

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE QUÍMICA E BIOLOGIA  
CURSO DE TECNOLOGIA EM PROCESSOS AMBIENTAIS

LEONARDO KOZAK MICHELON

**ESTUDO DE ALTERNATIVA PARA SEPARAÇÃO DE MICROALGAS  
POR ELETROFLOTAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2013

LEONARDO KOZAK MICHELON

**ESTUDO DE ALTERNATIVA PARA SEPARAÇÃO DE MICROALGAS  
POR ELETROFLOTAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Processos Ambientais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito para obtenção do Título de Tecnólogo em Processos Ambientais.

Orientador: Profº Dr. Marcelo Real Prado

Co-Orientador: Me. Anderson Cardoso Sakuma

Curitiba

2013

**LEONARDO KOZAK MICHELON**

**ESTUDO DE ALTERNATIVA PARA SEPARAÇÃO DE MICROALGAS  
POR ELETROFLOTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial à obtenção do grau de TECNÓLOGO EM PROCESSOS AMBIENTAIS pelo Departamento Acadêmico de Química e Biologia (DAQBI) do Câmpus Curitiba da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, pela seguinte banca examinadora:

**Membro 1** – PROF. DR. JULIO CESAR RODRIGUES DE AZEVEDO

Departamento Acadêmico de Química e Biologia, UTFPR

**Membro 2** – PROF. DR. JOÃO BATISTA FLORIANO

Departamento Acadêmico de Química e Biologia, UTFPR

**Orientador** – PROF. DR. MARCELO REAL PRADO

Departamento Acadêmico de Química e Biologia, UTFPR

**Coordenadora de Curso** – PROF<sup>a</sup>. DR<sup>a</sup>. VALMA MARTINS BARBOSA

Curitiba, 25 de setembro de 2013.

## RESUMO

MICHELON, Leonardo Kozak. Estudo de alternativa para separação de microalgas por eletroflotação. 2013. 64 f. Trabalho de conclusão de curso para aprovação na disciplina de TCC-2. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

A influência de discussões relacionadas a proteção do meio ambiente divide opiniões. Provoca a constante inserção de novos temas que abordem um desenvolvimento que garanta recursos naturais ainda intactos para o proveito das gerações futuras. A sociedade, a política e a economia começam a tomar rumos diferenciados. A mudança de hábitos ou adequação a um novo modelo de economia que considere a preservação dos bens naturais tem motivado entidades públicas e privadas a buscar caminhos sustentáveis. Neste trabalho será abordado o caso da Churrascaria Devon's Grill, Curitiba – PR. Localizada em uma região central, a fumaça emitida pela queima de carvão vegetal das churrasqueiras tornou-se um incômodo para os moradores do entorno, criando a necessidade de encontrar soluções para o problema. O investimento em pesquisas resultou no desenvolvimento de um sistema de tratamento - utilizando microrganismos – que evita a emissão de parte da fumaça produzida na chaminé. Contudo a separação da biomassa retida após determinado tempo de processo deve ser realizada. Este trabalho pretende demonstrar a possibilidade de separação de biomassa de microalgas, por meio da técnica de eletroflotação. Para estimar a quantidade de microalgas separadas do meio foi utilizado como base o parâmetro de Absorbância a 665 nm e o parâmetro de sólidos suspensos. Análises de sólidos suspensos, corrente, tensão, pH e alumínio contribuíram para interpretação da dinâmica do sistema. Os resultados da média da porcentagem de biomassa recuperada foram: absorvância 74,5% e para sólidos suspensos 84,73 %. Comprovando que o sistema projetado atende a demanda de separação.

Palavras-chave: Eletroflotação. Microalgas. Separação. Fotobioreatores.

## ABSTRACT

MICHELON, Leonardo Kozak. Study alternative to separation of microalgae for electroflotation. In 2013. 64 f. Completion of course work for success in the course of TCC - 2. Federal Technological University of Paraná.

The influence of discussions related to environmental protection divides opinions. Causes the constant inclusion of new topics that address a development that ensures natural resources still intact for the benefit of future generations. The society, politics and the economy begin to take different paths. The changing habits or fitness for a new economic model that considers the preservation of natural resources has motivated public and private entities to seek sustainable ways. In this paper we will address the case of Devon's Steakhouse Grill, Curitiba - PR . Located in a central area , the smoke emitted by the burning of charcoal grills has become a nuisance to the surrounding residents , creating the need to find solutions to the problem . The investment in research resulted in the development of a treatment system - using microorganisms - which avoids the emission of smoke produced part of the chimney. However, the separation of the biomass retained after a certain process time must be performed. This study aims to demonstrate the possibility of separation of the biomass of microalgae, by electroflotation technique. To estimate the amount of microalgae were separated from the medium used as basic parameter absorbance at 665 nm and the parameter of suspended solids. Analysis of suspended solids, current, voltage, pH and aluminum concentration contributed to interpretation of the system dynamics. The average of the percentage of biomass were recovered: 74,5% absorbance and suspended solids 84,73%. Proving that the designed system meets the demand of separation.

Keywords: Electroflotation . Microalgae. Separation. Photobioreactors .

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
2. OBJETIVOS .....	14
2.1 OBJETIVO GERAL .....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
3. JUSTIFICATIVA .....	15
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
4.1 ELETRÓLISE E ELETROFLOTAÇÃO .....	16
4.2 PILHAS E ELETRÓLISE .....	17
4.2.1 Surgimento das pilhas .....	17
4.2.2 História da arte das pilhas e eletrólise.....	18
4.3 POTENCIAL DE REDUÇÃO DE PILHAS.....	18
4.4 ELETRÓLISE .....	21
4.5 PROCESSO DE ELETROFLOTAÇÃO.....	22
4.6 ELETROQUÍMICA DA ELETROFLOTAÇÃO .....	23
4.7 SEPARAÇÃO DE MICROALGAS .....	25
4.8 ELETROFLOTAÇÃO APLICADA A SEPARAÇÃO DE BIOMASSA DA MICROALGA DESMODESMUS SUBSPICATUS .....	27
4.9 AVALIAÇÕES DE CRESCIMENTO DAS MICROALGAS RELACIONANDO ABSORBÂNCIA E BIOMASSA SECA.....	27
4.10 OXIDAÇÃO DE ÓLEOS VEGETAIS .....	29
5. METODOLOGIA.....	31
5.1 CONSTRUÇÃO DO ELETROFLOTADOR.....	32
5.1.1 Eletrodos para obtenção de dados de tensão .....	33
5.2 CONSTRUÇÃO DOS ELETRODOS .....	33

5.2.1 Materiais utilizados .....	33
5.2.1 Confeção dos eletrodos .....	34
5.3 SEPARAÇÃO DA BIOMASSA .....	38
5.4 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA E DO CLARIFICADO .....	38
5.4.1 Análise de alumínio .....	38
5.4.2 Sólidos suspensos .....	39
5.4.3 Absorbância .....	39
5.4.4 Determinação de absorbância.....	40
5.4.5 Corrente .....	40
5.4.6 Tensão .....	40
5.4.7 Análise da eficiência de remoção das microalgas.....	41
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
6.1 ANÁLISES DOS PARÂMETROS FÍSICOS.....	42
6.1.1 Avaliação de absorbância no sistema Devon's .....	42
6.1.1.1 Clarificado: .....	42
6.1.1.2 Biomassa.....	47
6.1.1.2.1 Análise de sólidos suspensos (100 a 105°C.....	47
6.1.1.2.2 Separação de microalgas em termos de Sólidos Suspensos.....	50
6.1.1.2.3 Carga requerida para funcionamento do sistema.....	52
6.2 ANÁLISES DOS PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS .....	53
6.2.1 Análises em laboratório .....	53
6.2.2 Medidas de pH .....	53
6.2.3 Análise de alumínio na biomassa de entrada, flotado e clarificado após a eletroflotação.....	55
7. CONCLUSÃO.....	59

8. REFERÊNCIAS.....	60
---------------------	----

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

(CETEC)	Centro de Análises e Ensaio s Tecnológicos
(DTS)	Divisão de Tecnologias Sociais
(ICP OES)	Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado
(TECPAR)	Instituto de Tecnologia do Paraná
(Abs)	Absorbância
(A)	Amper
( $\lambda$ )	Comprimento de onda
( $\eta$ )	Eficiência
( $e^-$ )	Elétron
(ddp)	Diferença de Potencial
(E )	Força eletromotriz
(E°red)	Potencial de Redução
(T)	Tensão
(t)	Tempo

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Potenciais padrão de redução para algumas espécies químicas.....	20
Figura 2: Variação de compostos de alumínio e sua relação com o pH.....	24
Figura 3: Desvantagens da Eletroflotação .....	25
Figura 4: Relação entre Absorbância e densidade de células de microalgas .....	28
Figura 5: Relação da absorbância e densidade celular de um cultivo misto de microalgas .....	29
Figura 6: Representação dos pontos de amostragem: P1, P2 e P3.....	32
Figura 7: Modelo de eletrodo.....	35
Figura 8: Eletrodos de alumínio fixados na chapa de acrílico .....	36
Figura 9: Fixação dos eletrodos na cuba eletrolítica .....	36
Figura 10: Eletroflotador em funcionamento.....	37
Figura 11: Análise de absorbância dos Lotes de 1 a 6.....	44
Figura 12: Comportamento médio da reta para determinação da eficiência de separação de microalgas .....	46
Figura 13: Sólidos Suspensos nas amostras da Biomassa de Entrada, no Clarificado e no Flotado .....	50
Figura 14: Eficiência de remoção comparando os parâmetros de sólidos suspensos e absorbância.....	51
Figura 15: Comportamento da corrente aplicada durante o tempo de eletroflotação	53
Figura 16: Variação do pH ao longo da Eletroflotação .....	54
Figura 17: Ponto máximo, mínimo e média do pH durante a eletroflotação.....	55
Figura 18: Análise de alumínio no flotado, clarificado e biomassa de entrada de microalgas em escala logarítmica .....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Reação anódica do Alumínio e formação do agente coagulante .....	23
Tabela 2: Custo de placas de alumínio e aço inox .....	34
Tabela 3: Dados de absorvância e pH de cada Lote estudado.....	43
Tabela 4: Eficiência de remoção de biomassa para cada Lote .....	45
Tabela 5:Concentração de sólidos suspensos nos Lotes estudados.....	48
Tabela 6: Eficiência de remoção de microalgas em termos de sólidos suspensos ...	49
Tabela 7: Concentração de alumínio nos lotes estudados .....	56

## 1.INTRODUÇÃO

A controvérsia em relação aos biocombustíveis e a possibilidade de sua produção competir com a dos alimentos divide opiniões. A utilização de plantas não comestíveis, que possam ser cultivadas em regiões áridas e semi-áridas e, a organização de pequenos agricultores, podem ser alternativas para resolver essas discussões. Portanto, há necessidade que as tecnologias avancem rumo à eficiência energética, como por exemplo, investindo na substituição de combustíveis fósseis por renováveis (SACHS, 2009).

De acordo com Tortora (2005), as algas são organismos eucarióticos e fotoautotróficos. Esses organismos têm a capacidade de fixar dióxido de carbono e convertê-lo em moléculas orgânicas, como carboidratos.

As microalgas apresentam potencial para aplicação em nível industrial. Algumas espécies podem possuir grandes quantidades de ácidos graxos e outras ricas substâncias em suas células. Esse material, quando extraído, constitui uma matéria prima fina para a produção de biocombustíveis, fármacos, cosméticos e inclusive enriquecimento alimentar, tanto para humanos quanto para animais (NOUE, 1998).

Visando o cultivo artificial, para fins de produção e comercialização, torna-se necessário tomar alguns cuidados especiais. As condições pré-estabelecidas de cultivo devem ser controladas, caso seja desejado um aumento da eficiência metabólica das células (GRIFFITHS *et al*, 2011)

Desde 2009, o Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAR) desenvolveu um projeto em parceria com uma churrascaria no centro de Curitiba-PR, visando o tratamento do odor gerado pela queima de carvão vegetal. O processo utiliza um cultivo de microalgas em fotobioreatores de placas planas. Tecnologia que inicialmente tinha por objetivo auxiliar no tratamento das emissões atmosféricas com foco no do odor emitido pela fumaça.

A presente proposta compreende a utilização da técnica de eletroflotação para separação física e química da biomassa de microalgas presente nos fotobioreatores instalados na Devon`s Grill. Trata-se de uma alternativa aos métodos

de separação e tratamento convencional de efluentes contendo material suspenso. O processo ocorre por meio da eletrólise da solução inserida no eletroflotador, combinando a geração de micro bolhas e a formação de agentes coagulantes. O produto das reações dos eletrodos de alumínio com o eletrólito pode formar Hidróxido de Alumínio, um agente coagulante que auxilia na aglutinação das partículas em suspensão.

As microbolhas geradas fazem com que as microalgas em suspensão, na coluna do líquido, vençam a força da gravidade, propiciando sua flotação; e o produto das reações de oxi-redução promove a floculação das partículas suspensas (GOMES, 2009).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Utilizar a técnica de eletroflotação com eletrodos de alumínio como alternativa para a separação de biomassa de microalgas cultivadas em fotobiorreatores de tratamento de fumaça, com fins de reaproveitamento do clarificado obtido para compor nova solução de cultivo e encaminhamento da biomassa concentrada para extração de óleo.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Projetar e construir um sistema piloto de eletroflotação para separação de solução de microalgas cultivadas em fotobioreator;
- Construir os eletrodos em alumínio para utilização no sistema de eletroflotação;
- Avaliar o sistema com ensaios de separação;
- Realizar ensaios físico e químicos, no clarificado e no flotado, obtidos após a separação.

### 3. JUSTIFICATIVA

O método de eletroflotação promove a separação físico-química de materiais em suspensão presentes em uma solução. A eletrólise produz reações químicas nos eletrodos quando em contato com um eletrólito, obtendo como produto a geração de gases – hidrogênio e oxigênio. Esses gases vencem a força da gravidade e por adsorção ou englobamento carregam as substâncias que estão suspensas, forçando sua flotação.

O meio de cultivo para microalgas - CHU – é composto por uma série de sais, o que favorece a eletrólise, devido ao aumento da condutividade do eletrólito. Tratando-se de uma técnica combinada: geração de micro bolhas e coagulação química, o sistema proposto tem seu rendimento ampliado.

A amostra a ser separada é um cultivo de microalgas em suspensão. A técnica requer reduzido espaço de área, fator crucial visto que o que equipamento deve ser projeto e construído próximo aos fotobioreatores – local de produção de microalgas. Dessa forma prioriza-se a logística de separação e armazenamento da biomassa flotada.

Durante o processo de eletroflotação, dois subprodutos são formados: a biomassa e a água clarificada- que pode ser reintroduzida no processo. Enquanto que a biomassa pode ser encaminhada para a extração de lipídeos.

## 4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 4.1 ELETRÓLISE E ELETROFLOTAÇÃO

Os dados sobre o levantamento histórico do processo eletrolítico apresentados no estudo de Tratamento eletrolítico de efluentes de reatores anaeróbios, conduzido por Rodrigues *et al.* (2001) descrevem que apesar do processo eletrolítico ter sido utilizado pela primeira vez em 1889, pouco foi desenvolvido até o fim do século passado. A partir da década de 1980, novos estudos foram realizados de forma a utilizar este método. Nesse mesmo período, a utilização de processos eletrolíticos para separação de algas também foram aplicados. De acordo com os autores Sobrinho e Gomes (1981), é possível utilizar a técnica de eletroflotação para efetuar o tratamento de esgotos e de lagoas de estabilização. Gentil (2003) explica que quando dois metais são ligados eletricamente e imersos em um eletrólito há um fluxo de corrente passando entre eles. Os cátions migram do ânodo (pólo positivo) e se dirigem à solução. Ao mesmo tempo os elétrons migram do cátodo (pólo negativo), para o anodo. A corrente nada mais é que o fluxo de eletricidade em direção oposta ao fluxo de elétrons, ou seja, do pólo positivo para o polo negativo.

