

# Produção de biodiesel de microalgas existentes em reservatórios de usinas hidrelétricas com aproveitamento da biomassa residual como fonte de energia

Sérgio Peres, Adalberto N. Freire Jr., Carlos Almeida, Antonio Travassos Junior e Fabio J. Miccerino

**Resumo** – Este artigo mostra os resultados parciais obtidos com a utilização de microalgas existentes num reservatório de UHE para produção de biodiesel e aproveitamento energético da biomassa residual. Este projeto está sendo desenvolvido no reservatório da UHE Luiz Eduardo Magalhães (UHE Lajeado), localizada em Tocantins e no reservatório da barragem de Carpina-PE (com condições similares ao do reservatório da UHE Lajeado). As microalgas coletadas em Lajeado estão sendo identificadas, isoladas e cultivadas em laboratório. As de Carpina foram secas em estufa, tendo o seu óleo extraído e utilizado para produção de biodiesel. O PCS e o PCI do biodiesel produzido foram de 36,93 MJ/kg e 36,85 MJ/kg respectivamente. Os da biomassa residual foram de 19,16 MJ/kg e 18,97 MJ/kg. Os resultados energéticos foram bastante promissores e, mostraram que a utilização de microalgas de reservatórios eutrofizados para produção de biocombustíveis é uma boa opção para revitalização e recuperação ambiental dos reservatórios de UHE's.

**Palavras-chave** – biomassa residual, biodiesel, eutrofização, microalgas, poder calorífico.

## I. INTRODUÇÃO

Este trabalho visa determinar o potencial de utilização das microalgas existentes em reservatórios, parcial ou totalmente eutrofizados, de usinas hidrelétricas (UHE) para produção de biocombustíveis, notadamente o biodiesel e a biomassa residual. Portanto, este artigo descreve o processo de coletas de amostras de água do reservatório; identificação, isolamento e cultivo das microalgas; a extração de óleo das mi-

croalgas; a produção, composição química e o poder calorífico do biodiesel; e, os resultados da análise imediata e do poder calorífico da biomassa residual. Outras rotas tecnológicas com potencial utilização direta destas microalgas, como o processo de digestão anaeróbia, estão sendo investigadas. Uma preocupação nesta pesquisa foi o desenvolver de um projeto capaz de reduzir os danos ambientais antropogênicos, como a eutrofização de reservatórios, e tentar minimizar estes impactos, com uma solução nobre. Assim sendo, esta pesquisa utiliza microalgas de um reservatório eutrofizado para produção de biocombustíveis. Desta forma, à medida que estiverem sendo retiradas as microalgas do reservatório para a produção de biocombustível, o reservatório estará sendo revitalizado, ou seja, deseutrofizado. Portanto, a aplicabilidade deste projeto é imediata e em todos os reservatórios de UHE's que apresentam este problema de eutrofização (parcial ou total), como é o caso do reservatório da UHE Lajeado que está parcialmente eutrofizado. Para o desenvolvimento deste projeto foram coletadas amostras de água densamente povoadas com microalgas no reservatório da UHE Lajeado-TO e da barragem de Carpina-PE. As amostras foram analisadas e as microalgas foram identificadas. Àquelas com potencial de produção de óleo foram isoladas e estão sendo cultivadas. Por similaridade de condições de eutrofização do reservatório e principalmente, por questões de logística, foram utilizadas microalgas coletadas na barragem de Carpina-PE, para o desenvolvimento do projeto. Os resultados gerados foram bastante promissores, com a produção de biodiesel com um PCI de 36,93 MJ/kg e tendo a biomassa residual um PCI de 18,97 MJ/kg.

O código ANEEL para esta pesquisa é 2331-0001/2009. Estão sendo apresentados os resultados parciais, pois, a pesquisa se encontra em execução. A pesquisa está sendo patrocinada pelas empresas Energest S.A., Pantanal Energética Ltda., e Bandeirante Energia S.A., pertencentes ao Grupo EDP Energias do Brasil. A execução deste projeto está a cargo da Associação Politécnica de Consultoria (POLICONSULT) e Universidade de Pernambuco (UPE). A pesquisa está sendo desenvolvida no Laboratório de Combustíveis e Energia (POLICOM), da Escola Politécnica de Pernambuco, da Universidade de Pernambuco.

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011.

Agradecemos às empresas, a Energest, Pantanal Energética e Bandeirante Energia do grupo EDP – Energias do Brasil que através do projeto GAP-PD-2331-0001/2009 patrocinam esta pesquisa na sua totalidade.

S. Peres é professor do Departamento de Engenharia Mecânica e coordenador do POLICOM – Laboratório de Combustível e Energia da Universidade de Pernambuco- UPE (emails: sergperes@gmail.com e serperes@poli.br).

C. Almeida, A. Freire Jr e A. Travassos Jr. são pesquisadores do POLICOM-UPE (e-mails: carlostexal@yahoo.com, adalbertofreire2@gmail.com, travassos2008@gmail.com ).

## II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Nesta seção estão descritos a metodologia aplicada para o desenvolvimento da pesquisa, uma breve revisão bibliográfica descrevendo o processo de coleta de microalgas, extração do óleo e produção de biodiesel de microalgas. Também estão mostrados os resultados da caracterização do biodiesel e da biomassa residual, bem como estão descritos os benefícios ao meio ambiente e os ganhos energéticos oriundos da utilização desta metodologia e, as dificuldades encontradas no desenvolvimento do projeto.

