

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE QUÍMICA

ADRIANO MADEIRA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REMOÇÃO DE NITROGÊNIO (N) E FÓSFORO
(P) DO ESGOTO DOMÉSTICO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS -
ETE SERRARIA (PORTO ALEGRE, RS) E CONCOMITANTE PRODUÇÃO DE
MICROALGAS PARA OBTENÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS**

Porto Alegre, junho de 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE QUÍMICA

ADRIANO MADEIRA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE REMOÇÃO DE NITROGÊNIO (N) E FÓSFORO
(P) DO ESGOTO DOMÉSTICO NA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS -
ETE SERRARIA (PORTO ALEGRE, RS) E CONCOMITANTE PRODUÇÃO DE
MICROALGAS PARA OBTENÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS**

Monografia apresentada para a atividade
de “Projeto Tecnológico” do Curso de
Química Industrial da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Alexandre Hahn Englert
(Orientador na UFRGS)

Porto Alegre, junho de 2014

Agradeço ao meu orientador pela atenção e dedicação no desenvolvimento deste projeto, aos colegas do Dmae que contribuíram com ideias e também fornecendo os dados necessários para a proposta tecnológica e a minha mãe por compreender os vários momentos em que estive ausente durante o semestre.

"Se você tem metas para um ano, plante arroz. Se você tem metas para 10 anos, plante uma árvore. Se você tem metas para 100 anos, então eduque uma criança. Se você tem metas para 1000 anos, então preserve o meio ambiente."

Confúcio

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS.....	8
RESUMO.....	9
1. INTRODUÇÃO	10
2. ESTADO DA ARTE	12
2.1. Tratamento de esgotos municipais	12
2.1.1. Remoção de nitrogênio e fósforo	13
2.1.2. Legislação ambiental aplicada a esgotos.....	16
2.1.2.1. Resolução CONAMA N° 430/2011	16
2.1.2.2. Resolução CONSEMA N° 276/2013.....	16
2.2. Produção de biocombustíveis a partir de microalgas	16
2.2.1. Produção de biodiesel a partir de microalgas.....	18
2.2.2. Sistemas para cultivo de microalgas	19
2.2.3. Seleção das microalgas e potencial de produção de biomassa	21
2.2.4. Condições para o cultivo de microalgas.....	22
2.2.4.1. Condições autotróficas.....	22
2.2.4.2. Condições heterotróficas.....	23
2.2.4.3. Condições mixotróficas	23
2.2.4.4. Condições fotoheterotróficas.....	24
2.2.5. Métodos para colheita de microalgas.....	24
2.2.5.1. Métodos químicos	25
2.2.5.2. Métodos físicos	25
2.2.6. Cultivo de microalgas em esgotos domésticos.....	26
2.2.7. Extração de lipídios das microalgas	28
2.2.8. Produção de biocombustíveis	29
3. SITUAÇÃO ATUAL	30
3.1. Processo de tratamento de esgoto da ETE Serraria	30
4. OBJETIVOS	33
5. METODOLOGIA.....	34
6. PROPOSTA TECNOLÓGICA.....	35
6.1. Custos para produção de lipídios e biodiesel	35
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
7.1. Potencial de remoção de nitrogênio e fósforo	36
7.2. Potencial de produção de biodiesel e estimativa de custos.....	38
8. CONCLUSÃO CRÍTICA	40
9. BIBLIOGRAFIA.....	41

LISTA DE ABREVIATURAS

ATS	Algal Turf Scrubber
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DMAE	Departamento Municipal de Água e Esgotos
DOE	Departamento de Energia dos Estados Unidos
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
FAD	Flotação por Ar Dissolvido
GATE	Gerência de Gestão Ambiental e Tratamento de Esgoto
HRAP	High Rate Algal Pond
NREL	National Renewable Energy Laboratory
NTK	Nitrogênio Total Kjeldahl
PISA	Programa Integrado Socioambiental
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
UNT	Unidade Nefelométrica de Turbidez

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Reação para produção de biodiesel a partir de triglicerídeos.....	18
Figura 2. Esquema de lagoa tipo “ <i>raceway</i> ” para produção de microalgas.....	19
Figura 3. Esquema produtivo baseado no cultivo de microalgas para aprimoramento da remoção de nutrientes de uma ETE e geração de subprodutos com maior valor econômico.....	29
Figura 4. Esquema representativo (vista superior) da ETE Serraria.....	31
Figura 5. Representação de um sistema “ <i>Unitank</i> ” avançado.....	31
Figura 6. Tanque de lodo ativado com aeração (Unitank) da ETE Serraria.....	32
Figura 7. Detalhe das lamelas que auxiliam na decantação no Unitank da ETE Serraria.....	32
Figura 8. Resultados de nitrogênio total do afluente UASB e efluente Unitank da ETE Serraria.....	37
Figura 9. Resultados de fósforo total do afluente e efluente UASB e efluente Unitank da ETE Serraria.....	37
Figura 10. Vazão do esgoto afluente na ETE Serraria.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Espécies predominantes de nitrogênio no meio ambiente.....	14
Tabela 2. Concentrações de N e P em esgotos domésticos no Brasil.....	15
Tabela 3. Comparação de microalgas com outras fontes de biodiesel.....	17
Tabela 4. Comparativo entre os fotobiorreatores e lagoas abertas para o cultivo de microalgas.....	20
Tabela 5. Características desejáveis em microalgas para produção de biomassa.....	21
Tabela 6. Conteúdo lipídico e produtividade de diferentes espécies de microalgas....	22
Tabela 7. Comparação entre as condições para cultivo de microalgas para obtenção de biocombustíveis.....	24
Tabela 8. Comparativo entre diferentes coagulantes e floculantes para a colheita de <i>Chlorella vulgaris</i> cultivada em esgotos.....	25
Tabela 9. Remoção de nutrientes e produtividades lipídicas de diferentes microalgas em diferentes tipos de esgotos domésticos.....	28
Tabela 10. Valores médios de parâmetros característicos do esgoto da ETE Serraria nos meses de abril e maio de 2014.....	36

RESUMO

O presente trabalho apresenta um estudo sobre o potencial de produção de biodiesel a partir da biomassa de microalgas cultivadas durante o tratamento do esgoto na Estação de Tratamento de Esgotos (ETE) Serraria (Porto Alegre, RS), com concomitante remoção de nitrogênio e fósforo. A ETE Serraria, cuja operação iniciou em 12/03/14, está localizada na zona sul de Porto Alegre, apresentando grande capacidade de tratamento de esgotos domésticos. O processo de tratamento de esgotos da ETE Serraria é baseado nos reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB) e tanques de lodo ativado (Unitank), alcançando uma alta eficiência na remoção de matéria orgânica e outros contaminantes.

O estudo para a elaboração do projeto foi baseado em resultados experimentais, encontrados em artigos científicos, referentes à produção de biocombustíveis, principalmente biodiesel, a partir de microalgas com concomitante redução de nitrogênio e fósforo de esgotos municipais. Ainda, foi realizada uma avaliação da situação atual do tratamento do esgoto na ETE Serraria para verificar seu potencial produtivo e apresentar uma proposta tecnológica de cultivo de microalgas no esgoto secundário da ETE em estudo. A técnica de cultivo de microalgas em lagoas de alta taxa (*High Rate Algal Pond ou HRAP*), utilizando espécies como *Chlorella*, *Micractinum* e *Actinastrum*, e a metodologia de colheita através da flotação por ar dissolvido (FAD), foram definidas como as melhores alternativas para o esgoto doméstico secundário característico da ETE Serraria.

PALAVRAS-CHAVE: microalgas, biocombustíveis, esgotos domésticos, nutrientes.

1. INTRODUÇÃO

A produção sustentável de energia renovável tem sido amplamente discutida, tendo em vista o acelerado desenvolvimento das atividades humanas, principalmente as domésticas. Acredita-se que, com o desenvolvimento de novas economias em crescimento como a Índia, China e Brasil, o consumo global de energia aumente e leve a maiores danos ao meio ambiente. Nesse sentido, a demanda por combustíveis fósseis tende a aumentar de forma a suprir as necessidades de produção, com as justificativas de baixo custo e atual disponibilidade. Contudo, esta disponibilidade de combustíveis originados do petróleo tende a diminuir, por isso seu uso contínuo não é mais percebido como sustentável. Atualmente o uso de biocombustíveis é visto como uma ótima alternativa em relação ao petróleo, por ser produzido a partir de fontes renováveis e com reduzida emissão de poluentes. Infelizmente, os chamados biocombustíveis de primeira geração, produzidos principalmente de culturas alimentares como plantas oleaginosas, têm capacidade muito limitada para atendimento das demandas e das metas de produção. As preocupações ambientais e econômicas têm, pelo exposto anteriormente, gerado um aumento no interesse por biocombustíveis de segunda geração, produzidos a partir de matérias-primas essencialmente não alimentares, tais como as microalgas, e que potencialmente oferecem maiores oportunidades no longo prazo.

Por outro lado, um dos grandes desafios ambientais atualmente consiste no tratamento adequado dos esgotos municipais, tendo em vista o aumento populacional e a crescente quantidade de substâncias encontradas nestes efluentes. Como exemplos destas substâncias, ou compostos indesejados, têm-se o nitrogênio e o fósforo, os quais servem de nutrientes para a vida aquática como as microalgas. O lançamento excessivo de N e P nos mananciais causa um sério problema ambiental conhecido como eutrofização, a qual é caracterizada pela alta disponibilidade destes nutrientes e conseqüente desenvolvimento de microrganismos que podem prejudicar, por exemplo, o tratamento da água para consumo humano. Em Porto Alegre tem-se presenciado nos últimos anos o problema da eutrofização no lago Guaíba, sendo que o crescimento das cianobactérias pode trazer prejuízos para o processo de potabilização, com aumento do custo do tratamento no momento em que é exigido o emprego de produtos como o carvão ativado em grandes quantidades para remover, por exemplo, substâncias causadoras de sabor e odor objetáveis na água.