Um sistema eletroquímico deve ser composto por no mínimo dois eletrodos imersos em um eletrólito. Na passagem de corrente elétrica através da interface metal/eletrólito, ocorrem reações de oxidação ou de redução, as quais o metal pode ou não participar. Quando é passada corrente elétrica pelo sistema seus componentes podem ou não estar sofrendo alterações irreversíveis, como é o caso dos processos de corrosão (TICIANELLI, 2005).

Durante a eletrólise é possível calcular a quantidade dos produtos formados pelas reações proporcionalmente a uma quantidade conhecida de eletricidade aplicada. A quantidade do produto formado ou do reagente consumido por uma corrente elétrica é estequiometricamente equivalente à quantidade de elétrons

fornecidos. Essas observações foram realizadas por Michael Faraday e são conhecidas como Lei de Faraday da eletrólise (ATKINS, 2006).

Nos sistemas espontâneos, pilhas galvânicas, a ligação dos eletrodos a uma fonte de eletricidade favorece reações que resultam no aparecimento da corrente elétrica. Já em reações não espontâneas, a aplicação de uma corrente elétrica resulta no aparecimento das reações geradas nos eletrodos (TICIANELLI, 2005).

## 4.2 PILHAS E ELETRÓLISE

### 4.2.1 Surgimento das pilhas

O anatomista, Luigi Galvani, em meados de 1786, teorizou que há presença de eletricidade originada dos músculos de rãs dissecadas. Tal conclusão baseou-se nas contrações do animal, quando em contato com diferentes metais. Ele imaginava que a energia era descarregada nos tecidos, formando um capacitor. Em 1796 o cientista italiano conhecido por Volta foi quem construiu a primeira pilha voltaica. Afirmava que o tecido da perna do mesmo animal estudado por Galvani permitia a passagem de corrente elétrica, contrariando a explicação anterior. A sua invenção era formada por eletrodos de chumbo e prata mergulhados em um eletrólito. (TICIANELLI, 2005).

Um modelo de cela eletrolítica, dividida em duas semicelas, foi proposto por John Frederick Daniell, em 1836. Nesta representação, os eletrodos foram unidos por um fio condutor e ligados em uma lâmpada, e as cubas eletrolíticas por uma ponte salina. Este sistema era composto por um esôfago de boi, atuando como a ponte salina (SARDELLA, 1998).

#### 4.2.2 História da arte das pilhas e eletrólise

**Eletrólise:** é o processo no qual uma reação de óxido-redução é produzida a partir da aplicação de uma corrente elétrica.

**Pilhas:** as reações de óxido-redução ocorrem espontaneamente, produzindo corrente elétrica.

Quando uma barra de um determinado metal entra em contato com íons de outro metal uma reação de oxirredução pode ocorrer. Quando o processo é espontâneo, à medida que ocorre o avanço das reações, a energia de Gibbs (potencial químico) tende a diminuir, isso acontece, por exemplo, quando se mergulha um pedaço de zinco em uma solução contendo íons cobre. Contudo, se a experiência for realizada mergulhando-se um pedaço de cobre em uma solução de zinco nada será observado, visto que esse processo não acarretará na diminuição da energia de Gibbs (MIRANDA-PINTO, 2006).

Quando uma pilha é formada por duas cubas eletrolíticas, uma ponte salina é responsável por manter as células eletricamente neutras, devido à migração de seus íons, conduzindo corrente elétrica. No ânodo de uma célula galvânica, a oxidação é espontânea, por isso há um excesso de elétrons no eletrodo e sua carga é negativa. Já em uma célula eletrolítica onde a oxidação é forçada a acontecer, a uma falta de elétrons e o ânodo adquire carga positiva. Isso explica a mudança das cargas nos eletrodos de uma célula galvânica e uma célula eletrolítica (BRETT, 1996).

#### 4.3 POTENCIAL DE REDUÇÃO DE PILHAS

As reações eletroquímicas dependem de quais espécies químicas carregadas estão presentes em um determinado sistema. As reações podem ser divididas em uma parte oxidante, onde algumas espécies perdem elétrons e, em outra redutora, onde na qual algumas espécies ganham elétrons. A diferença entre o

potencial de redução do catodo e o potencial de redução do ânodo é chamada de Força Eletromotriz (E). Contudo não há como saber qual a força eletromotriz absoluta para um processo de redução ou oxidação e sim qual a variação na energia de um sistema (BALL, 2011).

Na Figura 1, são relatados os Potenciais de Redução ( $E^{\circ}_{red}$ ) de alguns metais. Estes dados são de suma importância e relevância, quando se deseja definir a espontaneidade de reações, bem como qual dos reagentes será oxidado ou reduzido durante a reação.

A determinação dos potenciais padrão das espécies químicas é avaliado utilizando um eletrodo chamado Padrão de Hidrogênio. Este eletrodo é formado por um tubo de vidro, repleto de gás hidrogênio tratado, e um fio de platina que permanece em contato com a solução. Este eletrodo se encontra em seu estado padrão e o seu potencial é o seu potencial padrão, portanto os valores de potencial de oxidação como de redução, para o eletrodo de platina, são considerados zero (CASTELLAN, 1979).

“... a passagem de corrente entre eletrodos precisa superar a diferença de potencial – incluindo os sobrepotenciais anódico, catódico e ôhmico – em razão da resistividade da solução. Considera-se para o sobrepotencial anódico, os sobrepotenciais de ativação, concentração e, se houver sobrepotenciais de passivação. Quanto ao sobrepotencial catódico, considera-se apenas o sobrepotencial de ativação e concentração.” (CRESPILHO E REZENDE, 2004).

Espécie	Semi-reação de redução	E° (V)
A forma oxidada é fortemente oxidante		
F <sub>2</sub> /F	F <sub>2</sub> (g) + 2 e <sup>-</sup> → 2 F <sup>-</sup> (aq)	+2,87
Au <sup>+</sup> /Au	Au <sup>+</sup> (aq) + e <sup>-</sup> → Au(s)	+1,69
Ce <sup>4+</sup> /Ce <sup>3+</sup>	Ce <sup>4+</sup> (aq) + e <sup>-</sup> → Ce <sup>3+</sup> (aq)	+1,61
MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup> , H <sup>+</sup> /Mn <sup>2+</sup> , H <sub>2</sub> O	MnO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (aq) + 8 H <sup>+</sup> (aq) + 5 e <sup>-</sup> → Mn <sup>2+</sup> (aq) + 4 H <sub>2</sub> O(l)	+1,51
Cl <sub>2</sub> /Cl <sup>-</sup>	Cl <sub>2</sub> (g) + 2 e <sup>-</sup> → 2 Cl <sup>-</sup> (aq)	+1,36
Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup> , H <sup>+</sup> /Cr <sup>3+</sup> , H <sub>2</sub> O	Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup> + 14 H <sup>+</sup> (aq) + 6 e <sup>-</sup> → 2 Cr <sup>3+</sup> (aq) + 7 H <sub>2</sub> O(l)	+1,33
O <sub>2</sub> , H <sup>+</sup> /H <sub>2</sub> O	O <sub>2</sub> (g) + 4 H <sup>+</sup> (aq) + 4 e <sup>-</sup> → 2 H <sub>2</sub> O(l)	+1,23; +0,82 em pH = 7
Br <sub>2</sub> /Br <sup>-</sup>	Br <sub>2</sub> (l) + 2 e <sup>-</sup> → 2 Br <sup>-</sup> (aq)	+1,09
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , H <sup>+</sup> /NO, H <sub>2</sub> O	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (aq) + 4 H <sup>+</sup> (aq) + 3 e <sup>-</sup> → NO(g) + 2 H <sub>2</sub> O(l)	+0,96
Ag <sup>+</sup> /Ag	Ag <sup>+</sup> (aq) + e <sup>-</sup> → Ag(s)	+0,80
Fe <sup>3+</sup> /Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup> (aq) + e <sup>-</sup> → Fe <sup>2+</sup> (aq)	+0,77
I <sub>2</sub> /I <sup>-</sup>	I <sub>2</sub> (s) + 2 e <sup>-</sup> → 2 I <sup>-</sup> (aq)	+0,54
O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O/OH <sup>-</sup>	O <sub>2</sub> (g) + 2 H <sub>2</sub> O(l) + 4 e <sup>-</sup> → 4 OH <sup>-</sup> (aq)	+0,40; +0,82 em pH = 7
Cu <sup>2+</sup> /Cu	Cu <sup>2+</sup> (aq) + 2 e <sup>-</sup> → Cu(s)	+0,34
AgCl/Ag, Cl <sup>-</sup>	AgCl(s) + e <sup>-</sup> → Ag(s) + Cl <sup>-</sup> (aq)	+0,22
H <sup>+</sup> /H <sub>2</sub>	2 H <sup>+</sup> (aq) + 2 e <sup>-</sup> → H <sub>2</sub> (g)	0, por definição
Fe <sup>3+</sup> /Fe	Fe <sup>3+</sup> (aq) + 3 e <sup>-</sup> → Fe(s)	-0,04
O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O/HO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , OH <sup>-</sup>	O <sub>2</sub> (g) + H <sub>2</sub> O(l) + 2 e <sup>-</sup> → HO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (aq) + OH <sup>-</sup> (aq)	-0,08
Pb <sup>2+</sup> /Pb	Pb <sup>2+</sup> (aq) + 2 e <sup>-</sup> → Pb(s)	-0,13
Sn <sup>2+</sup> /Sn	Sn <sup>2+</sup> (aq) + 2 e <sup>-</sup> → Sn(s)	-0,14
Fe <sup>2+</sup> /Fe	Fe <sup>2+</sup> (aq) + 2 e <sup>-</sup> → Fe(s)	-0,44
Zn <sup>2+</sup> /Zn	Zn <sup>2+</sup> (aq) + 2 e <sup>-</sup> → Zn(s)	-0,76
H <sub>2</sub> O/H <sub>2</sub> , OH <sup>-</sup>	2 H <sub>2</sub> O(l) + 2 e <sup>-</sup> → H <sub>2</sub> (g) + OH <sup>-</sup> (aq)	-0,83; -0,42
Al <sup>3+</sup> /Al	Al <sup>3+</sup> (aq) + 3 e <sup>-</sup> → Al(s)	-1,66
Mg <sup>2+</sup> /Mg	Mg <sup>2+</sup> (aq) + 2 e <sup>-</sup> → Mg(s)	-2,36
Na <sup>+</sup> /Na	Na <sup>+</sup> (aq) + e <sup>-</sup> → Na(s)	-2,71
K <sup>+</sup> /K	K <sup>+</sup> (aq) + e <sup>-</sup> → K(s)	-2,93
Li <sup>+</sup> /Li	Li <sup>+</sup> (aq) + e <sup>-</sup> → Li(s)	-3,05
A forma reduzida é fortemente redutora		

Figura 1: Potenciais padrão de redução para algumas espécies químicas

Fonte: ADAPTADO ATKINS (2006).

O cálculo do Potencial de uma pilha é função dos compostos que sofrerão as reações de oxidação e redução. A substância com maior potencial de redução terá menor facilidade para oxidar-se, a recíproca é válida. Uma variação de Potencial com valores negativos indica que a reação não é espontânea, ao contrário das pilhas, que sempre terão seu delta de variação positivo (BALL, 2011). Dessa forma, para fins de cálculo do potencial elétrico de pilhas, é utilizada a equação 4.1.

$$\Delta E^{\circ} = (E^{\circ}\text{red. cátodo}) - (E^{\circ}\text{red. ânodo}) \quad (4.1)$$

Onde:

$\Delta E^{\circ}$  = Variação de Potencial de Elétrico;

$E^{\circ}\text{red}$  = Potencial de Redução.

#### 4.4 ELETRÓLISE

Os primeiros estudos envolvendo eletrólise foram realizados por Michael Faraday, em meados do século XIX (ATKINS, 2006). A eletroquímica tem como principal objetivo estudar os sistemas capazes de entregar ou receber trabalho útil elétrico. No caso da eletrólise os processos de oxirredução recebem trabalho, já o caso das células galvânicas, o trabalho é entregue as fronteiras do sistema (TICIANELLI, 2005).

“Quando uma reação espontânea ocorre numa pilha galvânica, os elétrons saem de um eletrodo (sítio de oxidação, ânodo) e são recolhidos no outro eletrodo (sítio da redução, cátodo), de modo que há um fluxo de elétrons que pode ser aproveitado para gerar trabalho.”

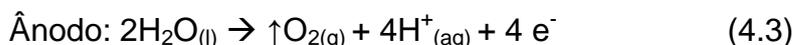
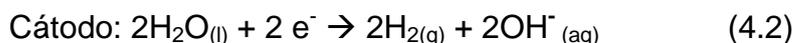
“Numa pilha galvânica, o cátodo tem um potencial mais elevado do que o ânodo; as espécies que sofrem redução retiram elétrons do eletrodo metálico (cátodo) que fica então com carga positiva em excesso (o que corresponde a um potencial elétrico alto). No ânodo, a oxidação é o resultado da transferência de elétrons para o eletrodo, que fica então com excesso de carga negativa (correspondendo a um potencial elétrico baixo)” (ATKINS, 2010).

## 4.5 PROCESSO DE ELETROFLOTAÇÃO

Nunes (2007) comenta que para uma maior eficiência dos processos de flotação, a colisão entre bolhas e partículas deve ser maior, o que acontece quando o diâmetro das bolhas geradas é menor. É evidenciado por Rubio (2002) *appud* Rubio 2003 e Rubio *et al.* (2002) que o diâmetro das bolhas geradas no processo de eletroflotação é menor quando comparado a outros processos que utilizam técnicas de flotação, apresentando resultados entre 0,01 a 0,04 mm. Já no processo de flotação por ar disperso os diâmetros encontraram-se entre 0,5 a 1 mm e por fim nos testes com flotação por eletroflotação as bolhas formadas apresentaram diâmetros entre 0,01 a 1 mm.

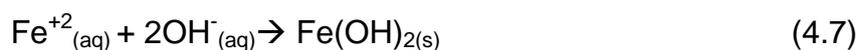
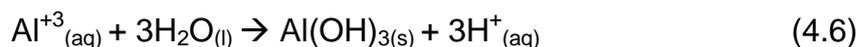
Na eletrólise em solução, deve-se saber se outras espécies presentes podem ser oxidadas ou reduzidas pela corrente elétrica. O potencial fornecido a uma célula eletrolítica deve ser no mínimo igual ao potencial da reação esperada. Pois na solução, se existirem mais de uma espécie a ser reduzida, é preferencialmente reduzida as espécies com maiores potenciais de redução. Este princípio é o mesmo para reações de oxidação (ATKINS, 2006).

De acordo com Silva (2005) um dos exemplos de reações que podem ocorrer na eletrólise para o cátodo e para o ânodo estão representados nas equações (4.2) e (4.3):



Quando é passada corrente elétrica pelos eletrodos o ânodo perde cátions. Algumas reações de eletrocoagulação para eletrodos de alumínio e ferro estão representadas nas equações (4.4) e (4.5). Também são mostradas nas equações (4.6) e (4.7) as reações com hidróxidos, que resultam nos agentes coagulantes da eletrocoagulação





#### 4.6 ELETROQUÍMICA DA ELETROFLOTAÇÃO

Os sistemas que utilizam a eletroflotação operam com eletrodos de sacrifício, gerando íons em função do potencial que está sendo aplicado. A hidrólise do cátion, na etapa anódica, pode formar – no caso de eletrodos de alumínio - um agente coagulante,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , que é responsável pela formação das partículas que aparecem floculadas (CRESPILHO E REZENDE, 2004). A representação das reações anódicas são mostradas na Tabela 1.