### A. Metodologia

Inicialmente, foi discutido entre os pesquisadores e gerência do projeto qual deveria ser o local para ser desenvolvida a pesquisa. De comum acordo ficou decidido que o projeto poderia ser executado no reservatório da UHE de Lajeado, do Grupo EDP, pois, o mesmo oferecia boas condições para o desenvolvimento do projeto. Enquanto eram especificados, adquiridos e instalados os equipamentos necessários ao projeto, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre a utilização das microalgas para produção de biodiesel e a tecnologia envolvida. Assim, foram estudadas as espécies de microalgas potenciais produtoras de óleo, a forma de extração do óleo, a produção do biodiesel e também a tecnologia a ser utilizada para o aproveitamento energético dos resíduos.

Em seguida, foi efetuada uma visita técnica à UHE de Lajeado, onde foram colhidas amostras de água com maior densidade algal em diversos pontos do reservatório. Estas amostras foram analisadas em laboratório, tendo como resultado a identificação das espécies de microalgas potenciais produtoras de óleo. O sistema de classificação usado foi o de que está sendo utilizado é o Reviers [1] e a identificação infra-genérica seguiu as recomendações da literatura especializada: Ochrophyta [2]-[5], Cyanophyta (cianobactérias) [6] e [7]; e, Chlorophyta [8]. A quantificação das microalgas está sendo realizada em lâminas de contagem seguindo o método escrito por [9]. Após o isolamento das cepas, os indivíduos foram colocados em erlenmeyers de 250 mL, contendo meio ASM-1 estéril com pH 8,0 [10]. Desta forma, as espécies estão sendo isoladas e cultivadas para aumento da densidade algal para possibilitar a extração de óleo. De modo a resolver os problemas de logística para obtenção de biomassa algal, foi pesquisado um reservatório em Pernambuco em condições similares ao da UHE Lajeado. Assim sendo, foi selecionado o reservatório da barragem de Carpina, distante a 60 km do Recife. Foram coletadas amostras de água neste reservatório com alta densidade algal  $92.097,500$  células  $\text{mL}^{-1}$ , o que permitiu que fossem desenvolvidas técnicas de extração de óleo. Após a extração do óleo, o biodiesel foi produzido através do processo de transesterificação pela rota metílica e, caracterizado química e energeticamente, utilizando a cromatografia gasosa e análise calorimétrica. A cromatografia gasosa é uma técnica analítica usada para determinação da composição dos ésteres de ácidos graxos presentes no biodiesel. A calorimetria determina os poderes caloríficos superior e inferior. Para a análise da biomassa residual foram utilizadas as análises imediatas e calorimétricas.

O excesso de microalgas em reservatórios provocado pela eutrofização antropogênica, é extremamente danoso ao

meio-ambiente, diminuindo a sua biodiversidade e possibilitando o risco de desenvolver espécies potencialmente tóxicas. Logo, a retirada destas microalgas para servir como matéria-prima para produção de biocombustíveis, ajudaria no processo de despoluição e revitalização do reservatório. Portanto, esta pesquisa que utiliza as microalgas existentes em reservatórios eutrofizados para a produção de biodiesel e, da sua biomassa residual para fins energéticos, tem um caráter bastante inovador e ambientalmente correto.

### B. Dificuldades no Desenvolvimento da Pesquisa

As maiores dificuldades encontradas foram relacionadas às aquisições dos equipamentos importados e ao desenvolvimento lento das microalgas, quando em cultivo em laboratório. Em relação aos equipamentos importados, foram selecionados fabricantes de equipamentos para identificação de microalgas (microscópio e câmara digital), caracterização de biodiesel e da biomassa residual. Houve demora no processo burocrático referente à obtenção das proformas invoices e licenças de importação. Como era a primeira vez que a POLICONSULT estava importando equipamento, a burocracia foi maior, tendo que fazer cadastramento na Receita Federal para obtenção de senha para utilização do SISCOMEX, e contratar uma empresa importadora. Os equipamentos foram cadastrados no SISCOMEX e as Licenças de Importação (LI) puderam ser solicitadas e obtidas. Após a chegada dos equipamentos e do desembarço alfandegário, ainda teve que fazer o agendamento de instalação e treinamento com os representantes dos equipamentos no Brasil. Mas, o maior problema para o desenvolvimento da pesquisa se refere à obtenção de biomassa unialgal em grande quantidade, que é obtida somente após a identificação, isolamento e cultivo das microalgas. Pois o processo é bastante complexo e demorado, como é mostrado na descrição a seguir. Numa gota de água existem numerosas espécies de microalgas que podem ser identificadas com o auxílio de um microscópio. Com uma pipeta Pasteur, retira-se uma amostra da lâmina. Esta amostra é diluída e volta a ser examinada no microscópio para ser(em) localizada(s) a(s) espécie(s) de microalgas que se quer isolar. Normalmente, ainda há contaminação do meio com outras espécies de microalgas. Portanto, este procedimento precisa ser repetido até que possa(m) ser isolada(s) a(s) microalga(s) de interesse e deve ser executado em câmara de fluxo laminar para evitar contaminação com bactérias e fungos do ambiente. Então, a espécie de microalga isolada é colocada em um meio de cultura específico num tubo de ensaio para se desenvolver. Passado alguns dias, é necessária a coleta de amostra no tubo de ensaio e seu exame no microscópio para confirmar que não há contaminação com outra espécie de microalga. Caso o meio esteja contaminado, o processo de isolamento tem que ser repetido. O meio de cultura deve ser o adequado, senão existe o risco de morte da população e a necessidade de se repetir todo o processo de isolamento, o que torna o isolamento muito lento. Além disso, o desenvolvimento das microalgas para se conseguir uma quantidade de biomassa suficiente para se extrair óleo é bastante demorado. Por esta razão, ainda não foi possível obter biomassa dos cultivos unialgais das amostras de água coletadas no reservatório da UHE Lajeado, suficiente para extrair óleo, produzir e caracterizar o biodiesel. Portanto, a solução encontrada foi utilizar a den-

sa biomassa algal encontrada no reservatório eutrofizado da barragem de Carpina, que apresenta composição florística semelhante à da UHE Lajeado. Desta forma, pode ser obtida biomassa algal suficiente para o desenvolvimento de tecnologias de extração do óleo, produção e caracterização do biodiesel, com aproveitamento da biomassa residual para fins energéticos. Outro gargalo na área tecnológica é a secagem das microalgas e o processo de extração do óleo.