Tendo em vista os problemas apresentados anteriormente, esgotamento de recursos energéticos no longo prazo e a baixa remoção de nutrientes dos esgotos municipais tratados, atualmente muitos estudos estão sendo conduzidos com o

objetivo de aproveitar o processo de tratamento de esgotos para produzir biocombustíveis antes de lançar os efluentes deste processo nos mananciais. Nesse sentido, há um crescente interesse no desenvolvimento de processos de remoção de N e P utilizando tratamento biológico a partir do crescimento de microalgas, as quais capturam estes nutrientes do meio líquido. O potencial de muitas espécies de microalgas para produzir biomassa, e a partir desta obter biocombustíveis e outros produtos, tem motivado pesquisadores na busca de tecnologias de cultivo destas microalgas em diferentes tipos de esgotos. Alguns aspectos importantes devem ser considerados para que o processo de cultivo e obtenção de energia seja ambientalmente e economicamente viável. É necessário identificar espécies de microalgas produtivas, com o conteúdo lipídico favorável e em quais condições o seu crescimento é favorecido, além de desenvolver técnicas eficazes para o cultivo das microalgas, seja em fotobiorreatores ou lagoas abertas. As técnicas para colheita das microalgas e processamento da biomassa para a obtenção de biocombustíveis também são pontos críticos a serem pesquisados. Um fator que tem sido considerado é a produção conjunta de subprodutos de alto valor agregado que poderiam ser utilizados nas indústrias alimentícia e farmacêutica, o que tornaria o processo mais lucrativo e ambientalmente sustentável, pois atualmente ele não é considerado competitivo se comparado aos combustíveis provenientes do petróleo.

Este projeto tecnológico tem como objetivo propor o uso de microalgas para auxiliar no processo de remoção de nitrogênio e fósforo do esgoto tratado na Estação de Tratamento de Esgoto Serraria, na zona sul de Porto Alegre e posterior uso da biomassa para produção de biocombustíveis. A ETE Serraria é parte do Programa Integrado Socioambiental - PISA - que, por meio de uma série de ações e obras, pretende alcançar o tratamento de 80% do esgoto coletado na cidade de Porto Alegre. A ETE Serraria possui capacidade instalada (Q) de 4115 litros/segundo de esgoto tratado. Devido a sua grande capacidade e tecnologias utilizadas, como os reatores *UASB* (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) ou reatores anaeróbios de fluxo ascendente, e os tanques de lodo ativado (*UNITANK*), se apresenta como alternativa bastante interessante para o presente projeto.

2. ESTADO DA ARTE

Sistemas de culturas aquáticas que envolvem a produção de microalgas e simultaneamente o tratamento de esgoto, com remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo, além do dióxido de carbono da atmosfera, têm sido considerados bastante promissores, pois nestes sistemas são combinados o crescimento das microalgas e o tratamento biológico de esgotos (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010). Muitas espécies de microalgas são capazes de se desenvolverem em esgotos, devido a sua habilidade de utilizar o carbono orgânico e também nitrogênio e fósforo, sendo que o seu uso no tratamento de esgotos tem sido abordado desde 1957 (PITTMAN; DEAN; OSUNDEKO, 2011). Entretanto, o emprego de microalgas para o tratamento de esgoto ainda é utilizado em pequena escala, por meio de lagoas de oxidação, ou estabilização, convencionais (PITTMAN; DEAN; OSUNDEKO, 2011). Outro método utilizado consiste em lagoas de algas de alta taxa (*High-rate Algal Ponds ou HRAPs*). Nelas são utilizadas lagoas rasas onde as microalgas ficam suspensas e a homogeneização e aeração são feitas por agitadores mecânicos. Atualmente existem principalmente três métodos para o crescimento de microalgas: fotobiorreatores, lagoas abertas e *ATS (Algal Turf Scrubber™)* (SAVAGE; HESTEKIN, 2013). O ATS é uma tecnologia desenvolvida por Walter Adey para o tratamento de efluentes agrícola, industrial e doméstico, o qual consiste de várias espécies de algas (30 ou mais) associadas a outros microrganismos e fixadas em uma tela por onde passa o efluente a ser tratado (PIZARRO et al., 2006).

2.1. Tratamento de esgotos municipais

A seguir são apresentadas resumidamente as principais etapas do processo convencional do tratamento de esgoto e também as tecnologias empregadas na Estação de Tratamento de Esgoto Serraria, como os reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB).

O tratamento convencional de esgoto é realizado a partir de uma série de etapas chamadas de operações unitárias, onde são aplicadas forças físicas, já as etapas que envolvem reações químicas são conhecidas como processos unitários. Atualmente tem-se a combinação destes dois tipos de etapas, operações e processos, de forma a atingir diferentes níveis de tratamento.

Na etapa do tratamento preliminar são removidos materiais grosseiros que poderiam prejudicar as etapas posteriores e também danificar equipamentos. Normalmente feito com auxílio de grades para conter os sólidos maiores do que 1 mm.

A etapa seguinte é tratamento primário, no qual é removida parte dos sólidos suspensos e também matéria orgânica, sendo a sedimentação ou flotação as operações unitárias frequentemente utilizadas. Alternativamente existe a possibilidade de se incluir uma etapa de tratamento primário avançado, onde pode ser feita uma remoção mais aprimorada como adição de produtos químicos flocculantes e filtração (TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003, p. 11).

No tratamento secundário é realizada a remoção de matéria orgânica biodegradável, em solução ou suspensa, e também sólidos suspensos por processos químicos e biológicos. O processo de desinfecção pode ser incluído nesta etapa. Um tratamento secundário avançado também é possível com a remoção de matéria orgânica, sólidos suspensos, nitrogênio e fósforo, empregando-se processos químicos e biológicos (TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003, p. 11).

O tratamento terciário objetiva a remoção de sólidos suspensos residuais, por filtração, por exemplo, a retirada de poluentes específicos e potencialmente tóxicos, além da remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo e cor. Nesta etapa também é empregada com frequência a desinfecção (TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003, p. 11).

Os reatores anaeróbios de fluxo ascendente (UASB) foram desenvolvidos no final dos anos 70, sendo que neste tipo de reator o afluente é distribuído na parte inferior do equipamento e sobe através de uma camada de lodo contendo os microrganismos que promovem a decomposição anaeróbia (TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003, p. 1006).

2.1.1. Remoção de nitrogênio e fósforo

O lançamento de esgotos nos corpos d'água, ainda que tratados, pode causar diversos problemas, que vão muito além dos estéticos, prejudicando a qualidade da água utilizada para recreação e consumo humano (MOTA; SPERLING, 2009). Contudo, atualmente uma das maiores preocupações tem sido a minimização dos impactos do aporte de grandes quantidades de nitrogênio e fósforo, em diferentes formas. A remoção de nitrogênio no tratamento de efluentes ocorre principalmente por meio de processos biológicos de nitrificação/desnitrificação, sendo que na nitrificação a amônia é oxidada a nitrato e na desnitrificação o nitrato é reduzido a nitrogênio molecular (KELLY; HE, 2014).

A remoção do fósforo também pode ser feita por processos biológicos, contudo esta pode ser prejudicada pelo fato de o fósforo não realizar transferências de elétrons em mecanismos redox como o nitrogênio (KELLY; HE, 2014). O processo mais

utilizado é a precipitação química com sais de metais multivalentes como Ca^{2+} , Al^{3+} e Fe^{3+} . Alguns polímeros têm sido utilizados como floculantes em conjunto com o sulfato de alumínio para separação dos precipitados formados (TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003, p. 501).

Nitrogênio

No decorrer do ciclo do nitrogênio no meio ambiente, este elemento químico assume diferentes formas e estados de oxidação, sendo este fato devido a processos bioquímicos (MOTA; SPERLING, 2009). A química do nitrogênio é complexa porque ocorrem mudanças no seu estado de oxidação causadas por organismos vivos, dependendo das condições do meio, por exemplo, se este é aeróbio ou anaeróbio (TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003, p. 60). A Tabela 1 apresenta as diferentes formas de nitrogênio encontradas no meio ambiente.

Tabela 1. Espécies predominantes de nitrogênio no meio ambiente

Forma	Fórmula	Estado de oxidação
Nitrogênio molecular	N_2	0
Nitrogênio orgânico	variável	variável
Amônia livre	NH_3	-3
Íon amônio	NH_4^+	-3
Íon nitrito	NO_2^-	+3
Íon nitrato	NO_3^-	+5

Fonte: MOTA; SPERLING, 2009

Apesar dos problemas apresentados com o excesso de nitrogênio nos mananciais, ele é um elemento fundamental para o crescimento de microrganismos que auxiliam no tratamento dos esgotos. Nos processos de nitrificação a conversão de amônia a nitrito e nitrato leva a um consumo de oxigênio e alcalinidade (MOTA; SPERLING, 2009). A forma predominante do nitrogênio permite ter uma ideia sobre o potencial poluente de efluentes. Poluições recentes têm como formas principais o nitrogênio orgânico e amônia. Poluições mais antigas contêm nitrato em maiores quantidades e nitrito em menores quantidades. As formas nitrogênio orgânico (grupamentos amina) e amônia predominam nos esgotos domésticos brutos (MOTA; SPERLING, 2009). O pH do meio tem grande influência na forma predominante do nitrogênio, sendo que em valores abaixo de 8,0, predomina o íon amônio, já em pH em

torno de 9,5, as concentrações de NH_3 e NH_4^+ são praticamente equivalentes. Com pH 11 tem-se somente amônia. A forma do nitrogênio pode trazer sérios problemas ambientais como a mortandade de peixes, principalmente pela toxicidade da amônia livre, mesmo em baixas concentrações (MOTA; SPERLING, 2009). Os resultados de nitrogênio são comumente encontrados como nitrogênio inorgânico total ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+ + \text{NO}_2^- + \text{NO}_3^-$), há também o NTK, ou nitrogênio total Kjeldahl (nitrogênio orgânico + $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) e o nitrogênio amoniacal ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) (TCHOBANOGLOUS; BURTON; STENSEL, 2003, p. 61)

Fósforo

O fósforo é encontrado nos esgotos domésticos nas formas inorgânicas (polifosfatos e ortofosfatos) as quais tem origem principalmente em detergentes e na forma orgânica, de origem fisiológica (MOTA; SPERLING, 2009). O fósforo proveniente dos detergentes pode chegar a 50% do total de fósforo encontrado em esgotos domésticos, seja na forma de polifosfatos ou hidrolisada como os ortofosfatos. Os ortofosfatos encontrados estão nas formas PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , H_3PO_4 , sendo HPO_4^{2-} a forma predominante em esgotos domésticos (MOTA; SPERLING, 2009). O fósforo é considerado essencial como nutriente, principalmente de microrganismos que degradam a matéria orgânica, sendo que os esgotos domésticos possuem comumente quantidades adequadas para esta degradação. O seu excesso no meio aquático contribui para o fenômeno da eutrofização, não apresentando contudo implicações sanitárias na qualidade da água (MOTA; SPERLING, 2009). A Tabela 2 apresenta as concentrações médias de nitrogênio e fósforo nos esgotos domésticos.

Tabela 2. Concentrações de N e P em esgotos domésticos no Brasil.