**Tabela 1: Reação anódica do Alumínio e formação do agente coagulante**

<u>REAÇÃO ANÓDICA</u>
<b>Oxidação do Alumínio sólido</b>
$\text{Al}_{(\text{s})} \rightarrow \text{Al}^{+3}_{(\text{aq})} + 3\text{e}^{-}$
<b>Solvatação do cátion formado</b>
$\text{Al}^{+3}_{(\text{aq})} + 6\text{H}_2\text{O}_{(\text{l})} \rightarrow \text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}_{(\text{aq})}$
<b>Formação do agente coagulante</b>
$\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}_{(\text{aq})} \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_{3(\text{s})} + 3\text{H}^{+}_{(\text{aq})}$
<b>Reações secundárias</b>
$_{(\text{n})}\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{s})} \rightarrow \text{Al}_{(\text{n})}(\text{OH})_{3\text{n}(\text{s})}$
<b>Fonte: Adaptado CRESPILO E REZENDE (2004).</b>

A estabilidade do hidróxido de alumínio é dependente do pH do meio. A Figura 2 mostra o comportamento das espécies químicas em relação ao pH.

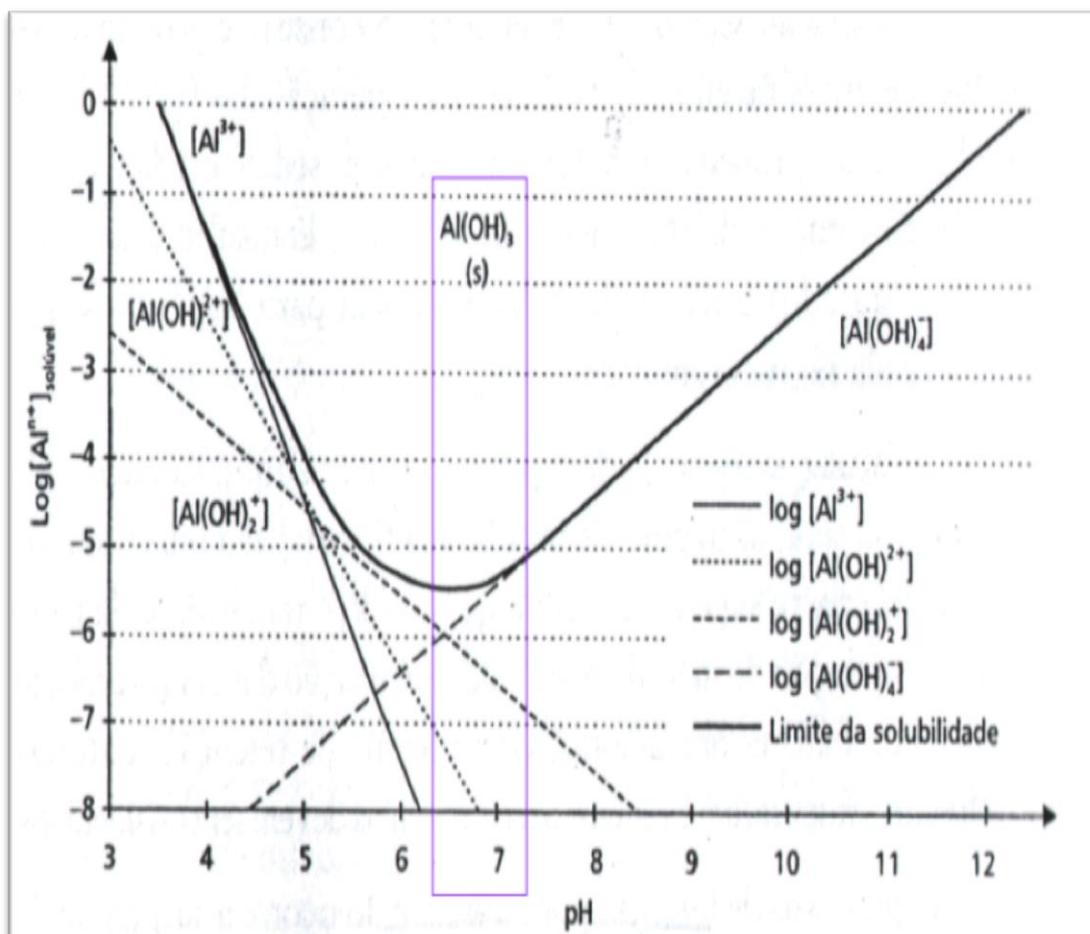


Figura 2: Variação de compostos de alumínio e sua relação com o pH

Fonte: Adaptado CRESPILO E REZENDE (2004).

O detalhe retangular grifado enfatiza a estabilização do Hidróxido de Alumínio – principal responsável pela coagulação – na faixa de pH próximo da neutralidade.

A reação anódica para eletrodos de alumínio pode ser escrita em termos de potencial elétrico aplicado entre dois eletrodos. As equações (4.4) e (4.6) – apresentadas no Item 4.5 - representam a oxidação do Alumínio e a reação de hidrólise do Alumínio. Da mesma forma que o pH altera a estabilidade dos produtos originados da eletrólise, fatores descritos na Figura 3, podem prejudicar o processo de eletroflotação (CRESPILO E REZENDE, 2004).



**Figura 3: Desvantagens da Eletroflotação**  
**Fonte: Adaptado - CRESPILO E REZENDE (2004).**

#### 4.7 SEPARAÇÃO DE MICROALGAS

A formação de flocos foi estudada por Harif *et al.* (2012) comparando métodos de coagulação química utilizando alumínio e eletrocoagulação com ânodo de alumínio. Os testes realizados consideraram variações de pH entre 5,0 , 6,5 e 8,0 tendo como base uma solução mineral de caulino tamponado. A utilização de coagulação química depende do modo de adição da solução coagulante e apresentou os melhores resultados em pH 8,0. Já a eletrocoagulação pode atuar considerando uma maior variação dos valores de pH. Contudo os flocos formados por coagulação química são mais resistentes a processos de alto cisalhamento sendo a eletrocoagulação aplicada para tempos menores de floculação.

Wu *et al* (2012) utilizou a variação do pH com hidróxido de sódio como método para separação de microalgas. Os experimentos continham volume de 20 (vinte) litros e foram testadas espécies de algas marinhas e de água doce. Em

função da variação do pH foram determinados que o início do processo de floculação se deu a partir de pH 8,6. Contudo, somente remoções consideráveis (90%) foram alcançadas para pH de 10,6 para algas de água doce. Para algas marinhas o início da floculação aconteceu em pH próximo a 8,0 e a eficiência de remoção em pH próximo de 9,0.

Chen *et al* (2011) realizou um trabalho sobre estado da arte remetendo-se ao tema de cultivo de microalgas em fotobiorreatores e métodos para sua separação. Dentre os métodos para separação citados destacam-se: centrifugação, coagulação química, flotação, floculação, processos eletrolíticos, sedimentação por gravidade dentre outros.

Souza *et al* (2005) utilizou técnicas eletrolíticas para polimento de efluentes de lagoa de estabilização. Comparou eletrodos de alumínio e ferro em diferentes tempos de detenção, com espaçamento variado entre eletrodos e diferentes intensidades de correntes aplicadas. Concluiu, desta forma, que esse processo é eficiente para remoção de microalgas em lagos tendo como parâmetro base a análise de turbidez para qual encontrou resultados significativos de remoção de material, equivalente a 90%. Contudo, para o processo realizado neste estudo os custos comparados a utilização de coagulantes químicos foram maiores.

De acordo com Gao *et al* (2010), *apud* Bjerk, 2012, os eletrodos construídos em alumínio, comparados com os em ferro, tem um aumento de eficiência de remoção na ordem de 78,9% para 100%, em 45 ( quarenta e cinco) minutos de processo. Fator que pode ser explicado pela maior carga que flui pelos eletrodos de alumínio. Quanto maior a corrente aplicada no sistema, maior a geração de microbolhas.

#### 4.8 ELETROFLOTAÇÃO APLICADA A SEPARAÇÃO DE BIOMASSA DA MICROALGA DESMODESMUS SUBSPICATUS

“A extração da biomassa é a etapa mais difícil do processo de produção de microalgas, uma vez que a adoção de métodos convencionais mostra-se ineficiente para este fim. Encontra-se agregado à biomassa de microalgas grande percentual de óleo além de outros compostos e pigmentos de interesse comercial” (BJERK, 2012).

Poelman, Pauw e Jeurissen (1996), *appud* Bjerck, (2012) afirmaram que o consumo energético do processo de eletroflotação é relativamente baixo, segundo suas medições, aproximadamente 0,3 KW h/m<sup>3</sup>.

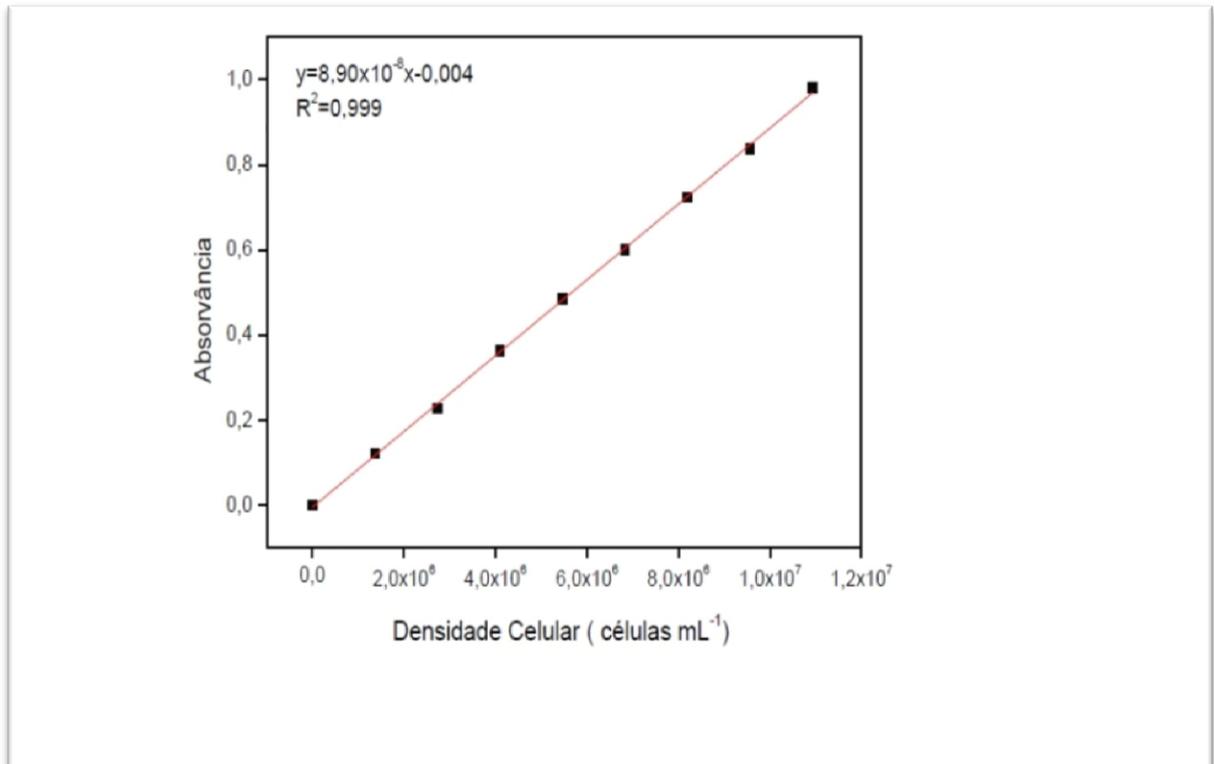
Gao *et al.* (2010), afirmam que se adicionado cloro ao eletrólito eletroflotado, utilizando eletrodos de alumínio, há um aumento da eficiência de remoção de material suspenso. O cloro aumenta a corrosão do eletrodo de alumínio, desta forma libera maiores quantidade de Al<sup>+3</sup> para o meio. Contudo, a adição de cloro, dependendo das reações de oxi-redução no interior da cuba eletrolítica, pode promover a geração de gás tóxico.

#### 4.9 AVALIAÇÕES DE CRESCIMENTO DAS MICROALGAS RELACIONANDO ABSORBÂNCIA E BIOMASSA SECA

O método de determinação da densidade celular relacionando massa seca pode ser usado como estimativa de biomassa em um sistema de cultivo de microalgas.

Há uma correlação entre dados de absorvância e contagem de células por câmara de Neubauer, conforme mostrado na Figura 4 que mostra a padronização do método de determinação da densidade celular e peso seco por espectrofotômetro UV/Visível (BJERK, 2012). Segundo Rocha *et al*, (2003) o método de absorvância – usado como estimativa de densidade de células em um sistema de cultivo - é um

método menos preciso para estimar a quantidade de biomassa de algas presente no sistema, contudo desprende menos tempo do analista.



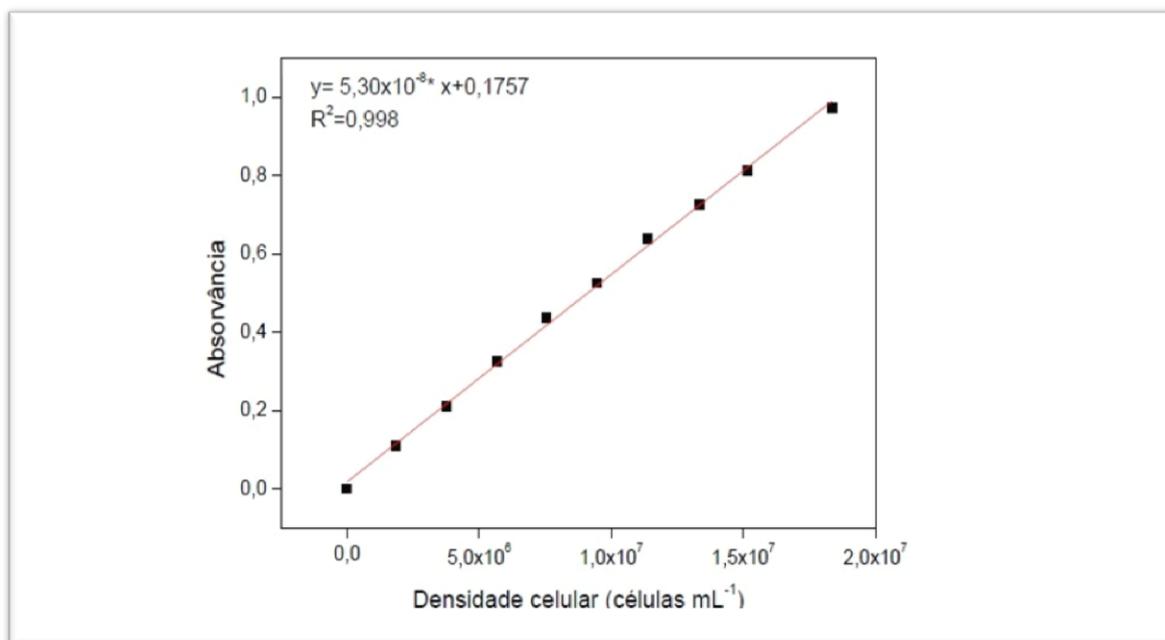
**Figura 4: Relação entre Absorvância e densidade de células de microalgas**  
Fonte: BJERK (2012)

“A inclinação da reta apresenta uma correlação um pouco menor se comparada a curva analítica elaborada para a determinação de densidade de *Desmodesmus subspicatus*, isto se deve ao fato de que no sistema misto há presença de diferentes gêneros de algas, entretanto esta variação não apresenta uma perda expressiva na capacidade de predição do método uma vez que obteve-se um valor de correlação muito próxima a 1,0” (BJERK, 2012).