### C. Equipamentos utilizados

Estão sendo utilizados equipamentos específicos para desenvolvimento da área biológica, de biocombustíveis e energética. Estes equipamentos são:

- Área biológica:

- Microscópio biológico McOliver – mod. 801
- Câmera digital FI1-U2
- Sistema de fotodocumentação
- Estufa de secagem
- Incubadora para germinação com fotoperíodo
- Medidor multiparâmetro para água

- Área tecnológica

- Aparelho de Soxhlet
- Rotoevaporador
- Calorímetro digital IKA C-2000
- Balança termogravimétrica DTG-TGA 60 Shimadzu
- Balança analítica Shimadzu
- Moinho de faca
- Liquidificador
- Cromatógrafo a gás GC-Master com FID

### D. Revisão Bibliográfica

As microalgas vêm sendo bastante estudadas como matéria-prima para produção de biodiesel [11]-[13]. Porém, os estudos incluem não somente a produção de biodiesel como também a fixação do CO<sub>2</sub> proveniente de usinas térmicas e produção de metano em biodigestores [13]-[15].

Apesar de serem bastante pesquisadas, atualmente, como fonte potencial para produção de energia, as culturas de microalgas já vêm sendo investigadas como fonte de combustíveis renováveis a décadas, com os primeiros registros em projetos na Universidade de Berkeley-EUA em 1950 [16]-[17]. O interesse no Brasil é no grande potencial de reprodução e de produção de óleo das microalgas. As referências [11] e [17] reportam que certas espécies de microalgas podem ser usadas para produção de biodiesel (diatomáceas e as clorófitas), e cujos rendimentos em óleo são pelo menos quinze vezes maior do que a palma, que é a oleaginosa de maior produtividade no Brasil. A produção de azeite de dendê (palma) é de 5.950 L/ha, com microalgas os valores potenciais são 136.900 e 58.700 L/ha, para microalgas com teores de 70% e 30% de óleo em massa seca [12]. A grande vantagem de utilização das microalgas é que elas têm um crescimento extremamente rápido, e muitas delas são ricas em óleo. Os teores de óleo em algumas microalgas chegam a 77% da sua massa seca, como é o caso da *Tetraselmis sueica*, mas, níveis de óleo entre 20 e 50% são bastante comuns [18]. Existem várias técnicas de cultivo de microalgas para produção de biodiesel, como em fazendas, lagoas, e a produção é geralmente mais cara que a produção de oleaginosas, podendo chegar a R\$ 3,18/kg de microalgas [18]. As

microalgas requerem luz, dióxido de carbono, água e sais inorgânicos. Existem elementos essenciais para o desenvolvimento das microalgas que são o nitrogênio, fósforo, ferro e sílica [12],[17].

A grande maioria destes nutrientes necessários ao desenvolvimento das microalgas já estão presentes nos reservatórios, e a elevada disponibilidade desses elementos pode levar ao problema de eutrofização dos reservatórios. Esta pesquisa foca o uso de reservatórios eutrofizados (ou a parte eutrofizada dos reservatórios), onde há um excesso de nutrientes que possibilita o crescimento excessivo das microalgas causando uma deficiência de oxigênio livre no meio, quando o processo respiratório é mais significativo do que a fotossíntese. A referência [17] retrata a utilização de solventes como o metanol, clorofórmio, hexano, benzeno e acetona para a extração química do óleo das microalgas, mas, sem descrever o rendimento obtido na extração. Não foi encontrado na literatura artigo(s) retratando a utilização de microalgas existentes em reservatórios de hidrelétricas para produção de biodiesel (ou outros biocombustíveis). Portanto, este projeto é pioneiro nesta aplicação.

## III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os procedimentos e resultados da parte biológica (coleta, isolamento e cultivo) e da parte tecnológica (extração de óleo, produção de biodiesel e as análises do biodiesel e biomassa residual) são mostrados em sub-seções específicas.

### A. Procedimentos, resultados e discussão da área biológica

Com a escolha do reservatório da UHE Lajeado para o desenvolvimento desta pesquisa, foi realizada uma visita técnica para inspeção das condições do reservatório e coleta de amostras de água em diversos pontos para realização de análise laboratorial.

#### A.1 Coleta das amostras

As amostras de biomassa algal foram coletadas em três pontos georeferenciados (tabela 1) do reservatório UHE Lajeado (figura 1).

Estas amostras foram colhidas com uma rede de plâncton da com malha de 20 µm (figura 2). Foram coletadas 18 amostras, sendo nove fixadas em campo com solução de lugol acético e a outra metade foi mantida viva em meio de cultivo.

Tabela 1 – Localização dos pontos de coleta de amostra

Local das coletas	Localização	
	Latitude	Longitude
Ponto a - Eutrofizado - saída de efluente	10°10'41" N	48°24'52" S
Ponto b - Meio do lago	10°10'41" N	48°24'52" S
Ponto c - Saída do rio Taquaruçu	10°17'17" N	48°20'15" S



Figura 1. Lagoa de Palmas (reservatório da UHE Lajeado)



Figura 2. Rede de plâncton.

Foram observados diferentes níveis tróficos no lago, conforme ilustrado pela coloração das amostras coletadas (figura 3).