Parâmetro	Concentração (mg L^{-1})
Nitrogênio total	35 – 60
Nitrogênio orgânico	15 – 25
Amônia	20 – 35
Nitrito	~ 0
Nitrato	0 – 1
Fósforo	4 – 12
Fósforo orgânico	1 – 5
Fósforo inorgânico	3 – 7

Fonte: (MOTA; SPERLING, 2009).

2.1.2. Legislação ambiental aplicada a esgotos

A seguir são apresentadas resumidamente as principais legislações ambientais atualmente vigentes no Brasil e no Rio Grande do Sul e que definem os padrões de qualidade dos efluentes que devem ser lançados de estações de tratamento de esgotos.

2.1.2.1. Resolução CONAMA Nº 430/2011

A resolução CONAMA 430/2011 estabelece padrões de lançamento de efluentes, complementando e revogando a Resolução CONAMA 357/2005, a qual dispunha sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Segundo a CONAMA 430, os critérios nela apresentados devem ser seguidos na eventual ausência de legislação específica do órgão ambiental competente, sendo que suas diretrizes estão definidas na Resolução CONSEMA 128/2006. O valor máximo de nitrogênio amoniacal ($\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$) em efluentes líquidos para serem lançados em corpos hídricos está fixado em $20,0 \text{ mg N L}^{-1}$. Para o fósforo não há limite definido nesta Resolução (CONAMA, 2011).

2.1.2.2. Resolução CONSEMA Nº 276/2013

Dispõe sobre a excepcionalidade nos sistemas de tratamento de esgotos sanitários, no que diz respeito aos padrões e condições para a emissão de efluentes líquidos domésticos em águas superficiais do Rio Grande do Sul. Com esta resolução do Conselho Estadual do Meio Ambiente ficaram suspensas as Resoluções CONSEMA 128/2006, que dispõe sobre a fixação de padrões de emissão de efluentes líquidos e CONSEMA 129/2006, que dispõe sobre a definição de padrões e critérios para a toxicidade de efluentes líquidos, sendo obrigatório o cumprimento dos padrões definidos na Resolução CONAMA 430/2011, até que o CONSEMA realize nova discussão, a qual está prevista para 2016 (CONSEMA, 2013).

2.2. Produção de biocombustíveis a partir de microalgas

O conceito de produzir energia a partir de microalgas data da década de 1950 com a produção de metano, sendo nesta mesma época proposto o uso de esgotos como meio para o crescimento das microalgas (SHEEHAN et al., 1998). Contudo, a produção de microalgas em larga escala iniciou na década de 1960 no Japão, sendo

que o interesse no seu uso para a produção de energia aumentou nos anos 70, durante a primeira crise do petróleo (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010). Nesse período foram desenvolvidos programas específicos como o do *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* nos Estados Unidos, o qual utilizou espécies aquáticas para o estudo de combustíveis renováveis, tendo sido realizado entre 1978 e 1996 (SHEEHAN et al., 1998).

As algas podem ser usadas para atividades como o tratamento de esgotos, fitorremediação (uso de plantas para descontaminação e/ou desativação de substâncias nocivas ao meio ambiente) e remoção de dióxido de carbono da atmosfera, além de servirem de matéria-prima na produção de combustíveis renováveis (SAVAGE; HESTEKIN, 2013). As microalgas possuem altas taxas de crescimento e produtividade quando comparadas com vegetais, grãos e plantas aquáticas, necessitando de área de produção muito menor do que outras fontes de biocombustíveis originadas da agricultura (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010). As microalgas podem ser utilizadas como matéria-prima para diversos combustíveis renováveis como metano, hidrogênio, etanol, biodiesel, entre outros, os quais apresentam reduzida emissão de materiais particulados, monóxido de carbono e óxidos de enxofre quando queimados (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010). A Tabela 3 apresenta um comparativo do potencial de produção de biodiesel a partir de diferentes matérias primas, incluindo as microalgas.

Tabela 3. Comparação de microalgas com outras fontes de biodiesel.

Fonte	Conteúdo de óleo/massa seca de biomassa (%)	Rendimento (L de óleo ha⁻¹ ano⁻¹)	Área necessária (m² kg⁻¹ de biodiesel)	Produtividade (kg biodiesel ha⁻¹ano⁻¹)
Milho (<i>Zea mays L.</i>)	44	172	66	152
Soja (<i>Glycine Max L.</i>)	18	636	18	562
Canola (<i>Brassica napus L.</i>)	41	974	12	862
Girassol (<i>Helianthus annuus L.</i>)	40	1070	11	946
Microalgas	30 - 70	58700 - 136900	0,2 - 0,1	51927 - 121104

Fonte: Adaptado de MATA; MARTINS; CAETANO, 2010.

Para as microalgas apresentadas na Tabela 3, as faixas referem-se a microalgas de baixo a alto teor de óleo. Pode-se verificar, a partir dos dados apresentados, o elevado potencial produtivo que as microalgas, mesmo as de baixa produtividade, possuem em relação a matérias primas como soja e milho, por exemplo.

2.2.1. Produção de biodiesel a partir de microalgas

Muitas espécies de microalgas podem ser induzidas a acumular quantidades consideráveis de lipídios, contribuindo assim para um alto rendimento na produção de biodiesel (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010). Ainda, o valor médio destas quantidades acumuladas pode ficar na faixa de 1 a 70% da sua massa seca. A biomassa obtida a partir de microalgas é formada principalmente por carboidratos, proteínas e óleos naturais (SHEEHAN et al., 1998). Para a produção de biodiesel, a fração utilizada é a de lipídios, por meio de uma reação de transesterificação com álcoois comuns como o metanol. A reação de transesterificação ocorre em etapas reversíveis e irreversíveis, podendo-se considerar basicamente a conversão de triglicerídeos em diglicerídeos que são convertidos a monoglicerídeos, sendo estes convertidos em ésteres, ou biodiesel, e glicerol. A Figura 1 apresenta simplificada a reação global para o processo de produção de biodiesel por transesterificação.

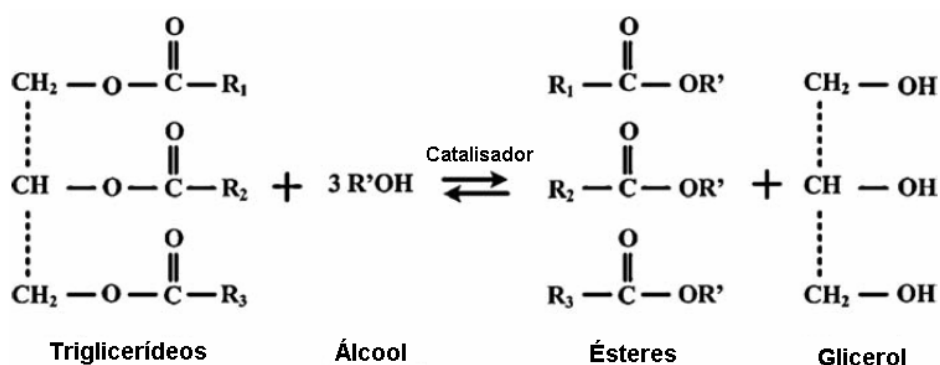


Figura 1. Reação para produção de biodiesel a partir de triglicerídeos (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010).

A proporção de biodiesel em relação à quantidade de óleo é de aproximadamente 1:1, o que significa que 1 kg de triglicerídeo obtido a partir de biomassa produz em torno de 1 kg de biodiesel (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010).

2.2.2. Sistemas para cultivo de microalgas

A seguir são apresentados resumidamente os dois principais sistemas para cultivo de microalgas e produção de biomassa para uso potencial na obtenção de biocombustíveis, são eles as lagoas abertas do tipo “*raceway*” e os fotobiorreatores fechados.

2.2.2.1. Lagoas abertas do tipo “*raceway*”

A Figura 2 apresenta o esquema de uma lagoa aberta tipo “*raceway*”, ou HRAP (*High Rate Algal Pond*), proposta para o desenvolvimento de biomassa com o aproveitamento de dióxido de carbono obtido, por exemplo, durante queima de carvão mineral em indústrias que utilizam esta fonte de energia (SHEEHAN et al., 1998)

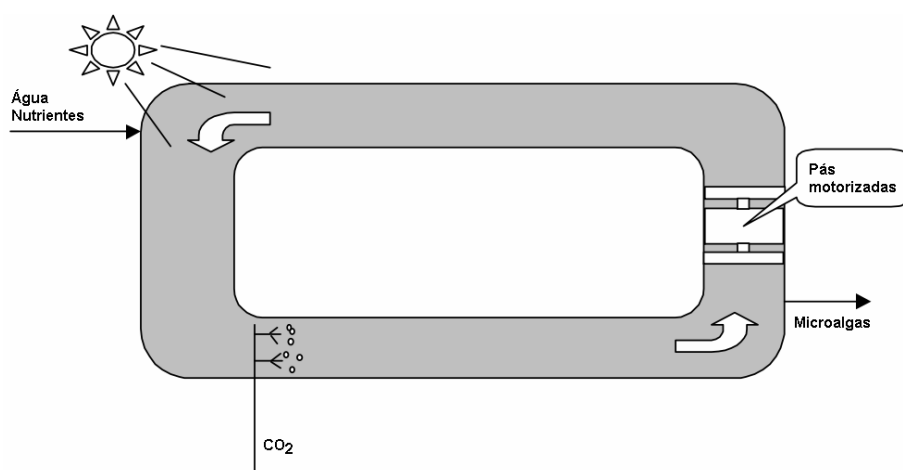


Figura 2. Esquema de lagoa tipo “*raceway*” para produção de microalgas (SHEEHAN et al., 1998).

No esquema apresentado na Figura 2, a lagoa é alimentada com água e nutrientes, sendo que esta deve ter baixa profundidade para permitir a entrada de luz solar. Além disso, pás rotatórias e motorizadas são necessárias para agitar o sistema e homogeneizá-lo de forma a manter as microalgas em suspensão. Na outra extremidade do sistema são retiradas as microalgas por um mecanismo de separação, para que estas possam ser desidratadas e posteriormente processadas. A ideia deste tipo de lagoa é que opere continuamente (CHRISTENSON; SIMS, 2011). Um dos maiores desafios deste tipo de lagoa é a possibilidade de contaminação do meio de cultivo, com redução da produtividade, uso ineficiente do dióxido de carbono, pouca homogeneização e zonas escuras (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010).