Os dados encontrados por Bjerk (2012) comprovam o que foi dito por Chiu *et al* (2008) onde o autor afirma que, o método de densidade óptica torna possível prever de forma bastante eficiente a densidade celular, estabelecendo uma relação com os resultados de biomassa seca .

Bjerk (2012) avaliou analiticamente a relação entre medições de absorvância e densidade celular, de microalgas em um cultivo misto. Esse dado pode servir para complementar a base de referência analítica obtida para as análises físicas e

químicas abordadas neste trabalho, pois se pode utilizar o parâmetro de absorvância – como estimativa de crescimento - tanto para um cultivo puro quanto para um cultivo misto de microalgas. A Figura 5 mostra a curva analítica obtida.



**Figura 5: Relação da absorvância e densidade celular de um cultivo misto de microalgas**  
**Fonte: Adaptado BJERK (2012).**

#### 4.10 OXIDAÇÃO DE ÓLEOS VEGETAIS

Freitas *et al*, (2005) determinaram que íons férricos atuam como importantes atores na degradação de óleos vegetais. Considerando os parâmetros Ácidos Graxos Livres, Índice de peróxido e decaimento do Índice de Iodo. O objetivo do estudo foi quantificar a migração dos íons Alumínio, Ferro e Silício, para o óleo, avaliando a influência da composição dos seguintes recipientes (inox, ferro, alumínio e de vidro) usados no processo de fritura dos óleos de algodão, soja e Nhandiroba (*Fevillea trilobata*).

A empresa Suprema Lubrificantes, em seu artigo técnico, Análise de Óleo, apresenta informações a respeito de análises quantitativas e qualitativas de óleos lubrificantes. Neste trabalho a técnica de Espectrometria foi utilizada para avaliar

precisamente o conteúdo de metais, como: ferro, cobre, alumínio, níquel, cromo, chumbo, dentre outros.

## 5. METODOLOGIA

Por meio de sua diretoria, a Churrascaria Devon's Grill localizada na Rua Lysimaco Ferreira Costa, 436, Curitiba – PR procurou o Instituto de Tecnologia do Paraná (TECPAR) para resolver um problema com a emissão de odor da fumaça da sua chaminé. A proposta do TECPAR, concebida pela antiga Divisão de Tecnologias Sociais, hoje Centro de Análises e Ensaio Laboratoriais (CETEC), foi a utilização de um filtro biológico contendo microalgas para o tratamento da fumaça e odor emitido.

O sistema piloto foi construído e é composto de dois fotobioreatores com capacidade para 0,5 m<sup>3</sup>. O sistema, depois de remodelado, totaliza um volume de dez metros cúbicos. Inicialmente, o sistema tinha por finalidade efetuar o tratamento de 10 % da fumaça lançada na atmosfera. Depois de instalado, verificou-se que o projeto piloto mostrou-se eficiente para tratar 30 % do material que é emitido.

Os experimentos laboratoriais e a coleta de dados deste trabalho foram realizados no local aonde o sistema vem sendo operado (Devon's Grill), recebendo suporte dos laboratórios do TECPAR.

Foram definidos um total de 18 amostras, divididas em 6 (seis) lotes distintos, dessa maneira obteve-se dados por batelada de material eletroflotado.

Os Lotes foram nomeados de 1 a 6 - onde, cada um foi dividido em três grupos de estudo – a) Biomassa de entrada, b) flotado e c) Clarificado.

As amostras foram divididas em três categorias de amostragem: matriz representativa do cultivo dos fotobioreatores, definida como ponto de amostragem inicial (P1); matriz representativa da fração clarificada, definida como ponto de amostragem dois (P2); matriz representativa da fração flotada, definida como ponto de amostragem três (P3) - ambos obtidos a partir da eletroflotação de 60 litros de solução de cultivo de microalgas. A Figura 6 mostra os pontos de amostragem P1, P2 e P3, sendo que, para cada batelada analisada foi realizada uma nova coleta.

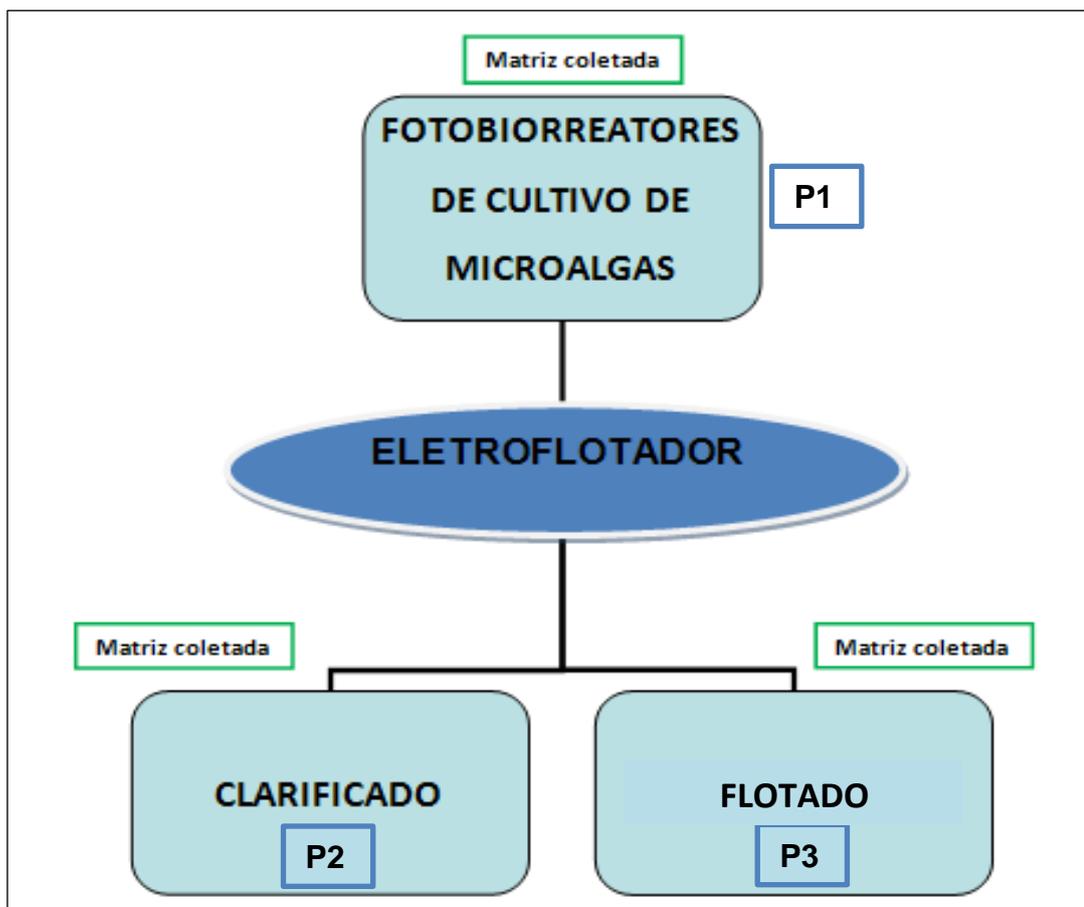


Figura6: Representação dos pontos de amostragem: P1, P2 e P3.

## 5.1 CONSTRUÇÃO DO ELETROFLOTADOR

O sistema de eletroflotação foi construído com materiais alternativos, reduzindo drasticamente os custos para sua confecção. Basicamente sua geometria pode ser dividida em: câmara eletrolítica - recipiente com capacidade de 60 litros, uma válvula de escoamento e dois eletrodos em alumínio.

A uma distância aproximada de 5 centímetros a cima da base do recipiente foi conectada uma válvula para esgotamento da fração clarificada. Os eletrodos construídos conforme o item 5.2 e dimensionados para este recipiente foram fixados no fundo.

Para a condução de eletricidade, dois fios foram ligados aos eletrodos e conectados a uma fonte modelo OS-5000 que opera em uma corrente continua

podendo variar de 0 a 4 Amperes e a uma tensão fixada na faixa de 32 Volts. Com estes dados é possível relacionar a quantidade de energia gasta por tempo de eletroflotação.

#### 5.1.1 Eletrodos para obtenção de dados de tensão

A tensão da célula eletrolítica é mantida constante e eletrodos de referência para coleta de dados de tensão foram ligados em paralelo, efetuando a medição da diferença de potencial de cada eletrodo de alumínio. Para este trabalho, não foram feitas considerações a respeito da formação das reações nos eletrodos. Contudo, dados de tensão da extremidade dos eletrodos obtidos por voltímetro indicam se há perda de carga pela fiação da entrada da fonte até o contato com os eletrodos.

### 5.2 CONSTRUÇÃO DOS ELETRODOS

#### 5.2.1 Materiais utilizados

Os materiais que compõem os eletrodos podem ser placas de metais como cobre, alumínio, ferro e aço inox. Essas placas podem ser compradas em metalúrgicas, serralherias ou encontradas em ferros velhos. A Tabela 03 mostra o custo de placas de alumínio e aço inox com dimensões mínimas para comércio. Os dados são referentes somente à empresas localizadas em Curitiba - PR.

**Tabela 2: Custo de placas de alumínio e aço inox**

<b>COMPONENTES</b>	<b>ESPECIFICAÇÃO</b>	<b>CUSTO (R\$)</b>	<b>EMPRESA</b>
Chapa de Alumínio	2 m X 1 m X 0,001m	R\$ 149,63	Alumiplast
Chapa de Aço Inox (304)	1 m X 1 m X 0,001m	R\$ 350,00	Parceira da Mensul
Chapa de Aço Inox (430)	1 m X 1 m X 0,001m	R\$ 250,00	Parceira da Mensul

Para as chapas de aço inox, segundo a empresa consultada, a diferença entre os preços se dá pela maior resistência à corrosão. Efetuando a compra por CNPJ o preço da chapa de alumínio é reduzido para R\$ 89,78. Para a construção dos eletrodos foram selecionadas placas de metais em empresas de ferro velho de Curitiba.

Há possibilidade de utilização de metais com maior potencial de redução, como a platina. A taxa de retorno em longo prazo justificaria essa aquisição. No âmbito deste trabalho, uma chapa de alumínio com dimensões de 1 metro x 0,5 metro x 0,01 metro, foi adquirida na empresa Ferro Velho Curitiba, por R\$ 17,00.

Para a cuba eletrolítica, o recipiente de 60 litros foi adquirido no laboratório da extinta Divisão de Tecnologias Sociais, bem como as tubulações e conexões utilizadas.

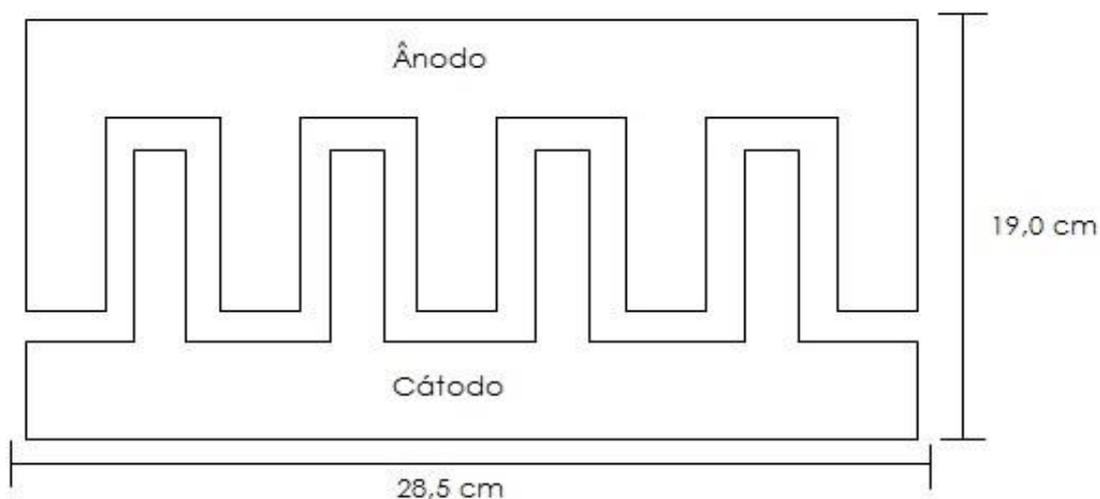
### 5.2.1 Confeção dos eletrodos

No início dos estudos envolvendo eletroflotação foi necessária a confecção de eletrodos para realização de testes em bancada. Uma caixa plástica de 37,5 cm de comprimento, 31,0 cm de largura e 16,5 cm de altura foi definida para utilização nos testes. A adequação dos eletrodos no fundo da caixa deveria ser de tal forma que as microbolhas geradas durante a eletrólise atingissem a maior área da solução e mantivessem uma distância segura para evitar o risco de curto-circuito.

Os materiais para construção dos eletrodos foram reaproveitados do local destinado ao descarte de resíduos do TECPAR. Para tanto, utilizou-se uma chapa

de alumínio de 1 mm de espessura, parafusos, porcas, arruelas e uma placa de madeira.

Os eletrodos construídos foram baseados no formato representado na Figura 7. Foram dispostos de forma que não se encostassem e a uma distância segura para evitar curto-circuito. O modelo projetado visa a economia de material na confecção.



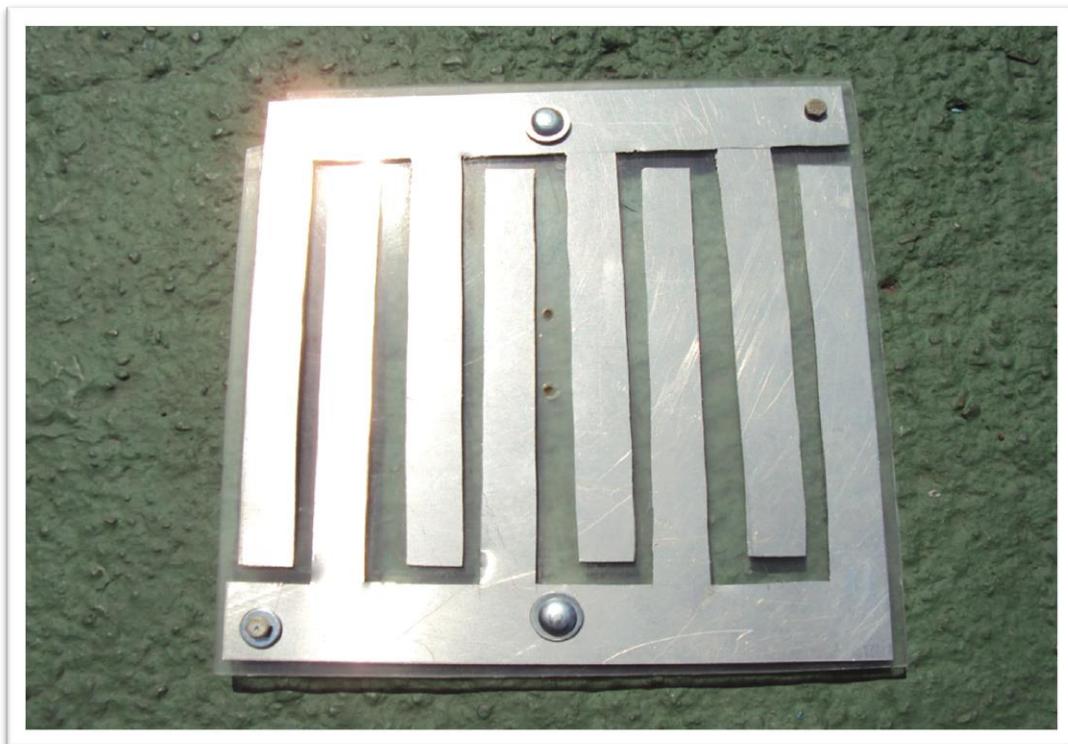
**Figura 7: Modelo de eletrodo**

A fixação dos eletrodos foi realizada com dois parafusos que continham uma arruela e uma porca cada um. Estes foram presos a uma placa de madeira com dimensões iguais a do fundo da caixa plástica. As porcas fixam os eletrodos a placa de madeira enquanto as arruelas servem para conectar os dois conjuntos de fios, que serão ligados a fonte de energia, aos eletrodos.