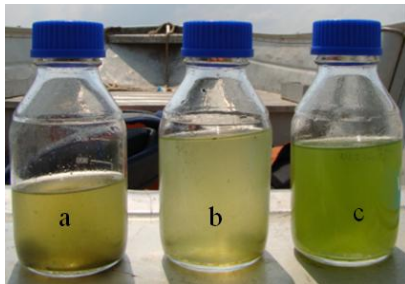


Figura 3 – Amostras de água da UHE Lajeado com diferentes níveis tróficos.

As letras a, b e c da figura 3 se referem ao ponto de coleta no lago. Observa-se então que a amostra “c”, coletada na saída do rio Taquaruçu (ponto c) foi a que apresentou a maior densidade algal, o que representa um maior nível de eutrofização, observado também na amostra “a” (ponto a), pela presença de *Eichornia crassipes* (água-pé) (figura 4).



Figura 4. Eutrofização no Ponto a – Presença abundante de macrófitas (*Eichornia crassipes*.)

#### A.2 Identificação, isolamento e cultivo de microalgas

No laboratório, os táxons estão sendo identificados através de lâminas semi-permanentes e fotodocumentados com

câmara digital acoplada ao sistema óptico do microscópio biológico McOliver – mod. 801, adquiridos neste projeto.

O material destinado ao cultivo está sendo mantido em bancadas com iluminação artificial e fotoperíodo de 12x12h. Até o momento, foram identificados 20 táxons pertencentes às Ochrophyta - “diatomáceas” (09), Chlorophyta (07), Dinophyta (01), Euglenophyta (01) e Cyanophyta - “cianobactérias” (02), (Tabela 01). Notou-se uma predominância de *Coelastrum* sp. (Chlorococcales).

A Tabela 1 lista algumas das espécies de microalgas identificadas nas amostras de água coletadas no reservatório da UHE de Lajeado.

Tabela II. Levantamento preliminar do fitoplâncton no lago de Palmas.

Táxon	Tipos
Cyanophyta (cianobactérias)	<i>Oscillatoria</i> sp. <i>Spirulina</i> sp.
Ochrophyta (diatomáceas)	<i>Aulacoseira</i> sp.1 <i>Aulacoseira</i> sp.2 <i>Eumotia</i> sp. <i>Nitzschia</i> sp. <i>Pinnularia</i> sp.1 <i>Pinnularia</i> sp.2 <i>Rhizozolenia</i> sp. <i>Surirella</i> sp. <i>Synedra</i> sp.
Chlorophyta	<i>Coelastrum</i> sp. <i>Cosmarium</i> sp. <i>Crucigenia</i> sp. <i>Oocystis</i> sp. <i>Mougeotia</i> sp. <i>Staurastrum subanchora</i> cf. <i>Staurastrum</i> sp.1
Euglenophyta	<i>Euglena</i> sp.
Dinophyta	<i>Peridinium</i> sp.

Os representantes da ordem Chlorococcales, a qual pertence o gênero identificado: *Coelastrum e*, são potenciais produtores de biodiesel [13]-[17].

As diatomáceas apresentam produção de óleo similar ao de peixe e o vegetal e podem ser consideradas como potenciais substitutos do combustível fóssil. O conteúdo lipídico das diatomáceas pode alcançar entre 70-80% de seu peso seco [9]. Outras diatomáceas como *Chaetoceros cryptica* e *Navicula saprophila* já foram geneticamente modificados para otimizar a produção de biodiesel [18].

A figura 5 ilustra algumas das espécies de microalgas encontradas no reservatório da UHE Lajeado.

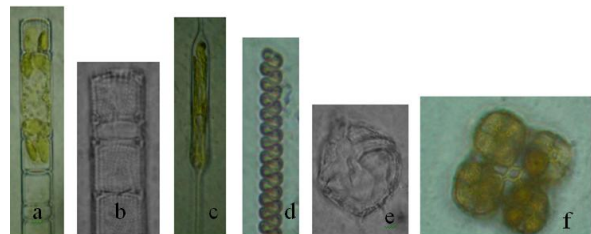


Figura 5 . Espécies de microalgas do Reservatório da UHE Lajeado : (a) e (b) *Aulacoseira* sp., ; (c) *Rhizozolenia* sp., (d) *Spirulina* sp. ; (e) *Peridinium* sp., ; (f) *Coelastrum* sp.

Após a identificação das espécies de microalgas de interesse, estas foram isoladas e estão sendo cultivadas em meio próprio para o seu desenvolvimento, que é um dos focos desta pesquisa. Estão sendo cultivadas algas dos gêneros

*Geitlerinema*, *Planktothrix*, *Cylindrospermopsis*, *Oedogonium*, *Kirchneriella*, *Actinastrum* e *Pediastrum*.

A figura 7 mostra as etapas de cultivo das microalgas isoladas com uma (a), quatro (b), oito (c) e vinte semanas (d).

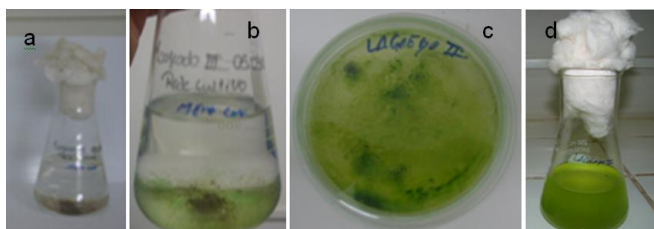


Figura 6. Etapas de desenvolvimento de cultivo de microalgas.

Devido ao fato do crescimento das microalgas isoladas ser lento e não produzir em pouco tempo uma quantidade de biomassa algal suficiente para extração de óleo e produção de biodiesel, optou-se em obter a biomassa algal do reservatório da barragem de Carpina. Esta barragem dista 60 km de Recife e por seu lago estar eutrofizado, há floração de microalgas (figura 7).