2.2.1.2. Fotobiorreatores fechados

Os fotobiorreatores são projetados para manterem a cultura de microalgas completamente enclausurada, por exemplo, em estufas, sacos ou *bags*, tubos plásticos ou outro recipiente transparente. O projeto mais simples para este tipo de equipamento pode alcançar custos mínimos maiores do que os obtidos com lagoas abertas (SHEEHAN et al., 1998).

Apesar dos problemas associados aos custos, os reatores tubulares podem favorecer o controle da temperatura, pH, contaminação e da mistura do meio, além de também reduzirem as perdas por evaporação e fornecerem maiores concentrações de células de microalgas, sendo a produtividade deste tipo de reator em torno de 20 a 40 g m⁻² dia⁻¹ (CHRISTENSON; SIMS, 2011). Os reatores tubulares não têm sido muito utilizados devido a problemas de acumulação tóxica do oxigênio, gradiente de dióxido de carbono, superaquecimento, incrustações e altos custos de manutenção (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010). A Tabela 4 apresenta um comparativo entre os métodos de cultivo de lagoas abertas e reatores fechados.

Tabela 4. Comparativo entre os fotobiorreatores e lagoas abertas para o cultivo de microalgas

	Sistemas fechados (fotobiorreatores)	Sistemas abertos (lagoas)
Controle da contaminação	Fácil	Difícil
Risco de contaminação	Reduzido	Alto
Esterilidade	Possível	Nenhuma
Controle do processo	Fácil	Difícil
Controle das espécies	Fácil	Difícil
Mistura/homogeneização	Uniforme	Pouca
Regime de operação	Bateladas ou semi-contínuo	Bateladas ou semi-contínuo
Espaço necessário	Depende da produtividade	Depende da produtividade
Razão área/volume	Alta (20 – 200 m ⁻¹)	Baixa (5 – 10 m ⁻¹)
Densidade populacional (células algáceas)	Alta	Baixa
Investimento	Alto	Baixo
Custo de operação	Alto	Baixo
Eficiência de uso da luz	Alta	Baixa
Controle de temperatura	Fácil	Difícil
Produtividade	3 – 5 vezes mais produtivo que lagoas	Baixa
Perda de água	Depende do sistema de refrigeração	Semelhante aos reatores fechados
Controle da transferência de gás	Alto	Baixo
Perda de dióxido de carbono	Depende do pH, alcalinidade, etc	Idem
Inibição pelo oxigênio	Maior problema	Menor que nos reatores fechados
Aumento da produtividade	Difícil	Difícil

Fonte: MATA; MARTINS; CAETANO, 2010.

2.2.3. Seleção das microalgas e potencial de produção de biomassa

A seleção da espécie de microalga mais adequada envolve diversos fatores como: métodos e taxas de crescimento, produção das substâncias desejadas (neste caso ácidos graxos), baixo custo para obtenção do meio de crescimento, método de colheita, reaproveitamento de nutrientes e condições ambientais (SAVAGE; HESTEKIN, 2013). A Tabela 5 lista as principais características desejáveis em uma espécie de microalga.

Tabela 5. Características desejáveis em microalgas para produção de biomassa.

Característica	Vantagem
Altas taxas de crescimento	Competitiva em relação a outras espécies, além de reduzida área para produção
Alto conteúdo lipídico	Alto valor da biomassa
Crescimento em condições extremas/ tolerância às condições ambientais	Reduzido controle das condições do meio de cultura e crescimentos em diferentes estações e condições climáticas
Grande tamanho de célula, morfologia colonial ou filamentosa	Redução dos custos com a colheita

Fonte: GRIFFITHS; HARRISON, 2009

O conteúdo lipídico da espécie de microalga a ser utilizada para a produção de biocombustíveis é fator determinante para a viabilidade do processo, pois contribui para um maior rendimento de óleo para a produção de biocombustíveis (SHEEHAN et al., 1998). A Tabela 6 apresenta algumas espécies de microalgas e seus conteúdos lipídicos, bem como a produtividade de lipídios.

Tabela 6. Conteúdo lipídico e produtividade de diferentes espécies de microalgas

Espécie	Produtividade de biomassa (mg L ⁻¹ dia ⁻¹)	Conteúdo lipídico (% massa seca)	Produtividade lipídica (mg L ⁻¹ dia ⁻¹)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	26	31	8
<i>Scenedesmus sp.</i>	30 – 260	20 – 21	41 – 54
<i>Neochloris oleoabundans</i>	233	29 – 65	90 – 134
<i>Chlorella vulgaris</i>	20 – 200	5 – 58	11 – 40
<i>Nannochloropsis oculata</i>	370 – 480	23 – 30	84 – 142
<i>Nannochloropsis sp.</i>	170 – 1430	12 – 53	38 – 90
<i>Nannochloris sp.</i>	170 – 510	20 – 56	61 – 77
<i>Euglena sp.</i>	155	25	16

Fonte: MATA; MARTINS; CAETANO, 2010; MAHAPATRA; CHANAKYA; RAMACHANDRA, 2013.

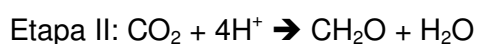
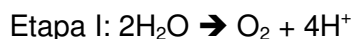
2.2.4. Condições para o cultivo de microalgas

A temperatura é um fator que pode afetar o desenvolvimento de microalgas, sendo que a faixa ideal para o seu crescimento está entre 15 e 25 °C (ABDELAZIZ et al., 2014). A razão N/P também deve ser considerada, sendo que o desenvolvimento ótimo pode ser conseguido com uma razão N/P entre 6,8 e 10,0 (HM et al., 2014). Além disso, o crescimento e a composição das microalgas estão relacionados às condições de cultivo, existindo quatro principais tipos de condições: autotrófica, heterotrófica, mixotrófica e fotoheterotrófica (CHEN et al., 2011). A seguir são apresentadas brevemente estas quatro condições e na Tabela 7 um comparativo entre elas.

2.2.4.1. Condições autotróficas

Em condições autotróficas, as microalgas utilizam luz solar, por exemplo, como fonte de energia, e dióxido de carbono como fonte de carbono para produzir energia química na forma de polissacarídeos, proteínas, lipídios e hidrocarbonetos, por meio da fotossíntese (HUANG et al., 2010). As condições autotróficas são as mais comumente utilizadas para produção de microalgas (CHEN et al., 2011), sendo que nestas há uma grande variação nas quantidades de lipídios produzidos pelas microalgas, entre 5 e 68% da massa seca, dependendo das espécies de microalgas utilizadas (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010).

Além de depender da disponibilidade de nutrientes como carbono, nitrogênio e fósforo, o cultivo das microalgas está diretamente relacionado à sua eficiência de conversão da energia solar por meio da fotossíntese, sendo que para uma conversão completa desta energia em biomassa são necessários quatro fótons para cada uma das duas etapas principais do processo (ou foto-sistemas). Na primeira etapa, a água é convertida em oxigênio e íons hidrogênio e na segunda os íons hidrogênio e o dióxido de carbono são convertidos em biomassa (PARK; CRAGGS; SHILTON, 2011).



2.2.4.2. Condições heterotróficas

Algumas microalgas podem se desenvolver em condições heterotróficas, na ausência de luz, utilizando o carbono orgânico do meio como fonte de energia e para produção de biomassa (CHEN et al., 2011). Este tipo de cultivo pode ser utilizado para contornar o problema da iluminação limitada em fotobiorreatores fechados, por exemplo, sendo que a produtividade de lipídios pode ser até vinte vezes maior do que a obtida em condições autotróficas (HUANG et al., 2010).

Nestas condições, as microalgas podem assimilar o carbono orgânico a partir de diferentes espécies químicas como glicose, frutose, acetato, glicerol, entre outras presentes no meio de cultivo (CHEN et al., 2011).

2.2.4.3. Condições mixotróficas

O cultivo em condições mixotróficas ocorre quando as microalgas se desenvolvem e realizam a fotossíntese a partir do carbono orgânico ou inorgânico (CO_2), o que permite com que elas possam viver tanto em condições autotróficas quanto heterotróficas (CHEN et al., 2011). Podem ainda ocorrer as duas formas, por exemplo, pela produção de dióxido de carbono durante a respiração e posterior utilização deste carbono em condições autotróficas, apesar de esta forma de cultivo ser raramente utilizada pelo alto custo dos equipamentos e possibilidade de contaminação (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010).

2.2.4.4. Condições fotoheterotróficas

Um cultivo é realizado em condições fotoheterotróficas quando as microalgas necessitam de luz ao utilizarem o carbono orgânico, sendo que a diferença em relação às condições mixotróficas é justamente o uso da luz como fonte de energia (CHEN et al., 2011). Assim como no caso das condições mixotróficas, a fotoheterotrófica não é muito empregada na produção de microalgas.

A partir da Tabela 7, pode-se concluir que em condições heterotróficas é obtida maior produtividade com menor custo. Pelas aparentes vantagens, técnicas de cultivo nestas condições têm atraído muito interesse, contudo as culturas heterotróficas podem ser contaminadas muito facilmente (CHEN et al., 2011).

Tabela 7. Comparação entre as condições para cultivo de microalgas para obtenção de biocombustíveis.

Condição de cultivo	Fonte de energia	Fonte de carbono	Concentração de células	Reator em grande escala	Custo
Autotrófica	Luz	Inorgânica	Baixa	Lagoas abertas e fotobiorreatores	Baixo
Heterotrófica	Química	Orgânica	Alta	Fermentador convencional	Médio
Mixotrófica	Luz e química	Inorgânica e orgânica	Média	Fotobiorreator fechado	Alto
Fotoheterotrófica	Luz	Orgânica	Média	Fotobiorreator fechado	Alto

Fonte: Adaptado de CHEN et al., 2011.

2.2.5. Métodos para colheita de microalgas

A colheita de microalgas consiste na sua separação do meio de cultivo, sendo que ela pode representar até 30% dos custos totais com a produção de biomassa. Ainda, para remover grandes volumes de água e processar grandes quantidades de biomassa, podem ser necessárias algumas etapas envolvendo processos químicos, físicos e biológicos (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010). Atualmente são utilizados métodos químicos, físicos e, em menor escala, elétricos, com várias combinações ou sequências destes. (CHRISTENSON; SIMS, 2011). A seguir são apresentados sucintamente os principais métodos.

2.2.5.1. Métodos químicos

Devido ao tamanho das microalgas, frequentemente é empregada a coagulação/floculação como um pré-tratamento para aumentar o tamanho da partícula (i.e. formação de agregados de partículas) antes de se utilizar outro método como flotação para a colheita das microalgas (CHRISTENSON; SIMS, 2011). Para a coagulação podem ser utilizados sais de metais multivalentes como o sulfato de alumínio e o cloreto férrico. Polímeros sintéticos catiônicos e aniônicos, assim como floculantes naturais são utilizados na floculação. A Tabela 8 apresenta um comparativo entre coagulantes e floculantes usados para a colheita de *Chlorella vulgaris* de esgotos e suas respectivas recuperações da biomassa algácea.