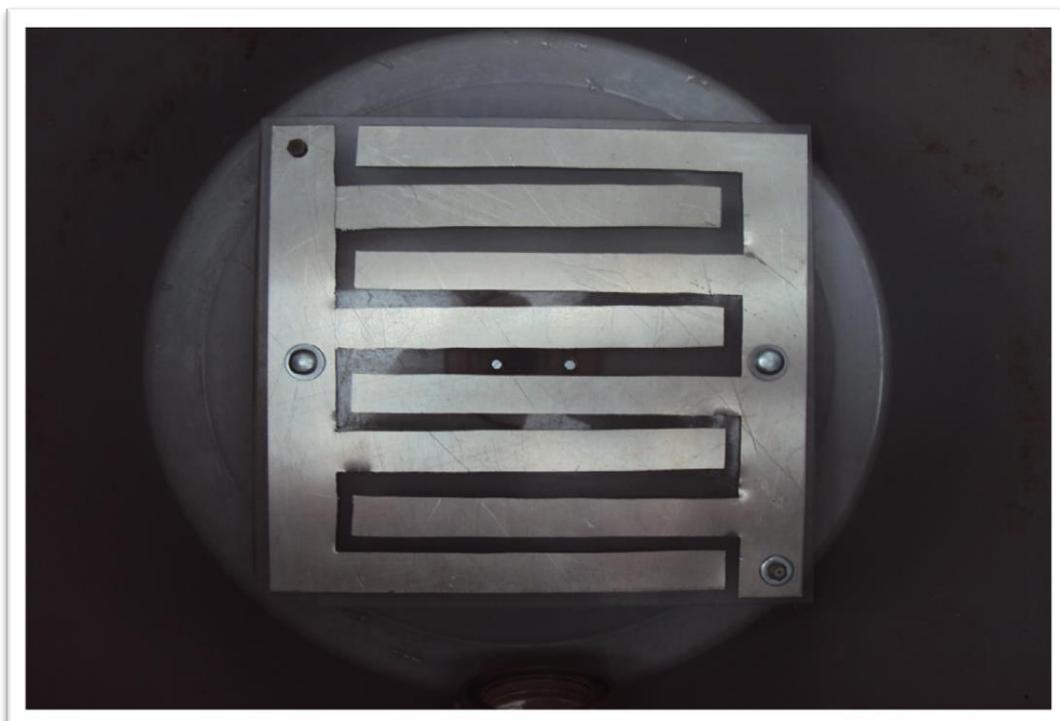
Para o sistema de eletroflotação do qual foi testado a eficiência, um dos objetivos deste trabalho, os eletrodos foram fixados em uma chapa acrílica. A fixação se deu da mesma forma que para o exemplo anteriormente descrito, com mudanças nas dimensões e formato da cuba eletrolítica.

Na porção inferior da cuba, um flange de  $\frac{3}{4}$  polegadas foi fixado dando suporte a uma válvula para esgotamento que contém a mesma dimensão. Dois flanges de  $1 \frac{1}{2}$  polegadas foram fixados verticalmente ao lado do equipamento e entre eles uma tubulação transparente conectada por duas curvas de PVC de  $45^\circ$ . Esse acessório auxilia na visualização do decorrer do processo e no controle de volume do eletroflotador.

Na Figura 8 e 9 estão representadas as etapas de fixação dos eletrodos de alumínio.



**Figura 8: Eletrodos de alumínio fixados na chapa de acrílico**



**Figura 9: Fixação dos eletrodos na cuba eletrolítica**

Na Figura 10, é mostrado o eletroflotador em operação. A biomassa de microalgas concentrada e flotada na parte superior da cuba eletrolítica.

O detalhe da clarificação pode ser evidenciado previamente, comparando a coloração da solução de cultivo, observada na tubulação de controle de volume, com a que esta sendo cultivada no fotobioreator de baixo custo, mostrado em segundo plano, no canto inferior direito da imagem.



**Figura 10: Eletroflotador em funcionamento**

### 5.3 SEPARAÇÃO DA BIOMASSA

Depois de fixar e conectar os eletrodos à fonte de energia o volume do eletroflotador é aferido e o processo de eletroflotação opera durante 10 (dez) minutos, visto que não há interesse em uma separação total das microalgas em suspensão. A biomassa residual é utilizada como novo inóculo. Nesse intervalo de tempo foram coletados dados de corrente, tensão e absorbância.

Passados 10 minutos, a fonte de energia é desligada e a válvula de escoamento é aberta para retirada da porção clarificada da solução. A biomassa concentrada de microalgas permanece dentro do recipiente, aguardando sua retirada.

Para a coleta das matrizes definidas para análise em laboratório, cada processo é realizado em batelada e a cuba eletrolítica é limpa antes do início das próximas avaliações.

### 5.4 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA E DO CLARIFICADO

#### 5.4.1 Análise de alumínio

O alumínio no clarificado e na biomassa de microalgas flotada foi quantificado. A possibilidade de toxicidade para o crescimento das microalgas determinará a utilização ou não do clarificado nos reatores.

A técnica para determinação de Alumínio na amostra foi realizada pelo Laboratório de Tecnologias Ambientais e Agronômicas – Atividades de Espectrometria - TECPAR. Consiste na utilização de Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado – ICP OES.

Esta técnica foi escolhida para ser empregada devido a maior sensibilidade comparada a absorção atômica já que não se sabe a real concentração do alumínio

na amostra a ser analisada. Antes da introdução do material para análise no equipamento a amostra será digerida com ácido nítrico e peróxido de hidrogênio. As referências utilizadas para esta técnica baseiam-se no trabalho de Alloway (1990) e de Nolte (2003).

#### 5.4.2 Sólidos suspensos

Para mensurar a quantidade de biomassa separada pelo processo de eletroflotação alíquotas da biomassa de entrada, clarificado e flotado foram filtradas e colocadas em estufa com recirculação a 100 a 105 °C. Por gravimetria é determinada a quantidade de matéria que não seja água nas amostras.

#### 5.4.3 Absorbância

A absorbância foi utilizada para determinação da quantidade de biomassa removida da biomassa de entrada eletroflotada. Segundo Knie (2004), a densidade de algas pode ser determinada diretamente por contagem de células em câmaras de Neubauer ou utilizando um contador automático de partículas. Contudo esses procedimentos não se enquadram na metodologia do trabalho apresentado.

O autor também considera a utilização de absorbância a um comprimento de onda de 685 nm – valor acatado por este trabalho - já que existe correlação entre quantidade de células e absorbância. As informações citadas por Knie (2004) são reforçadas por Bjerk (2012) e foram relatadas no Item 4.9.

#### 5.4.4 Determinação de absorvância

A primeira determinação de absorvância foi realizada no reator de cultivo que teve sua solução conduzida para eletroflotação. Passados 10 minutos de eletroflotação a fonte de energia foi desligada interrompendo o processo. Nesse momento a válvula de escoamento do clarificado foi aberta.

À medida que o volume do eletroflotador é esgotado foram coletadas alíquotas de amostras que foram conduzidas para análise de pH e absorvância. Para tanto foi utilizado um espectrofotômetro portátil DR 2700 da Hach e um phmêtro modelo UP-25 da Denver Instrument.

#### 5.4.5 Corrente

Foi realizada a medição de corrente efetuando-se a leitura na fonte de energia do sistema. Conforme especificado no manual de instrução do equipamento.

#### 5.4.6 Tensão

Há uma relação entre corrente e tensão determinada pela fonte de alimentação e por um voltímetro portátil. Dois (02) pontos foram escolhidos para as medições: a saída da fonte de alimentação e as extremidades dos eletrodos.

Ao terminal da fonte de energia e nas extremidades dos eletrodos foram fixados eletrodos de cobre que servem como referência para a coleta dos dados realizados com auxílio de um voltímetro portátil.

#### 5.4.7 Análise da eficiência de remoção das microalgas

A equação 5.1 foi utilizada para os cálculos de eficiência de remoção de microalgas do sistema de eletroflotação.

$$\eta_{ABS} = \left( \frac{ABS_{Entrada} - ABS_{Saída}}{ABS_{Entrada}} \right) \times 100\% \quad (5.1)$$

Onde:

$\eta_{ABS}$  = Eficiência de remoção em termos de absorvância;

$ABS_{Entrada}$  = Absorvância da biomassa de entrada;

$ABS_{Saída}$  = Absorvância da solução clarificada.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 ANÁLISES DOS PARÂMETROS FÍSICOS

#### 6.1.1 Avaliação de absorvância no sistema Devon's

##### 6.1.1.1 Clarificado:

Para estimar a quantidade de microalgas separadas, um dos parâmetros analisados foi a absorvância. A coleta de dados deste parâmetro e os dados de pH foram realizadas ao mesmo tempo. Os dados obtidos provem da média de 05 (cinco) amostragens e estão representados na Tabela 2. Todas as medições descritas como “Entrada” referem-se à solução cultivada nos fotobioreatores. Os dados de absorvância e pH são apresentados na mesma tabela pois foram coletados ao mesmo tempo e caracterizam o comportamento da solução de microalgas após a eletroflotação.

A Tabela 2 mostra a relação entre a absorvância de “Entrada” – referente a solução de microalgas introduzida no eletroflotador - e a absorvância de “Saída” - referente a absorvância da solução de microalgas que foi clarificada após a passagem pelo equipamento de eletroflotação. Pode ser observado que em todos os Lotes estudados o pH sofre uma variação comparando-se a solução de “Entrada” e “Saída”. Bem como há redução dos valores da absorvância para todos os Lotes analisados.

Tabela 3: Dados de absorvância e pH de cada Lote estudado.

Coleta de dados para cada Lote		Absorvância $\lambda = 685$	pH
LOTE 1	Entrada	1,924	7,36
	Saída	0,224	7,48
LOTE 2	Entrada	1,743	7,82
	Saída	0,464	8,06
LOTE 3	Entrada	1,727	7,45
	Saída	0,220	7,56
LOTE 4	Entrada	2,127	7,96
	Saída	0,814	8,104
LOTE 5	Entrada	1,707	7,26
	Saída	0,243	7,42
LOTE 6	Entrada	2,243	7,71
	Saída	1,109	7,94

Foram realizadas medições de absorvância a 685 nm na biomassa de entrada e no Clarificado - nos 06 (seis) lotes amostrados. Um comparativo – em termos de absorvância - da biomassa de entrada – contida nos fotobioreatores - e a média dos resultados das medições para a solução clarificada. A comparação é apresentada conforme a representação obtida na Figura 11.

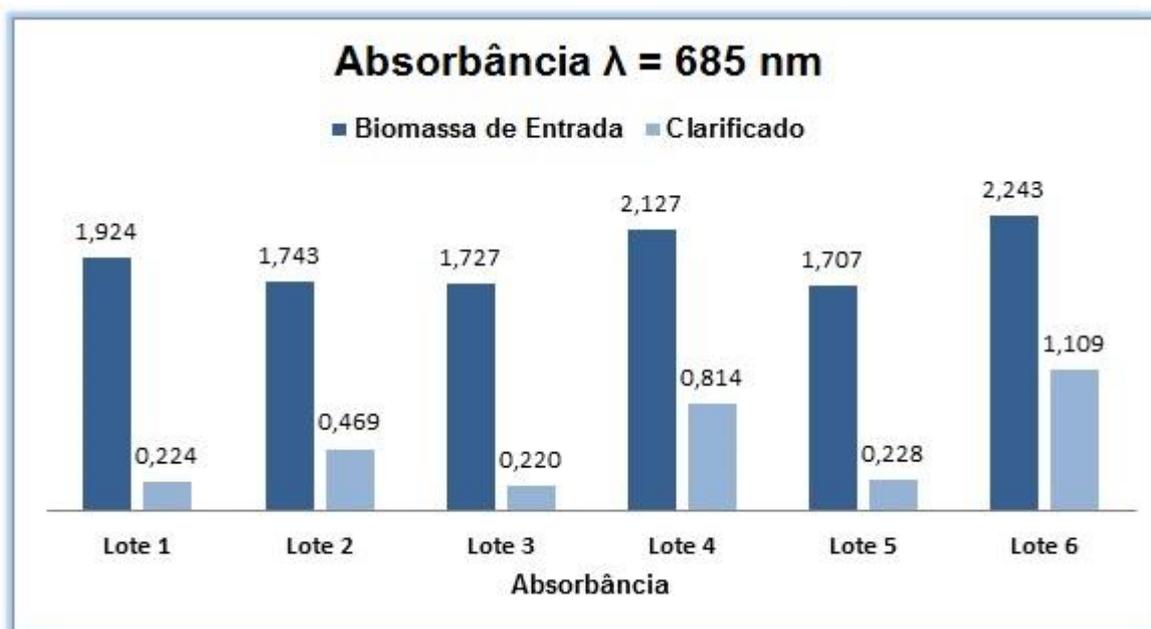


Figura 11: Análise de absorvância dos Lotes de 1 a 6

Pode-se observar que em todos os lotes analisados ocorreu o decaimento da absorvância, representada pela solução introduzida no eletroflotador. Depois da separação, foram coletadas aliquotas do clarificado que seria reintroduzido nos fotobioreatores. Dessa forma, concluiu-se que a separação de microalgas pelo processo eletrolítico foi satisfatória e eficiente dada a redução dos valores da absorvância.

Pode-se estimar a eficiência de remoção de biomassa, em termos de absorvância no comprimento de onda a  $\lambda = 685$  nm. Para tanto foi utilizado a equação (7.1), apresentada no Item 5.4.8. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 4.