Figura 7. Floração de microalgas no reservatório de Carpina – PE

As amostras com alta densidade algal foram coletadas com a rede de plâncton, colocadas em garrafões de 20 litros, e transportadas ao POLICOM, onde são mantidas aeradas para evitar a mortandade das microalgas que estão sendo utilizadas nos testes de extração e produção de biodiesel (figura 8).



Figura 8. Processo de aeração dos garrafões contendo microalgas

## B. Procedimentos, resultados e discussão da área tecnológica

Esta seção descreve os procedimentos, ilustra e discute os resultados obtidos na área tecnológica que são: processo de secagem das microalgas, extração química do óleo das microalgas, produção e caracterização do biodiesel, determinação do poder calorífico superior e inferior do biodiesel e da biomassa residual

### B.1 Pré-tratamento e secagem das microalgas

Para otimizar o processo de extração de óleo, as microalgas passam por um pré-tratamento que consiste nas etapas de homogeneização e secagem. Portanto, é retirada uma amostra de aproximadamente 200 mL dos garrafões aerados, que é colocada num liquidificador caseiro por 3 minutos, para triturar as microalgas e obter uma amostra mais uniforme (figura 9)



Figura 9. Processo de homogeneização da amostra de microalgas

Após serem trituradas, as microalgas são colocadas em placas de Petri, e levadas à estufa com uma temperatura de 105 °C por 2 horas para secagem (figura 10).



Figura 10. Processo de secagem das microalgas em estufa

Quando as microalgas estiverem secas, é efetuada a raspagem das placas de Petri, com uma espátula, e, a pesagem da biomassa seca numa balança analítica.

### B.2 Extração do óleo das microalgas

Após a pesagem, estas microalgas são colocadas embrulhadas em papel de filtro e colocadas num aparelho de Soxhlet para extração de óleo (figura 11)



Figura 11. Processo de extração de óleo com o aparelho de Soxhlet

Com a biomassa algal preparada e condicionada no aparelho de Soxhlet, foi pesquisado o solvente com a maior eficiência na extração de óleo, ou seja, aquele capaz de extrair

mais óleo das microalgas. Assim sendo, foram realizadas extrações utilizando os seguintes solventes: hexano, éter etílico, tolueno, metanol, clorofórmio/metanol, metanol acidificado. Para a realização das extrações foram adicionados 200 mL de cada solvente em cada experimento, mantendo-se a manta aquecedora a 100°C.

Após concluída a extração, a solução a mistura óleo-solvente foi aquecida num béquer onde numa capela foi evaporado todo o solvente. O rendimento da extração foi obtido pela razão massa de óleo extraída pela massa seca de microalgas. Os resultados da extração com os diversos solventes está ilustrada na figura 12.

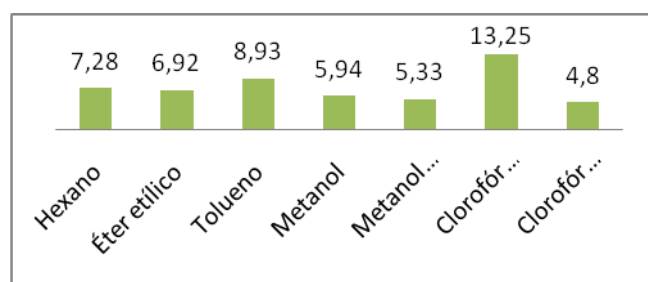


Figura 12. Rendimento (%) da extração de óleo das microalgas

Pela figura 13, observa-se que o melhor rendimento da extração, de 13,25%, obtido com uma mistura clorofórmio/metanol. Com o hexano, que é o solvente mais utilizado para extrações de óleo para biodiesel, o rendimento da extração foi de 7,28%. A referência [17] reporta extrações utilizando éter de petróleo, hexano, clorofórmio, acetona e metanol, mas, não menciona os rendimentos obtidos com os mesmos. A referência [18] reporta valores de rendimento de extração variando de 3,76 a 14,68% usando hexano e entre 3,39 a 32,89% utilizando etanol. Esta não uniformidade de resultados foi ocasionada pelo método de secagem aplicado, pelo tipo das microalgas utilizadas e do tempo de extração, que variou de 6 a 24 h.

### B.3. Produção de biodiesel de microalgas

Após a obtenção do óleo das microalgas, foi procedida a produção do biodiesel, utilizando a transesterificação pela rota metílica. O processo de transesterificação é utilizado para reduzir a alta viscosidade de óleos vegetais, e assim permitir o seu uso em motores diesel sem problemas operacionais [19]. A transesterificação é uma reação química entre um triglicerídeo (óleo vegetal ou gordura animal) e um álcool na presença de um catalisador, resultando num biodiesel e glicerina. O álcool mais utilizado é o metanol [20].

### B.4. Caracterização do biodiesel de microalgas

Foram realizadas as seguintes análises com o biodiesel de microalgas: análise cromatográfica, análise calorimétrica. Os resultados destas análises são mostrados a seguir.

#### B.4.1. Análise cromatográfica

Foi realizada uma análise cromatográfica do biodiesel de microalgas utilizando um cromatógrafo GC-Master dotado de FID, pertencente ao Laboratório de Cromatografia Industrial do Departamento de Engenharia Química do Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco (LCI-DEQ-CTG-UFPE). O cromatograma e a

composição química do biodiesel resultantes desta análise estão ilustrados na figura 13 e tabela III, respectivamente.