Tabela 8. Comparativo entre diferentes coagulantes e floculantes para a colheita de *Chlorella vulgaris* cultivada em esgotos.

Reagente	Dose ótima (mg L ⁻¹)	Turbidez do sobrenadante (UNT)	Sólidos suspensos totais do sobrenadante (mg L ⁻¹)	Recuperação de microalgas (%)
Cloreto férrico	122	7,65	15	93
Sulfato de alumínio	140	5,40	30	91
Zetag 8819 (BASF)	34	6,05	20	98
Magnafloc E-38 (BASF)	NA	760	>500	~0
<i>Moringa oleifera</i>	4670	20	25	85
<i>Opuntia ficus-indica cactus</i>	NA	740	>500	~0

Fonte: UDOM et al., 2013

2.2.5.2. Métodos físicos

Centrifugação: dentre os métodos físicos empregados na separação de microalgas do meio de cultivo, a centrifugação é o mais rápido e confiável. Contudo, os altos investimentos, incluindo custos com manutenção, devem ser considerados (CHRISTENSON; SIMS, 2011). Segundo estudos realizados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), na situação em que se encontram as pesquisas para colheita de microalgas, os custos da centrifugação em grande escala ainda são proibitivos (SHEEHAN et al., 1998).

Filtração: processos de filtração com baixo custo podem ser utilizados para, por exemplo, separar microalgas filamentosas com tamanhos de célula maiores, sendo que para algas menores podem ser empregados métodos de filtração por escoamento tangencial (CHRISTENSON; SIMS, 2011). Podem ser utilizadas também

membranas para microfiltração e ultrafiltração, apesar de este método exigir a frequente substituição das membranas devido a entupimentos, além do custo com bombas de vácuo (PITTMAN; DEAN; OSUNDEKO, 2011).

Sedimentação: a sedimentação é uma opção de baixo custo para a colheita de microalgas, fornecendo concentrações de sólidos em torno de 1,5% em massa, mas este método fica prejudicado pela baixa massa específica das microalgas, apresentando velocidades de sedimentação relativamente baixas ($0,1 - 2,6 \text{ cm h}^{-1}$) (CHRISTENSON; SIMS, 2011). Portanto, a sedimentação se torna interessante somente para a separação de microalgas com células grandes ou quando são previamente utilizados floculantes para agregar as células e assim aumentar sua velocidade de sedimentação (CHEN et al., 2011).

Flotação: a flotação por ar dissolvido (FAD) é um método comumente utilizado no tratamento de esgotos, água potável e efluentes líquidos industriais, sendo que em águas com grandes quantidades de algas este método é mais utilizado que a sedimentação (CHRISTENSON; SIMS, 2011). Nestes sistemas o ar é dissolvido no esgoto sob pressão, seguido pela redução desta até a pressão atmosférica, o que causa a formação de pequenas bolhas que se aderem à superfície das partículas a serem separadas (TCHOBANOGLOUS; BURTON; STENSEL, 2003, p. 420). O percentual de sólidos com este método de separação fica entre 3 e 10% m/v (UDOM et al., 2013).

2.2.6. Cultivo de microalgas em esgotos domésticos

Algumas estratégias para a produção de biocombustíveis a partir de microalgas têm sido desenvolvidas visando à redução dos custos do processo, sendo o uso de efluentes do tratamento secundário de esgotos domésticos uma das alternativas (WANG, LAN, 2011). Os custos com a produção e colheita de microalgas utilizando, por exemplo, as lagoas de alta taxa (*HRAP*), são praticamente cobertos pelos custos da estação de tratamento de esgoto, além de produzir impactos ambientais significativamente menores pelo baixo consumo de água e energia (PARK; CRAGGS; SHILTON, 2011). O cultivo das microalgas para o tratamento terciário pode reduzir as cargas de nitrogênio e fósforo dos efluentes e, conseqüentemente, os custos com nutrientes para o seu crescimento (WANG, LAN, 2011).

Para aumentar o potencial produtivo, é fundamental avaliar a produtividade de lipídios de diferentes microalgas em esgotos domésticos de diferentes etapas do tratamento. Um exemplo de microalga com grande potencial é a *Neochloris oleoabundans*, a qual apresenta um rápido crescimento e acumulação de lipídios de

até 40% da biomassa seca, com produtividade lipídica de $0,133 \text{ kg m}^{-3} \text{ dia}^{-1}$ (WANG, LAN, 2011).

Esgotos secundários (i.e. correntes de esgoto tratado após o tratamento secundário) apresentam níveis relativamente baixos de nitrogênio e fósforo. De acordo com um estudo realizado por WANG, LAN (2011), o crescimento da *N. oleoabundans* em esgotos secundários cessou após 96 horas, aproximadamente, tempo muito inferior se comparado ao tempo de crescimento em esgotos sintéticos com $140,0 \text{ mg L}^{-1}$ de nitrogênio e $47,1 \text{ mg L}^{-1}$ de fósforo, que pode chegar a 140 horas (WANG, LAN, 2011). Neste experimento, onde o autor comparou a produtividade da *N. oleoabundans* em esgotos sintéticos e domésticos secundários, a concentração de células alcançou $0,68 \text{ g L}^{-1}$ e, depois de adicionados 70 mg L^{-1} de N, obteve-se concentração de $2,0 \text{ g L}^{-1}$. A faixa de temperatura ótima de crescimento para a *N. oleoabundans* ficou entre 25 e 30°C , sendo que ela removeu completamente o N e o P em concentrações iniciais de até $218 \text{ mg NO}_3^- \text{ L}^{-1}$ e $47 \text{ mg PO}_4^{3-} \text{ L}^{-1}$, com taxas de remoção de $43,7 \text{ mg N L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e $9,4 \text{ mg P L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$.

Em outro estudo realizado por BHATNAGAR et al (2010), foi utilizada a espécie *Chlorella minutíssima*, identificada em lagoas de oxidação da Índia, sendo que ela se desenvolveu em esgotos brutos, dominando as etapas subseqüentes do tratamento. A *C. minutíssima* apresentou potencial de remoção de nitrogênio e fósforo de 41% e 30%, respectivamente, e produtividades de biomassa de 379 mg L^{-1} em 10 dias, sob condições mixotróficas e $73,03 \text{ mg L}^{-1}$ em 10 dias sob condições autotróficas (BHATNAGAR et al., 2010).

Outro esgoto municipal coletado na estação de tratamento de San Luis Obispo, na Califórnia, contendo $51,0 \text{ mg N L}^{-1}$ e $2,1 \text{ mg P L}^{-1}$ foi utilizado como meio de cultivo de uma mistura de microalgas contendo, entre outras, *Actinastrum*, *Scenedesmus*, *Chlorella*, *Spirogyra*, *Nitzschia*, *Micractinium*, *Golenkinia*, *Chlorococcum*, *Closterium* e *Euglena* (WOERTZ et al., 2010). Foram obtidos percentuais de remoção de aproximadamente 99% para nitrogênio e fósforo, duas semanas após a inoculação, com produtividade lipídica de até $2,8 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (WOERTZ et al., 2010).

Estudos realizados com a microalga *Euglena sp.* em esgotos contendo 32 mg N L^{-1} e 18 mg P L^{-1} apresentaram produtividade de biomassa em torno de $1,2 \text{ g L}^{-1}$ em oito dias de experimento, com remoção de nutrientes N e P de aproximadamente 93% e 66% respectivamente (MAHAPATRA; CHANAKYA; RAMACHANDRA, 2013). A Tabela 9 resume os resultados obtidos em experimentos realizados com diferentes tipos de esgotos domésticos, descrevendo a remoção dos nutrientes e potencial de produção lipídica com o cultivo de microalgas.

Tabela 9. Remoção de nutrientes e produtividades lipídicas de diferentes microalgas em diferentes tipos de esgotos domésticos.

Tipo de esgoto doméstico	Concentração de N e P (mg L ⁻¹)	Remoção de N e P (%)	Produtividade lipídica (mg L ⁻¹ dia ⁻¹)	Microalgas predominantes	Fonte
Bruto	32,0 (N total) 18,0 (P total)	93 (N) 66 (P)	16,2	<i>Euglena sp.</i>	(MAHAPATRA ; CHANAKYA; RAMACHANDRA, 2013)
Primário	39,0 (N amoniacal) 2,1 (P-fosfato)	>99 (N e P)	9,4 – 24,4	<i>Chlorella</i> , <i>Micractinium</i> , <i>Actinastrum</i>	(WOERTZ et al., 2010)
Secundário	140,0 (N – nitrato) 47,1 (P – fosfato)	>99 (N e P)	168,0 ¹	<i>Neochloris oleoabundans</i>	(WANG; LAN, 2011)
Produzido durante a desidratação de lodo anaeróbio	130,0 (N amoniacal) 60,0 (P – fosfato)	> 92 (N e P)	13,0 – 44,1 ²	<i>Chlorella vulgaris</i>	(CABANELAS et al., 2013)

¹ Considerando um conteúdo lipídico de aproximadamente 40% da biomassa seca.

² Considerando um conteúdo lipídico de aproximadamente 30% da biomassa seca.

Como pode-se observar na Tabela 9, diferentes correntes produzidas durante o processo de tratamento de esgoto doméstico podem ser utilizadas para a produção de biomassa, sendo que o uso pretendido para a biomassa é um dos fatores a serem considerados no momento da escolha do meio de cultivo das microalgas. Esgotos primários apresentam quantidades consideráveis de nutrientes, sendo uma boa alternativa, sem necessitarem de adição de N e P.

2.2.7. Extração de lipídios das microalgas

De acordo com Huang et al. (2010), o emprego de técnicas de pirólise tem sido amplamente investigado na extração dos lipídios das microalgas, sendo esta realizada em condições de baixas concentrações de oxigênio e altas temperaturas (SAVAGE; HESTEKIN, 2013). Técnicas de pirólise rápida são conduzidas na ausência de oxigênio, sob pressão atmosférica e temperaturas relativamente baixas (450 – 550 °C), sendo sua produtividade de aproximadamente 70% de bio-óleos (HUANG et al., 2010).

Outra técnica que pode ser utilizada é a de liquefação hidrotérmica, considerando-se a grande quantidade de água que pode ser retida pela biomassa de microalgas, sendo requerida muita energia para retirá-la (BROWN; DUAN; SAVAGE, 2010). A liquefação hidrotérmica foi desenvolvida com o objetivo de extrair os lipídios das microalgas em temperaturas que variam de 250 a 450 °C, sem a necessidade de secá-las (BROWN; DUAN; SAVAGE, 2010).