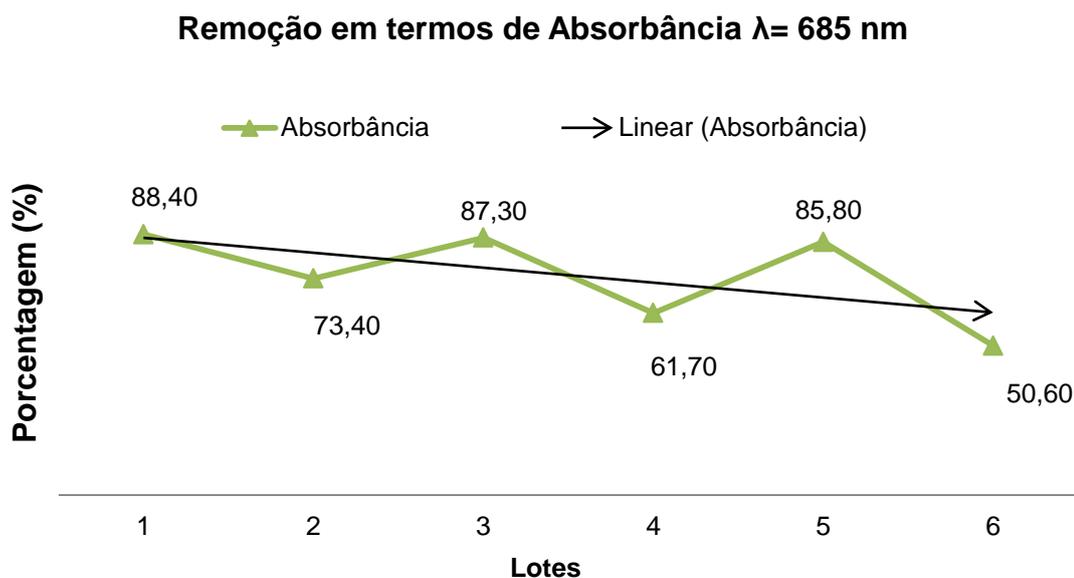
**Tabela 4: Eficiência de remoção de biomassa para cada Lote**

<b>Porcentagem de remoção de biomassa em termos de absorbância <math>\lambda=685</math> (%)</b>					
<b>LOTE 1</b>	<b>LOTE 2</b>	<b>LOTE 3</b>	<b>LOTE 4</b>	<b>LOTE 5</b>	<b>LOTE 6</b>
<b>88,4%</b>	<b>73,4%</b>	<b>87,3%</b>	<b>61,7%</b>	<b>85,8%</b>	<b>50,6%</b>

A escolha do parâmetro absorbância foi embasada nas afirmações de Knie (2004). O autor o utiliza para analisar o crescimento de microalgas, pois se trata de um método rápido, diferentemente do método de contagem de células.

A estimativa das porcentagens de remoção de microalgas, para cada lote, foi realizada comparando-se a absorbância inicial do cultivo de microalgas, introduzido no eletroflotador, com a média de 06 (seis) coletas realizadas à medida que o clarificado era escoado da cuba eletrolítica. Como o tempo de separação foi padronizado para dez minutos, a remoção não atingiu valores superiores aos encontrados na Tabela 4. Contudo, a fração clarificada retorna para os reatores de cultivo e, a biomassa de microalgas residual, atua como inóculo, dando início a um novo cultivo. Por esse motivo, para o caso Devon's Grill, a remoção total das células acarretaria em custos com a preparação de um novo inóculo.

Na Figura 12 é apresentado o comportamento da linha de tendência para os dados de eficiência de remoção de microalgas apresentados na Tabela 4.



**Figura 12: Comportamento médio da reta para determinação da eficiência de separação de microalgas**

A característica da inclinação da linha de tendência pode remeter a afirmações errôneas. A eficiência de separação de microalgas pode ter seus níveis reduzidos do primeiro ao último lote, por uma série de fatores. Crespilho e Rezende (2004) comentam os efeitos deletérios da passivação do cátodo em eletrodos de alumínio. Os autores afirmam que o óxido formado, quando em contato com o ar, atua como um filme impermeável aumentando a resistividade do eletrodo provocando perda de eficiência. Wiendl (1998) utilizou a eletroflotação para tratamento de esgoto doméstico. Em seu trabalho observou que há perda de eficiência no processo quando as características do efluente variam. Neste sentido, a inclinação da curva de tendência pode ser explicada, pois os eletrodos não foram limpos depois de cada eletroflotação. Filmes de óxidos podem ter sido originados devido a reações nos eletrodos, os íons que compõem a solução de cultivo de microalgas podem ter variado suas características, seja por efeito do consumo de sais e nutrientes pelas microalgas, ou pelo fato de que as séries de eletroflotações não foram realizadas no mesmo dia.

Silva (2013) obteve valores na faixa de 80% de separação, por eletroflotação, de uma amostra de microalgas coletada de uma lagoa de estabilização. A autora utilizou o parâmetro de turbidez como indicador da

separação e uma cuba eletrolítica com capacidade para 2,9 litros durante 20 (vinte) minutos de processo. A média das porcentagens de remoção apresentadas na Figura 12 está na faixa de 75,23%, para 60 litros de solução eletroflotada, com tempo de duração de processo entre 10 e 15 minutos.

A fração residuária de microalgas no clarificado representa a porcentagem de organismos que seria reintroduzida na próxima inoculação dos fotobioreatores. As microalgas que não foram separadas são responsáveis pela continuidade do cultivo. Por isso esta faixa de tempo de duração do processo foi padronizada, garantindo um balanço energético favorável e economia na produção de um novo inóculo.

#### 6.1.1.2 Biomassa

##### 6.1.1.2.1 Análise de sólidos suspensos (100 a 105°C)

Este parâmetro estabelece uma estimativa da remoção de biomassa por processo de Eletroflotação. O teor de sólidos suspensos é definido pela massa de sólidos retida por unidade de volume de amostra que passa por uma malha filtrante.

A Tabela 5 apresenta os valores obtidos em laboratório, da concentração de sólidos suspensos para cada lote estudado, bem como os valores para a biomassa de entrada, presente nos fotobioreatores, do clarificado e do flotado de microalgas obtidos pelo processo de eletroflotação.

Tabela 5:Concentração de sólidos suspensos nos Lotes estudados.

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS		Sólidos Suspensos - Material Insolúvel 100 a 105 °C (mg/L)
LOTE 1	Biomassa de entrada	380
	Clarificado	96
	Flotado	11160
LOTE 2	Biomassa de entrada	336
	Clarificado	66
	Flotado	9100
LOTE 3	Biomassa de entrada	332
	Clarificado	40
	Flotado	11120
LOTE 4	Biomassa de entrada	460
	Clarificado	24
	Flotado	11450
LOTE 5	Biomassa de entrada	400
	Clarificado	48
	Flotado	9750
LOTE 6	Biomassa de entrada	540
	Clarificado	94
	Flotado	9450

O cálculo da estimativa de eficiência de remoção de biomassa para cada lote é mostrado na Tabela 6. A Figura 13 relaciona a quantidade de sólidos suspensos removidos para cada escopo estudado nos seis lotes analisados.

A estimativa de sólidos suspensos – baseada na equação 5.1 apresentada no Item 5.4.7 - pode servir como parâmetro indicativo de remoção de material suspenso (microalgas), pelo sistema de eletroflotação.

A Tabela 6 apresenta a porcentagem de remoção de microalgas - em termos de sólidos suspensos – comparando-se a concentração de entrada, referente a solução cultivada no fotobioreator, ou seja, utilizada para completar o volume do equipamento de eletroflotação e a concentração de saída, que refere-se ao clarificado obtido pela eletroflotação de 60 litros da solução de cultivo.

Foram obtidos 74,73% de eficiência de remoção de microalgas para o estudo referente ao Lote 1. O resultado de remoção, para o Lote 2, foi superior ao encontrado na primeira eletroflotação, com valores próximos a 80,35%. O estudo referente ao Lote 3, apresentou uma estimativa em termos de sólidos suspensos de 87,95 %. Para o Lote 4 a porcentagem de remoção foi a maior encontrada neste trabalho, com valores alcançando a faixa dos 94,78 % de separação. Partindo da fórmula 5.1, o Lote 5 apresentou uma eficiência de remoção, em termos de sólidos suspensos, de 88 %. Os estudos referentes ao Lote 6, obtiveram uma eficiência de remoção, para o sistema de eletroflotação projetado, com valores próximos a 82,59%.

**Tabela 6: Eficiência de remoção de microalgas em termos de sólidos suspensos**

<b>Lotes</b>	<b>Concentração de Entrada (mg/L)</b>	<b>Concentração de Saída (mg/L)</b>	<b>Eficiência (%)</b>
1	380	96	74,73
2	336	66	80,35
3	332	40	87,95
4	460	24	94,78
5	400	48	88,9
6	540	94	82,59

### 6.1.1.2.2 Separação de microalgas em termos de Sólidos Suspensos

A Figura 13 mostra a variação de remoção, para cada Lote, da biomassa de microalgas, em termos de sólidos a 100°/105°C. São apresentados dados da biomassa de entrada, do clarificado e do flotado.

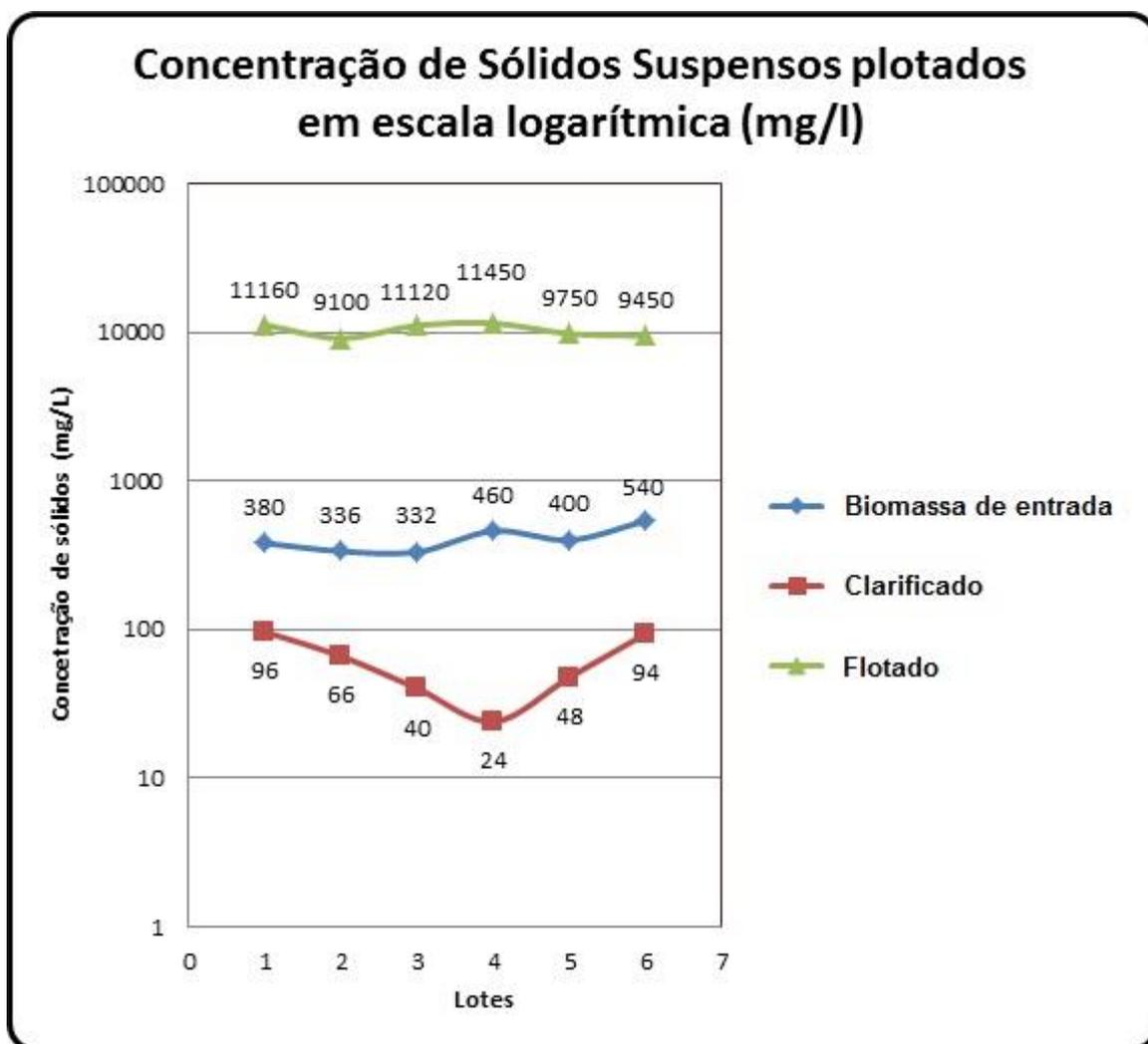
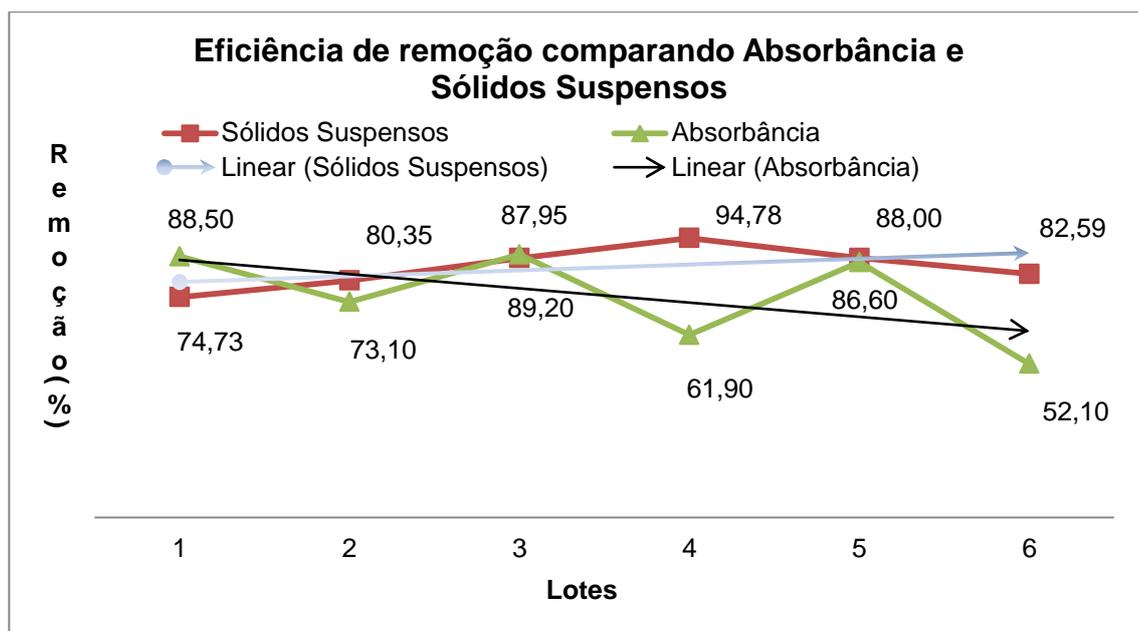


Figura 13: Sólidos Suspensos nas amostras da Biomassa de Entrada, Cultivo e Flotado.

A escala logarítmica serviu como base para relacionar as concentrações de sólidos do âmbito analisado. Contudo, pode parecer que há equívocos no balanço de massa do sistema, pois a concentração de biomassa na saída do sistema

(flotado) apresenta valores acima do encontrado na entrada – biomassa de entrada. Este dado está correto, pois o que ocorre com o processo de eletroflotação é justamente a concentração das microalgas suspensas na solução de cultivo.

Para afirmações mais precisas quanto a eficiência de separação do sistema proposto foram comparadas as porcentagens de remoção de microalgas em termos de Sólidos Suspensos e Absorbância. O resultado é apresentado na Figura 14.



