trabalho humano	J	1,33E+10	1,24E+07	1,65E+17	0,1%	Brandt-Williams, 2002
15	Construção	$	1,55E+06	1,10E+12	1,70E+18	1,1%	Felix e Tilley, 2009
16	Serviços e externalidades	$	1,33E+07	1,10E+12	1,47E+19	9,2%	Felix e Tilley, 2009
17	Impostos, Taxas	$	3,28E+06	1,10E+12	3,60E+18	2,3%	Felix e Tilley, 2009
	Total do Processo				**1,60E+20**		
	Produtos e subprodutos						
	Biomassa	kg	3,16E+07				
18	Biomassa	J	5,36E+14				
	Óleo algal	kg	9,70E+06				
19	Óleo algal	J	3,25E+14				

Notas Para planta no Texas, EUA

Y	1,60E+20	sej ano-1
Ep	8,61E+14	J ano-1
Tr	1,86E+05	sej J-1
Tr	3,88E+12	sej kg-1
R (Naturais renováveis)	9,39E+18	sej ano-1
N (Naturais não renováveis)	0,00E+00	sej ano-1
M (Materiais)	1,30E+20	sej ano-1
S (Serviços)	2,01E+19	sej ano-1
I (Recursos na natureza)	9,39E+18	sej ano-1
F (Recursos da economia)	1,51E+20	sej ano-1
Receita	2,44E+07	$
% Renováveis	5,9%	
EYR	1,06	
EIR	16,03	
ELR	16,03	
SI	0,07	
EER	5,95	

1 Radiação solar

Insolação	1,65E+06	Wh m- 2 ano-1	Média anual para 22 anos	http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi
Albedo	1,30E-01		Média anual para 22 anos	http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi
Conversão	3,60E+03	J Wh-1		
Energia de Insolação	5,17E+09	J m-2 ano-1		
Área	5,00E+06	m2		
Energia solar	2,59E+16	J ano-1		

2 Chuva http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi

Precipitação média	1,06E+03	mm ano-1	6,72E+02	
Área	5,00E+06	m2	2,53E+07	m2
Massa de chuva	5,31E+09	kg ano-1	1,70E+10	kg ano-1

		1,06E+03		6,72E+02	
3	**Calor Geotérmico**				
	Fluxo médio areal	3,00E+06	J m2 ano-1		Odum, 1996
	Área	5,00E+06	m2		
	Energia	1,50E+13	J ano-1		
4	**Água (Reposição)**				
	Fluxo de água de reposição	6,73E+09	kg ano-1		
5	**Nutrientes - Nitrogênio**				
	Teor de N no meio de cultura	7,72E-02	kg N kg Nutrientes Totais		
	Fluxo de Nutrientes	5,16E+04	ton ano-1		
	Fluxo de N	3,98E+06	kg N ano-1		
6	**Nutrientes - Potássio**				
	Teor de P no meio de cultura	1,64E-02	kg P kg Nutrientes Totais		
	Fluxo de Nutrientes	5,16E+04	ton ano-1		
	Fluxo de P	8,43E+05	kg N ano-1		
7	**Concreto**				
	Perímetro	1,52E+03	m		
	Parede Interna	5,05E+02	m		
	Total	2,02E+03	m		
	Espessura	1,00E-01	m		
	Altura	4,00E-01	m		
	Volume	8,09E+01	m3		
	Densidade	2,40E+03	kg m-3		
	Massa de concreto por tanque	1,94E+05	kg concreto tanque -1		
	N tanques	63	tanques		
	Vida do projeto	25	anos		
	Demanda de concreto	4,89E+05	kg concreto ano-1		
8	**Ferro**				
	Reforço de ferro no concreto	3,50E+01	kg m-3	Cavalett e Ortega, 2009	
	Volume de concreto por tanque	8,09E+01	m3		
	N tanques	63	tanques		
	Vida do projeto	25	anos		
	Demanda de ferro	7,14E+03	kg ferro ano-1		
9	**Aço**				
	Alocação no Equipamento	1,00E-04	kg kg biomassa-1 ano-1	Cavalett e Ortega, 2009	
	Massa extrator	1,03E+05	kg		

	Massa secadora	5,00E+04	kg	http://www.baker-rullman.com/Dehydration/index.html
	N secadores	2		
	Massa secadoras	1,00E+05	kg	
	Massa centrífuga	1,00E+04	kg	Estimativa a partir de modelos semelhantes de equipamentos
	N centrífugas	41		
	Massa total centrífugas	4,10E+05	kg	
	Massa aço em tanques 5,000 m3	1,56E+05	kg	
	N tanques grandes	8		
	Massa tanques 200 m3	1,82E+04		
	N tanques 200 m3	3		
	Massa total tanques	1,30E+06	kg	
	Massa total equipamentos	1,56E+06	kg	
	Vida do projeto	25	anos	
	Demanda de aço	6,24E+04	kg aço ano-1	
10	**Hexano**			
	Demanda de Hexano (balanço)	2,06E+03	ton ano-1	
11	**Eletricidade**			
	Eletricidade	5,54E+07	kWh ano-1	
	Conversão	3,60E+03	J Wh-1	
	Total	1,99E+14	J ano-1	
12	**Bagaço**			
	Quantidade	9,54E+04	ton bagaço ano-1	
	Conversão	5,60E+09	J ton-1 bagasso	
	Bagaço (Energia)	5,34E+14	J ano-1	
13	**Trabalho humano**			
	Total funcionários turno-1	3		
	Total supervisores	1		
	Horas de trabalho	25410	h ano-1	
	Energia metamólica humana diária	1,26E+07	J dia-1	
	Energia metamólica humana horária	5,25E+05	J h-1	
	Energia total	1,33E+10	J ano-1	
14	**Construção**			
	Total custos de construção	$ 38.693.174		
	Vida do projeto	25	anos	
	Total Construção	$ 1.547.727	ano-1	
14	**Serviços e externalidades**			
	Transporte CO2	$ -	ano-1	

	Manutenção	$ 6.552.061	ano-1
	Itens de operação	$ 982.809	ano-1
	Laboratório	$ 157.680	ano-1
	Extras, geral	$ 4.656.564	ano-1
	Administração, Vendas e P&D	$ 977.146	ano-1
	Total Extras	$ 13.326.260	ano-1
15	**Impostos e Taxas**		
	Impostos sobre propriedade	$ 2.184.020	ano-1
	Seguro	$ 1.092.010	ano-1
	Total Impostos e Taxas	$ 3.276.030	ano-1
16	Biomassa		
	Densidade Energética	17	kJ g-1
	(Proteínas e Carboidratos)	1,70E+07	J kg-1
17	Óleo algal		
	Densidade energética	33,5	kJ g-1
	Bastianoni et al., 2009	3,35E+07	J kg-1