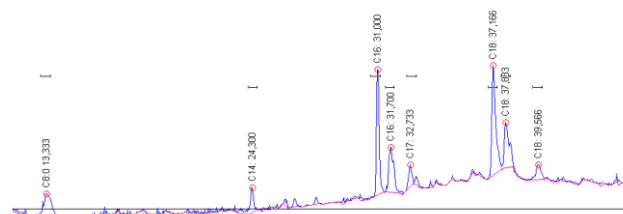


Figura 13. Cromatograma do biodiesel de microalgas

Tabela III. Composição química do biodiesel de microalgas

Ésteres do Ácidos Graxos	% Área
<b>C8:0</b>	12,53
<b>C14:0</b>	4,72
<b>C16:0</b>	20,27
<b>C16:1</b>	13,88
<b>C17:0</b>	4,16
<b>C18:0</b>	26,01
<b>C18:1</b>	13,73
<b>C18:2</b>	4,70
<b>% de Saturados</b>	67,69
<b>% de insaturados</b>	32,31

Pela Tabela III, observa-se que o biodiesel de microalgas apresenta 32,31 % de insaturados, diferente das oleaginosas que, na sua maioria, apresentam alto percentual de insaturados. O percentual de insaturação no biodiesel de soja, o mais utilizado no país atualmente, é de 84,41 % [21]. Segundo a referência [19] quando o grau de insaturação do biodiesel é menor implica num maior número de cetano (NC). O NC é um dos mais comuns indicadores da qualidade do óleo diesel. Ele mede a habilidade do combustível entrar em auto-combustão quando injetado no motor.

#### B.4.2. Análise calorimétrica

Foi realizada uma análise calorimétrica do biodiesel de microalgas utilizando-se um calorímetro IKA C-2000 (figura 14).



Figura 14. Calorímetro IKA C-2000 do POLICOM

O biodiesel de microalgas apresentou um PCS de 36,93 MJ/kg e um PCI de 36,85 MJ/kg. Estes valores são cerca de 20% menores que os valores obtidos do óleo diesel S-50 tipo A cujo PCS é de 45,99 MJ/kg e o PCI de 45,50 MJ/kg.

Outras análises de caracterização do biodiesel de microalgas serão realizadas no desenvolvimento da pesquisa. Dentre estas análises pode-se citar: o ponto de fulgor, teste de

corrosividade ao cobre, índice de iodo, teor de metanol (ou etanol), índice de iodo, índice de acidez.

### B.5 Biomassa residual

A biomassa residual é a massa das microalgas secas que sobrou quando foi retirado o óleo para a produção de biodiesel. Logo, a biomassa residual é dependente da habilidade do solvente em extrair o óleo no processo de extração. Quanto mais eficiente for o solvente na extração do óleo, menor será a biomassa residual, que logicamente, depende da quantidade de óleo contida na massa algal original. De qualquer maneira, com maior ou menor quantidade de massa residual, um dos focos desta pesquisa é verificar o potencial de aproveitamento energético da biomassa residual.

Portanto, de modo após a extração do óleo das microalgas, foram realizadas as análises imediata e calorimétrica da biomassa residual.

#### B.5.1 Análise imediata

A análise imediata é realizada utilizando uma balança termogravimétrica. Neste caso foi utilizada a balança termogravimétrica da Shimadzu DTG-60. Em termos práticos, este equipamento é um forno que é equipado com uma balança onde é colocada a amostra que se quer analisar. Ao aquecer o forno numa atmosfera inerte, a amostra vai perder primeiramente a umidade, depois, começa a se degradar termicamente com o aumento de temperatura. Ao estabilizar a balança, ou seja, quando a matéria volátil escapar, só restará então, o carbono fixo e as cinzas da amostra original. Nesta temperatura, a atmosfera do forno é mudada para uma atmosfera reativa, que pode ser ar sintético ou oxigênio, e o carbono presente vai entrar em combustão, restando então somente a cinza resultante da combustão da amostra. Portanto, esta análise fornece os seguintes dados: % de umidade, % de matéria volátil, % de carbono fixo e o % de cinzas. Esta perda de massa fica registrada num gráfico chamado termograma, de onde podem ser obtidos os dados da análise. A figura 15 mostra o termograma da biomassa residual de microalgas e a tabela IV apresenta o resultado da análise imediata.

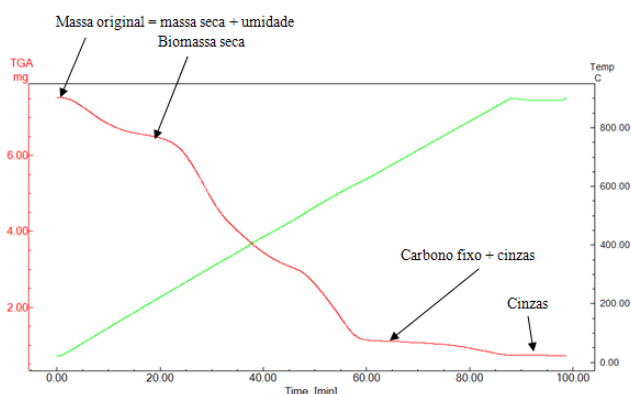


Figura 15. Termograma da biomassa residual de microalgas

Os resultados da análise imediata da biomassa residual são apresentados na tabela IV.

Tabela IV. Resultados da análise imediata das biomassa residual.

Grandeza	Percentual base seca (%)
Umidade	2,3%
Massa volátil	79,4%

Carbono fixo	10,7%
Cinzas	7,7%

#### B.5.2 Análise calorimétrica

Para a análise calorimétrica foi utilizado o calorímetro IKA C-2000 do POLICOM. Esta análise produziu os seguintes resultados:

PCS = 19,16 MJ/kg e PCI= 18,97 MJ/kg.

Estes resultados são bastante promissores.