Métodos menos destrutivos, baseados em extração química, utilizando solventes como o hexano, éter etílico, benzeno, clorofórmio e metanol, têm sido amplamente utilizados, sendo que a escolha do solvente depende da espécie de alga (PRAGYA; PANDEY; SAHOO, 2013).

2.2.8. Produção de biocombustíveis

A biomassa de microalgas produzida a partir de sistemas de tratamento de esgotos pode ser convertida em diferentes produtos. Na Figura 3 é apresentado um esquema da produção de biomassa para diferentes usos, incluindo a remoção de nutrientes, aproveitamento de subprodutos do processo e de energia na própria estação de tratamento de esgoto (ETE), por meio da combustão de biogás e/ou biodiesel.

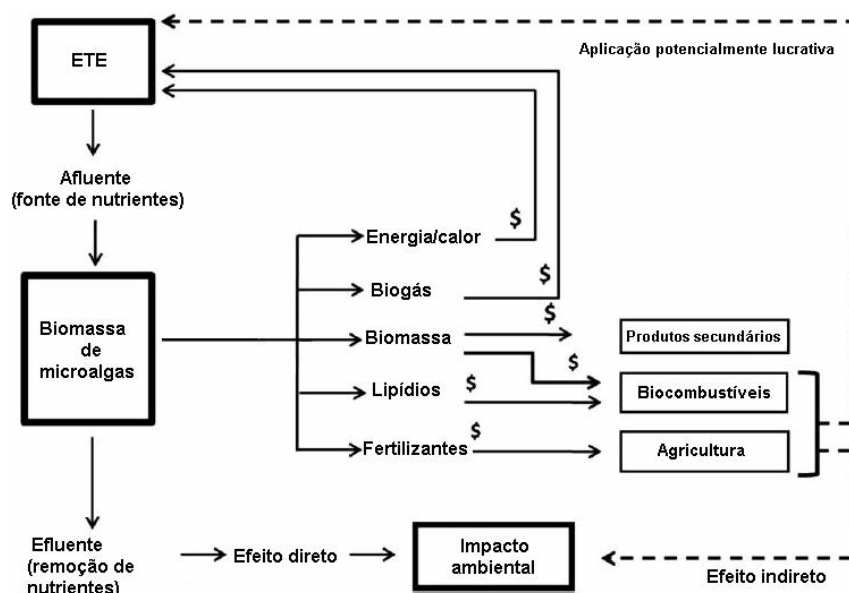


Figura 3. Esquema produtivo baseado no cultivo de microalgas para aprimoramento da remoção de nutrientes de uma ETE e geração de subprodutos com maior valor econômico. Fonte: (CABANELAS et al., 2013).

Algumas empresas que têm desenvolvido técnicas de cultivo e colheita de microalgas em esgotos municipais ainda estão em fase experimental, com projetos em escalas piloto e de bancada, como o caso da *Seambiotic*, que utiliza lagoa do tipo “*raceway*”, com autofloculação e centrifugação para colheita das microalgas (CHRISTENSON; SIMS, 2011).

3. SITUAÇÃO ATUAL

3.1. Processo de tratamento de esgoto da ETE Serraria

A ETE Serraria é parte do Projeto Integrado Socioambiental (PISA), que tem como objetivo a ampliação do tratamento de esgotos domésticos da cidade de Porto Alegre dos atuais 27% para 80% (LANGARO, 2014).

A estação, concluída em 2013 e inaugurada em março de 2014, está instalada em uma área de 5200 m² e possui capacidade de 4115 L s⁻¹. Suas principais unidades de tratamento são:

- (a) Tratamento preliminar: composto por gradeamento grosseiro, gradeamento fino, caixa de areia aerada, removedor de gordura e sedimentadores de areia;
- (b) Tratamento primário: composto por 8 reatores anaeróbios “*UASB*”, medindo 35 m x 44 m x 5,86 m cada para redução de matéria orgânica;
- (c) Tratamento secundário: 8 tanques de lodo ativado “*Unitank*”, medindo 47 m x 44 m x 5,86 m cada para redução aprimorada de matéria orgânica e também nitrogênio (nitrificação) ;
- (d) Tratamento terciário: tratamento do esgoto proveniente da etapa secundária para remoção de nitrogênio e fósforo com tratamento químico (ocorre no *Unitank*);
- (e) Unidades de desidratação de lodo e *flare* para realizar a queima dos gases gerados no processo.

O tratamento aeróbio é realizado no “*Unitank*”, por meio do processo de lodos ativados. Neste tipo de tratamento, microrganismos são mantidos em suspensão sob aeração e as fases sólida e líquida separadas em tanques de sedimentação, sendo parte do lodo retornado para o reator (TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003, p. 663). A Figura 4 apresenta um esquema (vista superior) da ETE Serraria e a Figura 5 uma representação do sistema *Unitank* avançado da referida ETE.



Figura 4. Esquema representativo (vista superior) da ETE Serraria.

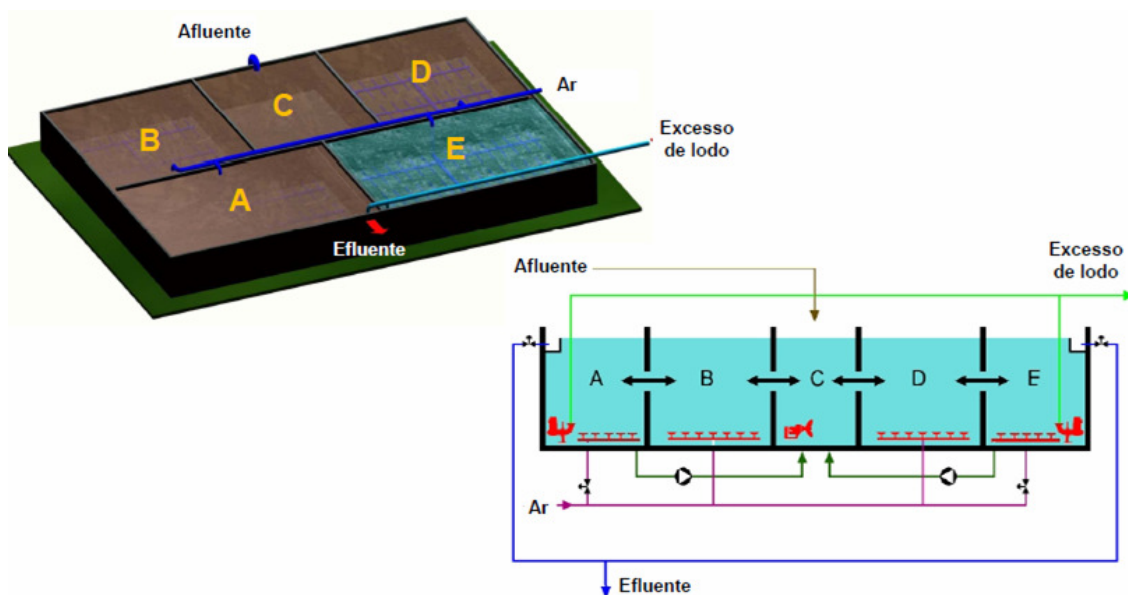


Figura 5. Representação de um sistema "Unitank" avançado.

Na Figura 5 tem-se o compartimento anóxico (C) no qual o afluente entra constantemente, não havendo aeração. Além do afluente, recebe a recirculação de lodo ativado. Neste compartimento ocorre a desnitrificação. O líquido é então distribuído para os compartimentos B e D, que são constantemente aerados e posteriormente é encaminhado então para A e E, compartimentos que intercalam aeração e decantação. O equipamento possui sistema de lamelas que aceleram a

decantação e também uma calha de saída de efluente final decantado e tratado. Enquanto o compartimento A está aerando, o E está decantando e vertendo efluente final, sendo o fluxo depois invertido com E aerando e A decantando. Destes compartimentos sai o lodo que é recirculado para o anóxico C. A Figura 6 apresenta o compartimento do Unitank onde ocorre a aeração e a Figura 7 as lamelas que auxiliam na sedimentação do material suspenso.



Figura 6. Tanque de lodo ativado com aeração (Unitank) da ETE Serraria.



Figura 7. Detalhe das lamelas que auxiliam na decantação no Unitank da ETE Serraria.

4. OBJETIVOS

O objetivo geral do presente projeto tecnológico consiste em avaliar a viabilidade técnica e econômica de implementação de um processo para remoção de nutrientes (N e P) e concomitante produção de microalgas para obtenção de biocombustíveis na ETE Serraria. Os objetivos específicos consistem em:

(a) avaliar a remoção de N e P no tratamento do esgoto doméstico na ETE Serraria;

(b) estudar alternativas para cultivo/colheita de microalgas a partir de esgotos domésticos contendo N e P;

(c) determinar o sistema de cultivo/colheita mais adequado (dos pontos de vista técnico e econômico) para as características do esgoto doméstico da ETE Serraria;

(d) estudar alternativas para utilização da biomassa produzida pelo crescimento de microalgas na produção de biocombustíveis.

5. METODOLOGIA

A realização do presente projeto tecnológico ocorreu por meio de pesquisa bibliográfica, principalmente em artigos publicados em revistas especializadas a partir de 2010 e também outras publicações a respeito do uso de biomassa de microalgas para produção de biocombustíveis, focando no aproveitamento do esgoto tratado em estações de tratamento de esgotos domésticos. Com esta pesquisa foi possível evidenciar o estado da arte no que se refere ao aproveitamento da biomassa de microalgas produzida com dois principais objetivos, a remoção de nutrientes e concomitante produção de biodiesel. Foi considerado que o uso de outras plantas como a soja, que também pode ser utilizada para o mesmo fim, é limitado, pois, além de exigir grandes áreas de terra para sua produção, tem como fim maior o uso na alimentação.

Foram também utilizadas informações geradas nos laboratórios da Gerência de Gestão Ambiental e Tratamento de Esgoto do Dmae, tais como resultados de nitrogênio, fósforo, pH, vazão, sólidos totais e sólidos decantáveis do esgoto (em diversas etapas de tratamento) da ETE Serraria. A partir dos dados de vazão, nitrogênio e fósforo foi realizada a estimativa anual de produção de biomassa e lipídios, ainda que necessária a suplementação de nutrientes visando a garantir o pleno desenvolvimento das microalgas que poderiam ser cultivadas no efluente do reator UASB.