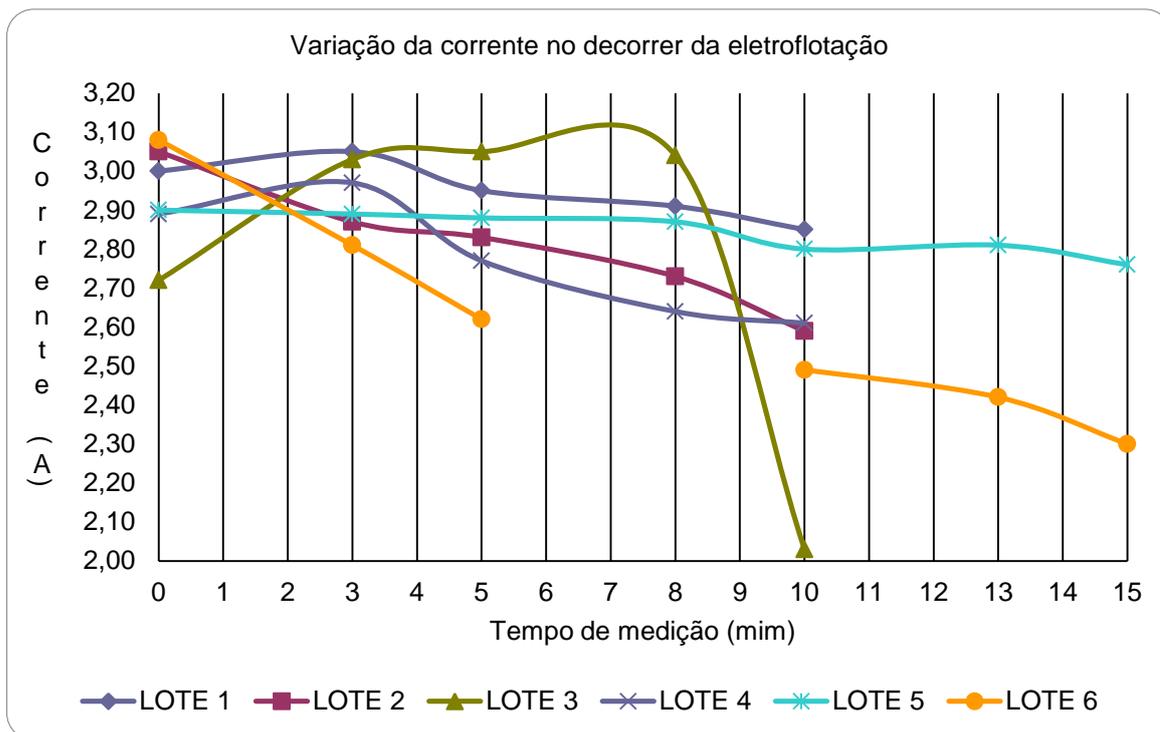
**Figura 14: Eficiência de remoção comparando os parâmetros de sólidos suspensos e absorbância**

A média da eficiência de remoção em termos de sólidos suspensos alcançou valores maiores comparados com a absorbância, 84,73% e 75,23% respectivamente. A linha de tendência para o parâmetro de sólidos suspensos tende a uma inclinação contrária a apresentada pela linha traçada na Figura 14, representada pela remoção em termos de absorbância. O decaimento da eficiência de remoção para os pontos 5 e 6 da Figura 16 podem vir a serem justificados pela passivação do catodo descrita por Crespilho e Rezende (2004), bem como pela mudança das características da solução eletroflotada, conforme descrito por Wiendl (1998), ambas informações comentadas no Item 7.1.1.1.

#### 6.1.1.2.3 Carga requerida para funcionamento do sistema

Foram realizadas amostragens de corrente e tensão utilizando um voltímetro e uma fonte retificadora de tensão. O controle da corrente durante o processo de eletroflotação é determinante na eficiência do processo de separação de microalgas. Segundo Maia (2010), “quanto mais íons deslocarem-se pela solução maior será a quantidade de elétrons envolvidos nas reações de oxi-redução e maior será a corrente drenada pela fonte.” A quantidade de carga aplicada resulta na geração das reações nos eletrodos e por sua vez na quantidade de gás que esta sendo gerado.

A queda dos valores obtidos para corrente pode indicar um acúmulo de óxido de alumínio no eletrodo gerando baixa condutividade. Dependendo do tempo de uso pode haver comprometimento do eletrodo por oxidação (CRESPILO E REZENDE, 2004). Outro fator que pode ser considerado é a metabolização dos sais que compõem o meio de cultivo pelos microrganismos o que pode acarretar a redução da condutividade visto que as eletroflotações não foram realizadas no mesmo dia. As microalgas consomem os sais a medida que aumentam sua densidade celular na solução, com a redução da concentração destes sais – que conferem condutividade ao meio – a passagem de corrente elétrica pela solução que atua como eletrólito pode ser dificultada. Os dados obtidos são apresentados na Figura 15 e evidenciam os relatos dos autores.



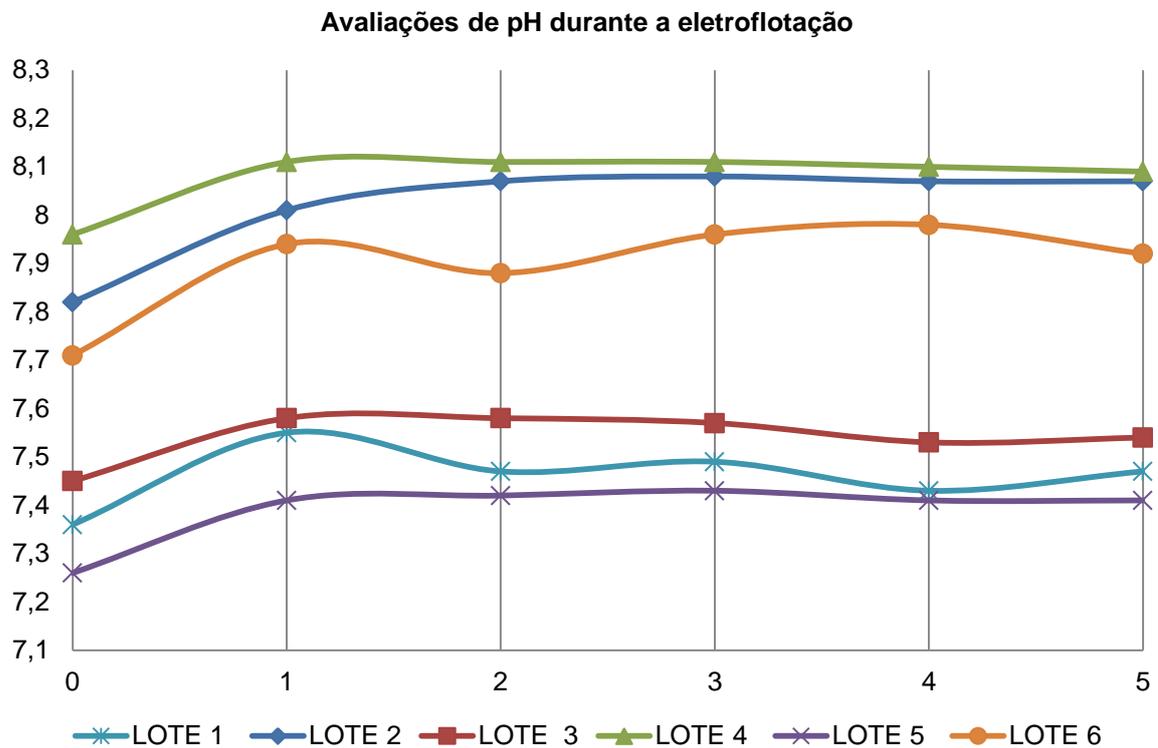
**Figura 15: Comportamento da corrente aplicada durante o tempo de eletroflotação**

## 6.2 ANÁLISES DOS PARÂMETROS FÍSICOS E QUÍMICOS

### 6.2.1 Análises em laboratório

### 6.2.2 Medidas de pH

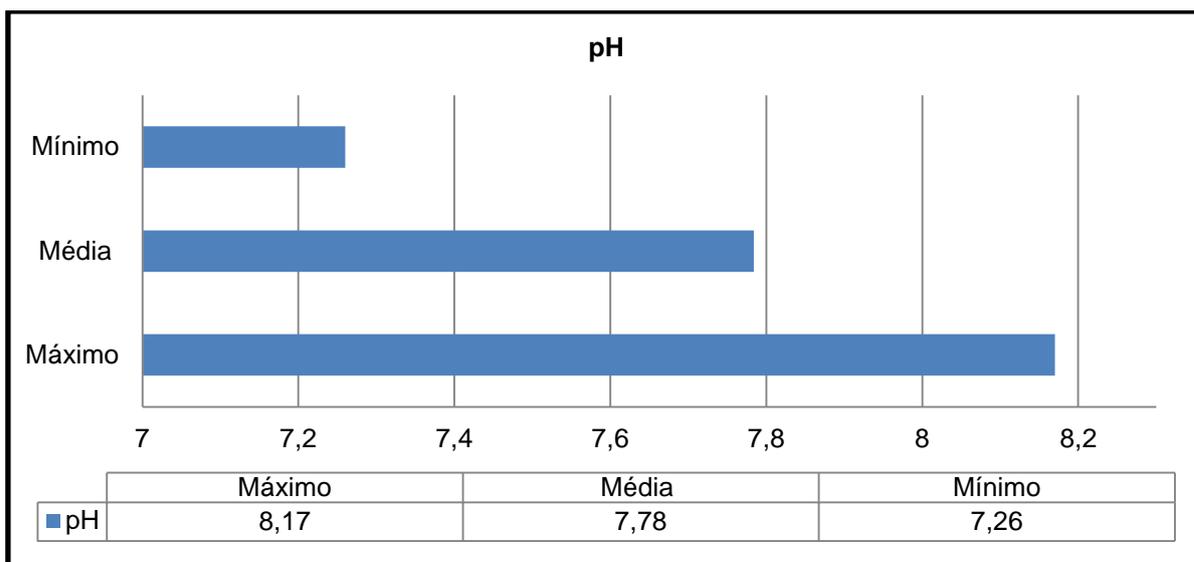
As Figuras 18 e 19, mostram a variação e a média do pH da solução de microalgas ao longo do processo de Eletroflotação para cada Lote de 60 (sessenta) litros. Foram realizadas cinco coletas encaminhadas para análise no tempo de processo de 10 (dez) minutos. O Ponto 0 da Figura 16 representa a coleta de dados de pH referente a biomassa de entrada de microalgas introduzida no eletroflotador.



**Figura 16: Variação do pH ao longo da Eletroflotação**

Observa-se que na totalidade dos lotes analisados o pH aumenta quando o sistema está em funcionamento, do Ponto 0 –biomassa de entrada– para os demais pontos da Figura 16. Cerqueira (2011) comenta que dependendo da concentração de alumínio na solução, compostos monoméricos e poliméricos podem ser originados das reações dos eletrodos o que acarreta no aumento do pH do eletrólito.

Na Figura 17 são mostrados os pontos de máximo, mínimo e média de pH. Os dados analisados foram coletados durante o processo de eletroflotação da solução de microalgas.



**Figura 17: Ponto máximo, mínimo e média do pH durante a eletroflotação**

Valores básicos de pH no final do processo são decorrentes das reações de eletrólise. O pH é uma variável que influencia na estabilidade de determinados compostos de alumínio. Cerqueira (2011) afirma que quando hidrolisados formam hidróxido de alumínio, que é solúvel, e o pH ideal para essa formação esta entre 6,5 e 7,0. No Item 4.6 deste trabalho, na Figura 02, adaptada de Crespilho e Rezende (2004), pode-se observar que o pH para formação das maiores concentrações do agente coagulante - hidróxido de alumínio – encontra-se na faixa apresentada na Figura 17 e de acordo com o evidenciado no trabalho de Cerqueira (2011).

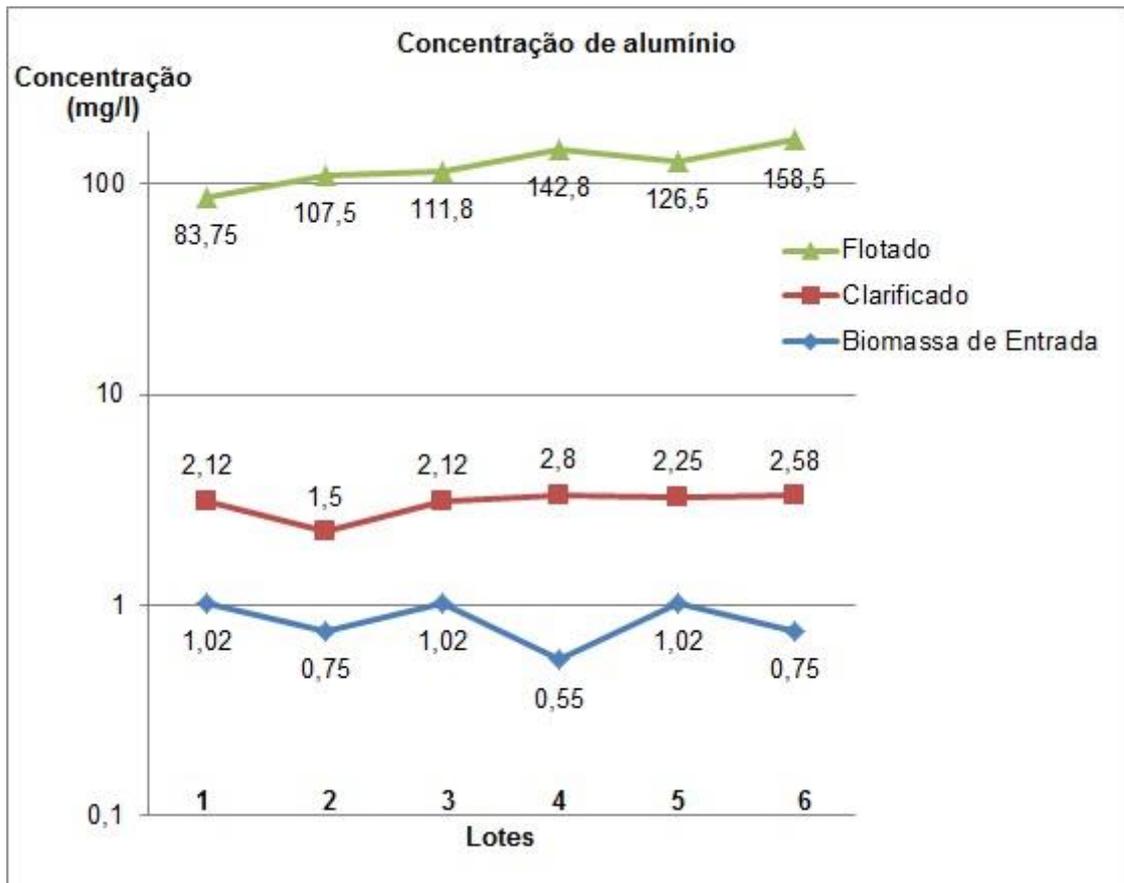
### 6.2.3 Análise de alumínio na biomassa de entrada, flotado e clarificado após a eletroflotação

A Tabela 7 apresenta os dados da concentração de alumínio liberado ao decorrer do processo de eletroflotação. As análises dizem respeito a todos os lotes estudados, no âmbito da biomassa de entrada, na solução clarificada e no flotado de microalgas.

Tabela 7: Concentração de alumínio nos lotes estudados

ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS		Alumínio ICP-OES (mg/l)
LOTE 1	Biomassa de Entrada	1,02
	Clarificado	2,12
	Flotado	83,75
LOTE 2	Biomassa de Entrada	0,75
	Clarificado	1,5
	Flotado	107,5
LOTE 3	Biomassa de Entrada	1,02
	Clarificado	2,12
	Flotado	111,8
LOTE 4	Biomassa de Entrada	0,55
	Clarificado	2,8
	Flotado	142,8
LOTE 5	Biomassa de Entrada	1,02
	Clarificado	2,25
	Flotado	126,5
LOTE 6	Biomassa de Entrada	0,75
	Clarificado	2,58
	Flotado	158,5

As reações de eletrólise no eletrodo de alumínio provocam sua oxidação. Há liberação de diferentes espécies químicas do metal no meio onde o processo está ocorrendo. Foram realizadas análises espectrométricas utilizando ICP-OES conforme o Manual de Instruções VISTA-PRO, Varian 2000. A quantificação foi realizada nos seis lotes no âmbito da biomassa de entrada, no clarificado e no flotado de microalgas obtidas por eletroflotação, conforme mostrado na Figura 18.