#### B.6 Análise energética: biodiesel x biomassa residual

Nesta seção, foi descrita uma comparação do teor de energia que pode ser fornecida pelas microalgas através do biodiesel e da sua massa residual. Algumas premissas foram adotadas, baseadas nos resultados desta pesquisa que está sendo desenvolvida com microalgas. Para esta análise, admitiu-se um teor de óleo extraído de 13,25% da massa original, que foi o valor máximo obtido na extração. Então, a biomassa residual foi de (100-13,25)% da massa original, ou seja, a biomassa residual representa 86,75% da massa original. Consideremos então que a análise será realizada para 1 kg de biomassa algal. Desta biomassa, 0,1325 kg será de óleo que virará biodiesel, e 0,8675 kg será de biomassa residual. Nesta comparação foram utilizados os valores dos PCIs obtidos nesta pesquisa para o biodiesel e biomassa residual. Logo, em termos energéticos, o biodiesel (BD) fornecerá:

$$E_{BD} = 0,1325 \text{ kg} \times 36,85 \text{ MJ/kg} = 4,883 \text{ MJ.}$$

E, a biomassa residual fornecerá:

$$E_{BR} = 0,8675 \text{ kg} \times 18,97 \text{ MJ/kg} = 16,456 \text{ MJ}$$

Portanto, a biomassa residual tem o potencial de fornecer 3,37 vezes mais energia que o biodiesel.

Uma das metas desta pesquisa é fornecer alternativas para utilização da biomassa residual. Como o PCI da biomassa residual é maior do que o da lenha nativa [22], o uso da biomassa adensada, em forma de pellets e briquetes, poderá substituir à lenha nativa nas suas aplicações, preservando desta forma a floresta nativa, e o desmate irregular de florestas.

#### B.6 Rotas tecnológicas a serem pesquisadas

Como o objetivo deste trabalho é a utilização das microalgas para produção de biodiesel e a utilização energética da biomassa residual, outras rotas tecnológicas estão sendo investigadas. Uma delas é a utilização da biomassa residual para produção de biogás através de digestão anaeróbia. A referência [23] se refere ao uso da digestão anaeróbia como um passo necessário para tornar o processo de produção de biodiesel de microalgas sustentável. As experiências com biodigestão de microalgas foram iniciadas, mas, a utilização somente dela como substrato não produziu resultados satisfatórios ainda, pois, não houve produção de biogás. Uma rota que vai ser estudada é a da co-biodigestão, onde as microalgas serão utilizadas juntamente com outro substrato, e um inóculo como lodo de esgoto ou esterco bovino para dar partida no reator. Acredita-se que a co-digestão será uma boa solução para utilização das microalgas residuais em processos fermentativos.

Uma segunda rota tecnológica que está sendo testada é a gaseificação da biomassa residual. Testes preliminares reali-

zados a 800°C, no gaseificador/pirolisador de bancada do POLICOM, produziram gases de síntese com a seguinte composição química: H<sub>2</sub> (19,88%), CO (60,47%), CH<sub>4</sub> (7,55%), C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (0,07%) e CO<sub>2</sub> (6,68%). Estes resultados foram bastante promissores, e esta poderá ser uma das rotas a ser investigadas para utilização da biomassa residual das microalgas para produção de biocombustíveis gasosos.

#### IV. CONCLUSÕES

O desenvolvimento desta pesquisa está produzindo resultados bem promissores. Primeiramente, a parte biológica está identificando as microalgas presentes no reservatório da UHE Lajeado com potencial de produção de biodiesel. Porém, os processos de isolamento e cultivo de microalgas para biodiesel por serem demasiadamente demorados, não torna atraente o isolamento e cultivo para produção de biodiesel a curto prazos. Mas, pode ser uma opção tecnológica para médio e longo prazos. Um dos grandes gargalos tecnológicos para produção de biodiesel de microalgas é o processo de secagem e extração de óleo. Estas duas etapas são demoradas, consomem muito tempo e gastam muita energia para executá-las. Precisa ser desenvolvida uma tecnologia de extração de biodiesel mais rápida e eficiente, que está sendo estudada e desenvolvida neste projeto. Há um potencial de produção de biodiesel utilizando as microalgas, e a biomassa residual aparece como uma excelente opção de uso como matéria-prima para fins energéticos. Os estudos de avaliação energética entre o biodiesel produzido e a biomassa residual, mostraram que a biomassa residual, pode fornecer 3,37 vezes mais energia que o biodiesel, nos níveis atuais de extração de óleo. O PCS e o PCI elevado da biomassa residual, pode torná-la uma opção ambientalmente correta para substituição de lenha nativa, evitando a degradação de matas e florestas. Para isso, deverão ser desenvolvidos estudos para peletizar ou briquetar esta biomassa, para ganhar densidade energética. Outras rotas energéticas, como a gaseificação/pirólise e biodigestão da biomassa residual, parecem igualmente promissoras e devem ser melhor estudadas com a continuidade deste projeto de pesquisa. E, uma das mais promissoras conclusões obtidas até o momento, foi que a utilização das microalgas de lagos eutrofizados para produção de biodiesel e para outros fins energéticos, ajudará no processo de despoluição e revitalização do reservatório, sendo então este projeto energeticamente e ambientalmente corretos.

#### V. AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer especialmente aos bolsistas, estagiários, voluntários e professores que fazem parte da equipe do POLICOM, pois, eles são a alma do laboratório e sem a presença deles, não seria possível a realização destas pesquisas. Agradecemos também a Paulo Micerino, Maria Alcicle Vasconcelos e Jaime Nomura da EDP, por nos apoiarem no desenvolvimento deste projeto. Agradecemos também aos Professores Alexandre Schuler e Angelez Palha, do Departamento de Engenharia Química da UFPE, pelo incentivo e apoio à nossa equipe no desenvolvimento de pesquisas.

#### VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. D. Reviere., *Biologia e Filogenia das Algas*, Porto Alegre: Editora Artmed, 2006, 280 pp.
- [2] K. Krammer. e H. Lange-Bertalot, *Bacillariophyceae: Naviculaceae*. In H. Ettl, I. Gerloff, H. Heynig, e D. Mollenhauer (eds), *Susswasserflora von Mitteleuropa*. 2 (1). G. Fischer, Stuttgart, 1988, 576 pp.
- [3] K. Krammer, K. e H. Lange-Bertalot, *Bacillariophyceae: Bacillariaceae, Ephithemiaceae, Suriellaceae*. In Ettl, H., I. Gerloff, H. Heynig, e D. Mollenhauer (eds), *Susswasserflora von Mitteleuropa*. 2 (2). G. Fischer, Stuttgart, 1988, 595 pp.
- [4] K. Krammer e H. Lange-Bertalot, *Bacillariophyceae: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae*. In Ettl, H., I. Gerloff, H. Heynig, & D. Mollenhauer (eds), *Susswasserflora von Mitteleuropa*. 2 (3). G. Fischer, Stuttgart, 1991a., 575 pp.
- [5] K. Krammer e H. Lange-Bertalot., *Bacillariophyceae: Achnantheaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema*. In Ettl, H., I. Gerloff, H. Heynig, & D. Mollenhauer (eds), *Susswasserflora von Mitteleuropa*. 2 (4). G. Fischer, Stuttgart, 1991b, 473 pp.
- [6] J. Komarek, J., B. Praha, J. Fott, , *Das Phytoplankton de Subwassers (Systematik und Biologie)*, Alemanha: Stuttgart, 1983, 1041 p.,
- [7] C.L. Sant'anna, *Bibliotheca Phycologica (Chlorococcales - Chlorophyceae)* do Estado de São Paulo, Brasil. São Paulo: Editora J. Aramer, 1984, 348 p.
- [8] C.M. Palmer, T.E. Maloney, "A new counting slide for nannonplankton. American Society of Limnology and Oceanography" em *Special Publication* nº 21. 4 p. 1954.
- [9] G.W. Prescott, W.C. VINVARD, *A Synopsis of North American Desmids*. Estados Unidos: Universidade de Nebraska, 1982,700 p.
- [10] P.R. GORHAM, J.R. MCLACHLAV, V.T. HAMMER, E W.K. KIM, "Isolation and culture of toxic strains of *Anabaena flos-aquae* (Lyngh.)" *Bréd. Verh. Int. Verein. Theor. Angew. Limnol.*, 15: 796-804, 1964.
- [11] Y. Chisti, "Biodiesel from microalgae beats bioethanol", *Biotechnology Advances*, vol. 25, pp. 294-306, 2007.
- [12] S.A, Kham, Rashmi, M.Z. Hussain, S. Prasad and V.C. Banerjee, "Prospects of biodiesel production from microalgae in India", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, pp. 2361-2372, 2009.
- [13] G. Huang, F. Chen, D. Wei, X. Zhang and G. Chen, "Biodiesel production by microalgas biotechnology", *Applied Energy*, vol. 87, pp. 38-46, 2009.
- [14] H.E.B. Pérez, "Biodiesel de Microalgas. Parte 1", Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN, São Paulo-SP, Brasil. Disponível: <http://www.ipen.br>, 19p., 2010.
- [15] P.M. Pedroni, G. Lamenti, G. Prosperi, L. Ritorto, G. Scolla, F. Capuano, M. Valdiserri, "EniTecnologie R&D Project on Microalgae Biofixation of CO<sub>2</sub>: Outdoor Comparative Tests of Biomass Productivity using Flue Gas CO<sub>2</sub> from a NGCC Power Plant", in *Proc.2004 7th Intern. Conf. on Greenhouse Gas Control Tech.*, 5-9 Sept., Vancouver, Canada.
- [16] T.M. Mata, A.A. Marins, N.S. Caetano,"Microalgae for biodiesel production and other applications: a review", *Renewable an Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 217-232, 2010.
- [17] J. Sheeham, T. Dunahay, J. Benemann and P Roessler, "A look back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program – biodiesel from algae", Report NREL/TP-580-24190, 1998.
- [18] R.M. Carvalho Jr., "Desenvolvimento e análise energética do processo. De obtenção do biodiesel de microalga por. Metanólise in situ", Tese de Mestrado em Engenharia, UFPR, 2010
- [19] G. Knothe, J.V. Gerpen, J. Krahl, L.P. Ramos, *Manual de Biodiesel*, São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 2006, p. 340.
- [20] Y.C. Sharma, B. Singh and S.N. Upahyay, "Development of biodiesel: current scenario", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, doi:10.102/j.rser.2008.08.009.
- [21] S. Peres, T.A.M. Campos, A. Schuer, C. Almeida, "Análises cromatográficas e calorimétricas de sete biodieses de origem vegetal e do sebo de boi", nos Anais 2009 III Cong. Bras. Tecn. Biodiesel, pp. 109-110.
- [22] S. Peres, M.A.P. Palha. A. Schuler and V.P.P Amorim, "The sustainable abattoir – the use of abattoirs residues to produc biodiesel, biogas, biomass and biofertilizer", in *Proc.2010 Third Int.Symp. Energy Biomass and Waste, C6 Biodiesel Production*, Veneza, Italia. Disponível: <http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/downloads/kraxner/.../data/data/.../203.pdf>



- [23] B. Sialve, N. Bernet and O. Bernard, "Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable", *Biotechnology Advances*, vol. 27, pp. 409-416, 2009.