Em relação às espécies de microalgas, foi realizado um estudo daquelas que poderiam se desenvolver com produtividade adequada, em meios contaminados com matéria orgânica e outras substâncias potencialmente prejudiciais ao crescimento destas. Ainda, os métodos de cultivo foram também avaliados, pois disso depende o fornecimento, por exemplo, de dióxido de carbono, no caso de microalgas que se alimentam e se desenvolvem de forma autotrófica, produzindo o próprio sustento por meio de fotossíntese.

6. PROPOSTA TECNOLÓGICA

A proposta tecnológica apresentada neste trabalho se constitui na implantação de um processo para a remoção dos nutrientes nitrogênio e fósforo do esgoto tratado da ETE Serraria, assim como a produção simultânea de biomassa de microalgas. As espécies de microalgas propostas são basicamente *Chlorella*, *Micractinium* e *Actinastrum*, as quais apresentam razoável produtividade lipídica e grande capacidade de crescimento em esgotos domésticos primários. Para a colheita da biomassa de microalgas é proposto o processo de flotação por ar dissolvido (FAD), tendo em vista o tamanho das microalgas propostas, para as quais esta técnica se apresenta como a mais adequada. Como coagulante para auxiliar na colheita por FAD, propõe-se empregar sulfato de alumínio, insumo utilizado amplamente no processo de tratamento de água. As etapas de processo para implementação na ETE Serraria são o cultivo e a colheita das microalgas, sendo o processamento da biomassa repassado a empresa interessada na produção de biocombustíveis.

A escolha das lagoas de alta taxa (*HRAP*) se justifica pelo baixo custo de construção e de operação se comparadas aos reatores fechados (fotobiorreatores).

6.1. Custos para produção de lipídios e biodiesel

Estimativas de custos para produção de biomassa de algas em lagoas de alta taxa do tipo *raceway* são de R\$ 0,76 / kg de massa seca (RAWAT et al., 2013). Considerando-se um conteúdo lipídico de 24% (em massa), o custo por kg de lipídios resulta em torno de R\$ 3,20. Se considerado rendimento de 40% de lipídios, o custo estimado é reduzido para R\$ 1,90 / kg lipídios ou R\$ 281,00 / barril (RAWAT et al., 2013). Estimativas realizadas para produção de lipídios a partir de esgotos domésticos e levando em consideração os custos de operação e de capital apresentaram custo médio de R\$ 6,80 / L de lipídios (SUN et al., 2011).

O custo da produção de biodiesel a partir de microalgas é difícil de calcular, pois não há atualmente empresa que o produza comercialmente, havendo somente pesquisas em escala piloto ou bancada. Contudo, estudos recentes estimam que o litro deste biodiesel obtido a partir da biomassa de microalgas custe entre R\$ 0,94 e R\$ 2,16 (DRIVER; BAJHAIYA; PITTMAN, 2014). O custo estimado foi calculado tendo como base o mercado dos Estados Unidos, já que a maioria dos trabalhos publicados e estimativas econômicas do cultivo de microalgas são provenientes deste país. A cotação do dólar utilizada neste trabalho foi de R\$ 2,23, referente ao dia 12/06/2014.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.1. Potencial de remoção de nitrogênio e fósforo

Inicialmente, foi realizada uma avaliação do potencial de remoção de nutrientes pelo processo de tratamento de esgoto da ETE Serraria, durante seus primeiros meses de operação. Os dados da Tabela 10, referentes às principais características do esgoto afluente e efluente da ETE Serraria foram obtidos nos laboratórios da Gerência de Gestão Ambiental e Tratamento de Esgoto (GATE) do Dmae. A partir destes dados, é possível calcular a remoção dos nutrientes (N e P) considerando-se os resultados do Afluente UASB e Efluente Unitank, sendo que para o nitrogênio total o percentual médio de remoção foi de 62%. Para o fósforo total, foi obtido um percentual médio de 24%, contudo a etapa de remoção de fósforo por precipitação química ainda deverá ser implantada, aumentando a sua remoção. As Figuras 8 e 9 apresentam resultados de nitrogênio total e fósforo total do afluente UASB e do efluente Unitank.

Tabela 10. Valores médios de parâmetros característicos do esgoto da ETE Serraria nos meses de abril e maio de 2014.

	Afluente UASB	Efluente UASB	Efluente Unitank
pH	7,1 ± 0,1	7,1 ± 0,1	7,0 ± 0,1
Temperatura (°C)	24,0 ± 1,2	23,2 ± 1,3	23,6 ± 1,3
Sólidos decantáveis (mL L ⁻¹)	<0,5	<0,5	<0,5
DBO ₅ ^{20°C} (mg O ₂ L ⁻¹)	164,0	140,4	23,8
NH ₃ (mg NH ₃ L ⁻¹)	31,0 ± 11,17	34,1 ± 9,26	7,5 ± 8,30
Nitrogênio total (mg N L ⁻¹)	41,3 ± 14,14	NA	15,8 ± 7,56
Fósforo total (mg P L ⁻¹)	4,45 ± 1,17	4,0 ± 1,03	3,4 ± 0,54

Fonte: Banco de dados Dmae/GATE.

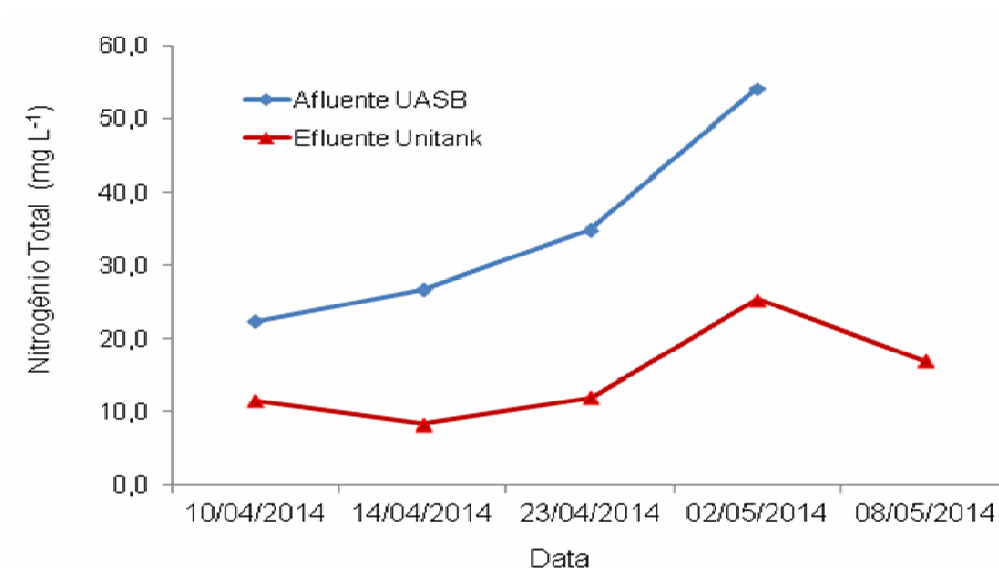


Figura 8. Resultados de nitrogênio total do afluentes UASB e efluente Unitank da ETE Serraria.

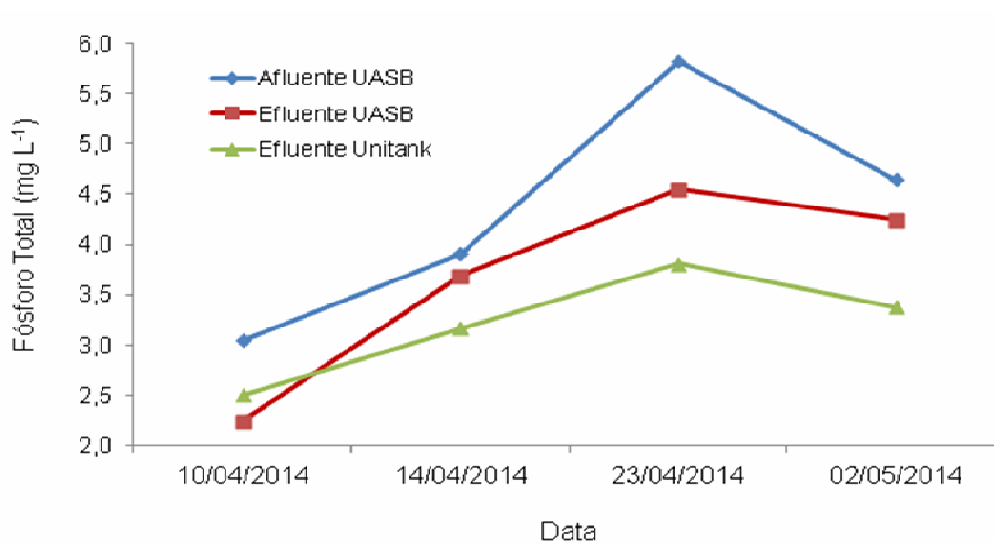


Figura 9. Resultados de fósforo total do afluentes e efluente UASB e efluente Unitank da ETE Serraria.

Considerando um percentual de remoção de aproximadamente 99% (Tabela 9) dos nutrientes N (amoniaco) e P (fosfato) a partir do cultivo de microalgas, por exemplo, no efluente do reator UASB, que se constitui de um esgoto primário, é possível estimar as concentrações de nitrogênio e fósforo a serem lançadas pelo esgoto tratado no lago Guaíba, sendo estas de $0,16 \text{ mg N L}^{-1}$ e $0,03 \text{ mg P L}^{-1}$ (a partir dos dados da Tabela 10).

7.2. Potencial de produção de biodiesel e estimativa de custos

Levando-se em consideração os dados de vazão da ETE Serraria, e partindo da vazão média de 350 L s^{-1} (Figura 10) e uma produtividade lipídica entre $9,4 \text{ mg L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e $24,4 \text{ mg L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ (Tabela 9) foi realizada uma estimativa de produção de lipídios no esgoto primário, sob condições autotróficas e com o cultivo das espécies *Chlorella*, *Micractinium* e *Actinastrum* (apresentados na Tabela 9).

A partir do cálculo do volume médio diário tratado na ETE, igual a $10,08 \times 10^6 \text{ L}$, estima-se uma produção média diária entre 94 e 244 kg de lipídios. Sendo a proporção de conversão dos lipídios a biodiesel de aproximadamente 1:1 (em massa), seria possível produzir até 244 kg de biodiesel por dia na ETE Serraria. Considerando a densidade do biodiesel como sendo $0,864 \text{ kg L}^{-1}$ (HUANG et al., 2010), tem-se a produção volumétrica entre 108 e 282 L por dia. Em relação ao custo diário de produção deste biodiesel a partir do cultivo das microalgas no esgoto, considerando um valor entre R\$ 0,94 e R\$ 2,16/L (média de R\$ 1,55 por litro de biodiesel) (DRIVER; BAJHAIYA; PITTMAN, 2014), tem-se um custo diário entre R\$ 170,00 e R\$ 440,00. O custo mensal de produção ficaria entre R\$ 3700,00 e R\$ 9700,00 (22 dias úteis).