**Figura 18: Análise de alumínio no flotado, clarificado e biomassa de entrada de microalgas em escala logarítmica.**

É observado, na Figura 18, que há concentrações de alumínio em todos os lotes analisados, para a biomassa de entrada, desde a primeira medição. Esse fato explica-se, pois para o sistema Devon's Grill a eletroflotação já vinha sendo utilizada para separar a biomassa de microalgas, anteriormente ao estudo proposto neste trabalho. Contudo os valores são menores do que os encontrados no clarificado, pois quando há recirculação ocorre a diluição das concentrações de alumínio, visto que a cuba eletrolítica tem capacidade para 60 litros, já o fotobioreator placas planas para 500 litros.

Tomando como base o flotado e o clarificado, observa-se que no primeiro as concentrações de alumínio são superiores. Isso se deve ao fato de que no pH no qual o sistema de eletroflotação está operando há formação do agente coagulante hidróxido de alumínio. Esse composto é responsável pela aglutinação das células de microalgas. Esta informação é evidenciada por Cerqueira (2011).

“Dependendo do pH do meio e da concentração de alumínio, outras espécies iônicas monoméricas de alumínio -  $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})^{3+}$ ,  $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ ,  $\text{Al}(\text{OH})^{4+}$  - ou poliméricas -  $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$ ,  $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$ ,  $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$ ,  $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$ ,  $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$  - podem ser formadas. Estes complexos, responsáveis por adsorverem os contaminantes, originando coágulos maiores (flocos), quando presentes em solução aquosa conferem uma característica gelatinosa ao meio. Entretanto, com o aumento do pH, sofrem hidrólise e formam principalmente  $\text{Al}(\text{OH})^{4+}$ , que é solúvel. Assim, o pH ideal para formação do agente de floculação,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , está entre 6,5 e 7,0.”(CERQUEIRA, 2011).

Segundo AZARIAN *et al* (2007) *appud* SILVA (2013) a utilização de eletrodos de alumínio permite uma maior eficiência de remoção de microalgas de águas residuária em um espaço de tempo reduzido comparado a eletrodos de ferro. No Item 6, do presente trabalho, há uma relação entre o custo de placas de alguns metais. Considerando o balanço energético, a eficiência de separação e a disponibilidade de material, o alumínio foi escolhido como material para compor os eletrodos.

Quanto a utilização da biomassa de microalgas para a produção de óleo, o alumínio atua como contaminante do material, por esse motivo recomenda-se uma etapa de pré tratamento. Segundo Freitas *et al*, (2005), íons férricos atuam como importantes degradadores de óleo vegetal, conforme descrito no Item 4.10 deste trabalho. Essa afirmação é uma das justificativas para utilização de eletrodos em alumínio ao invés de ferro para a separação de microalgas.

Neste sentido a importância do que é proposto por este trabalho para estudos que atentem a utilização de outros eletrodos para o processo de separação de microalgas. Ou, caso a concentração de alumínio comece a interferir no crescimento dos microrganismos, pode-se partir para precipitação química, antes da recirculação.

## 7. CONCLUSÃO

O objetivo de inserção do sistema piloto de eletroflotação ao conjunto: tratamento do odor da fumaça da chaminé, cultivo e produção de biomassa de microalgas no sistema Devon's Grill foi alcançado. As análises realizadas, quanto a eficiência de remoção de microalgas, comprovam o que é proposto nos objetivos deste trabalho. A média dos resultados para avaliação da eficiência do equipamento desenvolvido foi satisfatória. A remoção em termos de absorbância alcançou valores médios de 74,5 % e em termos de sólidos suspensos de 84,73%.

O equipamento foi projetado, desenvolvido e construído com materiais de baixo custo. Manteve resultados excelentes para separação de dez metros cúbicos de microalgas cultivadas e propiciou biomassa concentrada que foi encaminhada para demais entidades e setores de estudo.

As condições de operação do eletroflotador são condizentes aos dados encontrados na literatura. A eficiência de remoção e seus resultados médios alcançaram ou superaram os encontrados nos trabalhos utilizados como base para o estudo. No que diz respeito ao parâmetro pH, manteve condições favoráveis para a formação de agentes coagulantes, o que comprova que o sistema de eletroflotação efetua a separação de materiais em suspensão de forma física – pela geração de microbolhas – e por meio de reações químicas – formação de hidróxido de alumínio.

O equipamento foi projeto para que uma fração residual de microalgas permanecesse no clarificado. As microalgas não separadas representam a concentração mínima de células necessárias para efetuar o início de um novo cultivo nos fotobioreatores, economizando tempo no preparo de inóculos em laboratório.

Este trabalho foi realizado *in situ*, operando em condições de trabalho reais. O equipamento desenvolvido, com materiais de baixo custo, operou de forma eficaz diante das variáveis oriundas do local onde os fotobioreatores estão instalados.

O incentivo a pesquisas relacionadas no âmbito deste trabalho, bem como a parceria com outros ramos do conhecimento como engenharias, eletrônica, desenvolvimento de sensores e eletroquímica podem alcançar as condições ótimas de funcionamento do sistema.

## 8. REFERÊNCIAS

ALLOWAY, B.J. **Heavy metal in soils**. John Wiley & Sons, Inc. p. 51, First ed. 1990. New Jersey, USA.

ATKINS, Peter; JONES, Loretta. **Princípios de química**: Questionando a vida moderna e o meio ambiente. Tradução: Ricardo Bicca de Alencastro. 3<sup>o</sup> Edição. Porto Alegre. Editora Bokman, 2006. p. 965.

ATKINS, Peter. PAULA, Julio de. **Físico-Química**. Tradução: Edilson Clemente da Silva *et al.* 8<sup>o</sup> Edição. Rio de Janeiro. Editora LTC. 2010.

BALL, David Warren. **Físico-Química**. Volume 1; Tradução Ana Maron Vichi. São Paulo. 2011.

BJERK, Thiago Rodrigues; SCHNEIDER, Rosana de Cassia de Souza. **CULTIVO DE MICROALGAS EM FOTOBIOREATOR E REATOR MISTO VISANDO A BIORREMEDIÇÃO E PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Tecnologia Ambiental – Mestrado. Área de Concentração em Gestão e Tecnologia Ambiental, Universidade de Santa Cruz do Sul – UNISC, Santa Cruz do Sul, 2012.

BRETT, Ana Maria Oliveira; BRETT, Christopher M.A. **Eletroquímica**: Princípios, métodos e aplicações. Coimbra – Portugal. Editora Almedina. 1996.

CASTELLAN, Gilbert Willian. **Físico-Química** - volume 1 - editora S.A - 1979.

CERQUEIRA, Alexandre Andrade; MARQUES, Monica Regina da Costa; RUSSO, Carlos. **Avaliação do processo eletrolítico em corrente alternada no tratamento de água de produção**. Química Nova vol.34 no.1 - São Paulo. 2011.

CHEN, Chun-Yen; YEH, Kuei-Ling; AISYAH, Rifka; LEE, Duu-Jong; Chang, Jo-Shu. **Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review**. Bioresource Technology 102, p. 71–81, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852410011648>>.

CHIU, Sheng-Yi; KAO, Chien-Ya; CHEN, Chiun-Hsun; KUAN, Tang-Ching; ONG, Seow-Chin; LIN, Chih-Sheng. **Reduction of CO<sub>2</sub> by a high-density culture of *Chlorella sp.* in a semicontinuous photobioreactor.** *Bioresource technology*, v. 99, n. 9, p. 3389-96, doi:10.1016/j.biortech.2007.08.013, 2008.

CRESPILHO, Frank Nelson; REZENDE, Maria Olimpia Oliveira. **Eletroflotação: Princípios e Aplicações.** Editora Rima. 2004-São Paulo.

FREITAS, Lindeberg Rocha; SANTOS, Eduardo Francisco dos; SOUZA, Severino Araújo de; ALVES, Suerda Bezerra; LOPES, Julice Dutra; CASTRO, Ana Maria Vieira de; PAULO, Marçal de Queiroz. **Influência dos recipientes de fritura na qualidade dos óleos vegetais.** Departamento de Química / Universidade Federal da Paraíba /UFPB. Departamento de Ciência e Tecnologia de Alimentos.UFPB; Centro Federal de Educação Tecnológica de Pernambuco / CEFET-PE; Escola Agrotécnica Federal de Vitória de Santo Antão / EAFVSA - PE), 2005.

GAO, Shanshan; DU, Maoan; TIAN, Jiayu; YANG, Jianyu; YANG, Jixian; MA ,Fang; NAN, Jun.. **Effects of chloride ions on electro-coagulation-flotation process with aluminum electrodes for algae removal.** *Journal of hazardous materials*, v. 182, n. 1-3, p. 827-34, doi:10.1016/j.jhazmat.2010.06.114, 2010.

GENTIL, Vicente. **Corrosão:** Rio de Janeiro. LTC Editora, 2003. p.341.

GOMES, Emiliano Almeida. **Tratamento combinado da água produzida de petróleo por eletroflotação e processo fenton.** 2009. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade Tiradentes, Aracaju. 2009.

GRIFFITHS, Melinda J.; DICKS, Reay G.; RICHARDSON, Christine; HARRISON, Susan T. **Advantages and Challenges of Microalgae as a Source of Oil for Biodiesel: Feedstocks and Processing Technologies,** Dr. Margarita Stoytcheva (Ed.), ISBN: 978-953-307-713-0, InTech, 2011.

Disponível em: <[www.intechopen.com/books/biodiesel-feedstocks-and-processing-technologies/advantages-andchallenges-of-microalgae-as-a-source-of-oil-for-biodiesel](http://www.intechopen.com/books/biodiesel-feedstocks-and-processing-technologies/advantages-andchallenges-of-microalgae-as-a-source-of-oil-for-biodiesel)>

HARIF, Tali. KHAI, Moti. ADIN, Avner. **Electrocoagulation versus chemical coagulation: Coagulation/flocculation mechanisms and resulting floc characteristics.** *Water Research* (2012) p.1 a 12. Article in press. Disponível em: <[www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135412002084](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135412002084)>

KNIE, Joachim Leonard Walter; LOPES, Ester Warken Bahia. **Testes ecotoxicológicos: Métodos, técnicas e aplicações.** Florianópolis: FATMA / GTZ, 2004.

MAIA, Vitor Lemos. **Controle da corrente de uma carga eletrolítica.** 85 f. 2010. Monografia (Departamento de Engenharia Elétrica) Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2010.

MIRANDA-PINTO, Clotilde Otília Barbosa de; SOUZA, Edward de. **Manual de trabalhos práticos de físico-química.** Belo Horizonte. Editora UFMG. 2006.

NOLTE, Joachin. **ICP Emission Spectrometry: a practical guide.** Germany, Wiley-VCH, 2003. 266f.

NOUE, Joel de La; PAUW, Niels de. **The potencial of microalgas biotechnology: A review of production and uses of microalgae.** Biotech. Adv. Vol. 6. Pg. 725-770, 1998.

NUNES, Daniel Guedes. **Estudo da Distribuição de Tamanho de Bolhas do Processo de Flotação por Ar Dissolvido Visando a Recuperação de Finos da Indústria Mineral.** 2007. Disponível em: <[http://www.cetem.gov.br/publicacao/serie\\_anais\\_XV\\_jic\\_2007/Daniel\\_Guedes.pdf](http://www.cetem.gov.br/publicacao/serie_anais_XV_jic_2007/Daniel_Guedes.pdf)>

POELMAN, E.; PAUW, N.D.; JEURISSEN, B. **Potential of electrolytic flocculation for recovery of micro-algae.** *Conservation And Recycling*, v. 19, p. 1-10, 1996.

ROCHA, Jorge M.S; GARCIA, Juan E.C; HENRIQUES, Marta H.F. **Growth aspect of the marine microalga *Nannochloropsis gaditana*.** *Biomolecular Engineering*, v. 20, n. 4-6, p. 237-242, doi:10.1016/S1389-0344(03)00061-3, 2003.

RODRIGUES, Marina de Castro; BRITO, Rodolfo Siqueira de; SINOTI, André Luiz Lopes; SOUZA, Marco Antonio Almeida. **Tratamento eletrolítico de efluentes de reatores anaeróbios.** 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2001. Disponível em <[www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/brasil/ii-087.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/brasil/ii-087.pdf)>. 48

RUBIO, Jorge; TESSELE, Fabiana. Processos para o tratamento de efluentes na mineração. In: **Tratamento de minérios.** 3ª edição CETEM, Centro de Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro. 2002. Disponível em <[www.ufrgs.br/ltn/attachments/175\\_Cap16.pdf](http://www.ufrgs.br/ltn/attachments/175_Cap16.pdf)>.

SACHS, Ignacy. Bioenergias: Uma janela de oportunidades. In: ABRAMOVAY, Ricardo. (Org). **Biocombustíveis**: A energia controversa. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2009. p.181.

SARDELLA, A. **Curso Completo de Química** - Volume único - Editora Ática - São Paulo - 1998.

SILVA, Anna Patrícia Florentino de Souza. **Eletroflotação não-convencional aplicada à separação e ruptura celular de microalgas**: um avanço na viabilidade da geração de biodiesel. 2013. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, na área de concentração em Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2013

SILVA, Paulo César França Da. **Tratamento de resíduos líquidos industriais pelo processo eletrolítico**: Uma alternativa para o gerenciamento dos resíduos líquidos gerados nas indústrias mecânicas fabricantes de equipamentos para produção de petróleo. 2005. 96 f. Dissertação (Mestrado profissional em Sistemas de Gestão) – Universidade Federal Fluminense, Niterói. 2005.

SOBRINHO, Pedro Alem; GOMES, Alberto C. **Utilização de Eletroflotação para separação e adensamento de algas de efluentes de lagoas aceleradas de estabilização de esgotos e para o tratamento de esgotos domésticos**. In: XI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, 1981, Fortaleza/CE. Anais do XI Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, 1981.

SOUZA, Wesley Gabrieli de; CRUZ, Letícia Silveira; KELLER, Regina de Pinho; CASSINI, Sérgio Túlio Alves; GONÇALVES, Ricardo Franci. **Processo eletrolítico aplicado ao polimento de efluente de lagoas de estabilização**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2005. Disponível em: <[www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes23/II-154.pdf](http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/abes23/II-154.pdf)>

SUPREME LUBRIFICANTES. Artigo técnico. **Análise de Óleo**,. Pág 9. Disponível:<[www.supremelub.com.br/downloads/tecnicas/analise\\_de\\_oleo.pdf](http://www.supremelub.com.br/downloads/tecnicas/analise_de_oleo.pdf)> Acessado em 17/05/2013.

TICIANELLI, Edson Antonio; GONZALEZ, Ernesto Rafael. **Eletroquímica: Princípios e Aplicações**. 2º Edição. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005. p. 220.

TORTORA, Gerard; FUNK, Berdell. R; CASE, Chritine. L. **Microbiologia**. 8ª edição. Porto Alegre: Editora Artmed, 2005. p.894.

WIENDL, Guilherme Wolfagang. **Processos eletrolíticos no tratamento de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro. Editora ABES. 1998. p. 376.

WU, Zechen; ZHU, Yi; HUANG, Weiya; ZHANG, Chengwu; LI, Tao; ZHANG, Yuanming; LI, Aifen. **Evaluation of flocculation induced by pH increase for harvesting microalgae and reuse of flocculated medium**. Bioresource Technoly: Volume 110, Pg. 496–502, 2012. Disponível em: <[www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412001253](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412001253)>.