O custo da produção de biodiesel poderia ser reduzido se considerada a utilização deste para produção de energia elétrica para operação da ETE. Ainda, o custo também poderia diminuir considerando-se o uso das microalgas para substituir ou reduzir o uso de produtos químicos como sulfato de alumínio e cal hidratada, utilizados na remoção do fósforo. A redução de custos com pessoal pode não ser muito significativa, mas deve ser considerada em um projeto mais detalhado.

A vazão média apresentada na Figura 10 representa menos de 1/10 da capacidade de tratamento da ETE Serraria, sendo sua vazão máxima de 4115 L s^{-1} . Com isso, pode-se dizer que a produção de microalgas e, por consequência, de biocombustíveis, tem grande potencial de aumento no futuro, na medida em que os demais módulos entrem em operação. Ainda, a variabilidade da vazão, que apresenta um desvio-padrão de aproximadamente 67 L s^{-1} , deveria ser considerada no projeto da lagoa onde as microalgas seriam cultivadas.

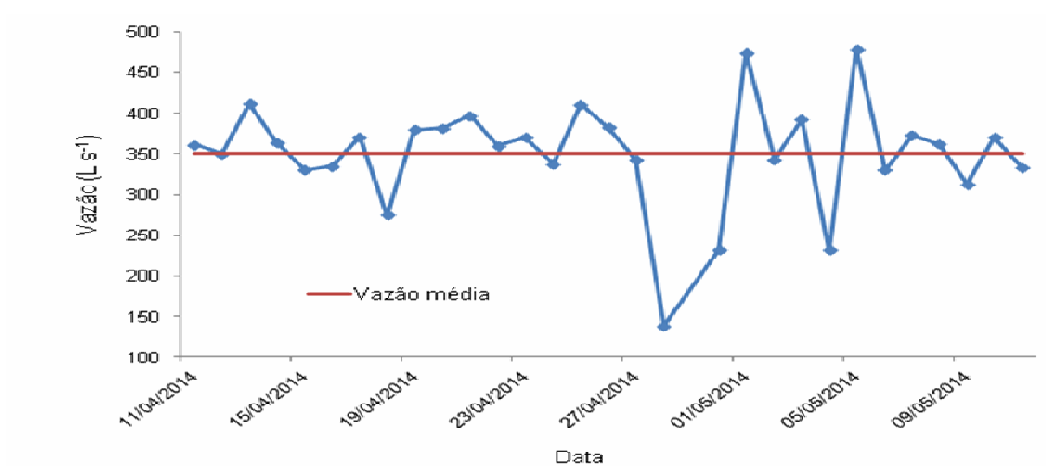


Figura 10. Vazão do esgoto afluyente na ETE Serraria.

8. CONCLUSÃO CRÍTICA

A perspectiva de esgotamento de recursos naturais para produção de energia nas próximas décadas deve ser vista como fator motivacional para investimentos em pesquisas de fontes alternativas e renováveis. Nesse sentido, o uso de microalgas tem se mostrado bastante promissor se considerarmos o potencial de acumulação de biomassa destes organismos quando são proporcionadas as condições ideais para o seu desenvolvimento.

Outro problema para o qual devem ser desenvolvidas alternativas é o tratamento dos esgotos domésticos, principalmente nas grandes cidades. A preocupação se justifica, pois um grande número de substâncias são despejadas nos corpos receptores causando diversos problemas ambientais para os quais ainda não existem soluções de baixos custo e impacto ambiental.

Nos últimos anos, observa-se um crescimento no número de trabalhos que propõem o uso de esgotos domésticos de diferentes etapas do processo de tratamento para o cultivo de microalgas, com o objetivo de produzir biocombustíveis. Contudo, as técnicas atualmente existentes tornam o processo economicamente inviável, pois o preço do biodiesel a partir de microalgas ainda não é competitivo em relação ao preço do diesel produzido a partir do petróleo. Nesse sentido, a realização deste projeto tem sua importância por se tratar de um assunto que precisa ser debatido, pois diz respeito à sustentabilidade econômica e ambiental.

Muito ainda deve ser investido em pesquisa e desenvolvimento para aumentar o potencial de produção de biocombustíveis a partir de microalgas e reduzir os custos, os quais ainda são muito altos e, portanto não são competitivos se comparados aos combustíveis fósseis. Para tanto, poderiam ser realizadas parcerias público-privadas, por exemplo, entre empresas que atualmente produzem o biodiesel com outras matérias-primas como soja, e empresas de saneamento interessadas em reduzir custos do tratamento de esgotos e aumentar a eficiência na remoção de nutrientes e assim prevenir problemas ambientais.

9. BIBLIOGRAFIA

ABDELAZIZ, A. E. M. et al. Screening microalgae native to Quebec for wastewater treatment and biodiesel production. **Bioresource technology**, v. 157C, p. 140–148, 4 fev. 2014.

BEI WANG, C. Q. L. Biomass production and nitrogen and phosphorus removal by the green alga *Neochloris oleoabundans* in simulated wastewater and secondary municipal wastewater effluent. **Bioresource Technology**, v. 102, 2011.

BHATNAGAR, A. et al. *Chlorella minutissima*--a promising fuel alga for cultivation in municipal wastewaters. **Applied biochemistry and biotechnology**, v. 161, n. 1-8, p. 523–36, maio 2010.

BROWN, T. M.; DUAN, P.; SAVAGE, P. E. Hydrothermal Liquefaction and Gasification of *Nannochloropsis* sp . **Energy & Fuels**, n. 9, p. 3639–3646, 2010.

CABANELAS, I. T. D. et al. Comparing the use of different domestic wastewaters for coupling microalgal production and nutrient removal. **Bioresource Technology**, v. 131, p. 429–436, mar. 2013.

CHEN, C.-Y. et al. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: a critical review. **Bioresource technology**, v. 102, n. 1, p. 71–81, jan. 2011.

CHRISTENSON, L.; SIMS, R. Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts. **Biotechnology Advances**, v. 29, n. 6, p. 686–702, 2011.

CONAMA. **RESOLUÇÃO CONAMA N° 430, de 13 de maio de 2011** - Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/>>. Acesso em: 19 abr. 2014.

CONSEMA. **RESOLUÇÃO CONSEMA N° 276, de 13 de maio de 2013** - Dispõe sobre a excepcionalidade nos sistemas de tratamento de esgotos sanitários, no que diz respeito aos padrões e condições para a emissão de efluentes líquidos domésticos em águas superficiais do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<http://www.sema.rs.gov.br/>>. Acesso em: 29 abr. 2014.

DRIVER, T.; BAJHAIYA, A.; PITTMAN, J. K. Potential of Bioenergy Production from Microalgae. **Current Sustainable/Renewable Energy Reports**, 2014.

GRIFFITHS, M. J.; HARRISON, S. T. L. Lipid productivity as a key characteristic for choosing algal species for biodiesel production. **Journal of Applied Phycology**, p. 493–507, 2009.

HM, S. et al. Municipal wastewater utilization for biomass and biodiesel production by *Scenedesmus obliquus* HM103382 and *Micractinium reisseri*. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**. JN169781. v. 052006, n. 2013, 2014.

HUANG, G. et al. Biodiesel production by microalgal biotechnology. **Applied Energy**, v. 87, n. 1, p. 38–46, jan. 2010.

KELLY, P. T.; HE, Z. Nutrients removal and recovery in bioelectrochemical systems: a review. **Bioresource technology**, v. 153, p. 351–60, fev. 2014.

LANGARO, C. Socioambiental: uma nova realidade para o Saneamento em Porto Alegre. **Revista Ecos**, p. 96, mar. 2014.

MAHAPATRA, D. M.; CHANAKYA, H. N.; RAMACHANDRA, T. V. Euglena sp. as a suitable source of lipids for potential use as biofuel and sustainable wastewater treatment. **Journal of Applied Phycology**, v. 25, n. 3, p. 855–865, 27 jan. 2013.

MATA, T. M.; MARTINS, A. A.; CAETANO, N. S. Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 1, p. 217–232, jan. 2010.

MOTA, F. S. B.; SPERLING, M. VON. **Nutrientes de Esgoto Sanitário: Utilização e remoção**. 1. ed. Rio de Janeiro: J. Sholna, 2009. p. 428

PARK, J. B. K.; CRAGGS, R. J.; SHILTON, A. N. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. **Bioresource Technology**, v. 102, n. 1, p. 35–42, jan. 2011.

PITTMAN, J. K.; DEAN, A. P.; OSUNDEKO, O. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. **Bioresource technology**, v. 102, n. 1, p. 17–25, jan. 2011.

PIZARRO, C. et al. An economic assessment of algal turf scrubber technology for treatment of dairy manure effluent. **Ecological Engineering**, v. 26, n. 4, p. 321–327, jul. 2006.

PRAGYA, N.; PANDEY, K. K.; SAHOO, P. K. A review on harvesting, oil extraction and biofuels production technologies from microalgae. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 24, p. 159–171, ago. 2013.

RAWAT, I. et al. Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production. **Applied Energy**, v. 103, p. 444–467, 2013.

SAVAGE, P. E.; HESTEKIN, J. A. A Perspective on Algae , the Environment , and Energy. **Environmental Progress & Sustainable Energy** (, v. 32, n. 4, p. 877–883, 2013.

SHEEHAN, J. et al. Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from Algae; Close-Out Report. 1 jul. 1998.

SUN, A. et al. Comparative cost analysis of algal oil production for biofuels. **Energy**, v. 36, n. 8, p. 5169–5179, ago. 2011.

TCHOBANOGLIOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4. ed. [s.l.] McGraw-Hill, 2003. p. 1819

UDOM, I. et al. Harvesting microalgae grown on wastewater. **Bioresource technology**, v. 139, p. 101–6, jul. 2013.

WANG, B.; LAN, C. Q. Biomass production and nitrogen and phosphorus removal by the green alga *Neochloris oleoabundans* in simulated wastewater and secondary municipal wastewater effluent. **Bioresource technology**, v. 102, n. 10, p. 5639–44, maio 2011.

WOERTZ, I. et al. Algae Grown on Dairy and Municipal Wastewater for. **Journal of Environmental Engineering**, v. 135, n. 11, p. 1115–1122, 2010.