

TAYNAN DE OLIVEIRA COSTA

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE BIOMASSAS ALGAIS OBTIDAS EM LAGOAS
DE ALTA TAXA PARA A PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

C837p
2016

Costa, Taynan de Oliveira, 1989-

Potencial energético de biomassas algais obtidas em lagoas de alta taxa para a produção de biocombustíveis sólidos / Taynan de Oliveira Costa. – Viçosa, MG, 2016.
xv, 50f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Maria Lúcia Calijuri.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Biocombustíveis.
3. Lagoa de estabilização. 4. Microalgas. 5. Efluentes.
6. Biomassa. 7. Briquetes (Combustível). I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. II. Título.

CDD 22. ed. 662.88

TAYNAN DE OLIVEIRA COSTA

POTENCIAL ENERGÉTICO DE BIOMASSAS ALGAIS OBTIDAS EM
LAGOAS DE ALTA TAXA PARA A PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS
SÓLIDOS

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil, para
obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 17 de fevereiro de 2016.


Alberto José Delgado dos Reis


Maria do Carmo Calijuri


Angélica de Cássia de Oliveira Carneiro
(Coorientadora)


Maria Lúcia Calijuri
(Orientadora)

***A toda a minha família
E amigos.***

*“Era assim: o que quiser que tenha, tinha.
Tinha arrebol? Tinha. Rouxinol? Tinha.
Luar do sertão, palmeira imperial, girassol, tinha.
Também tinha temporal, barranco, às vezes lamaçal, o diabo
Depois bananeira, até cachoeira,
mutuca, boto, urubu, horizonte,
Pedra, pau, trigo, joio, cactus, raios, estrela cadente,
Incandescências. Enfim”*

Chico Buarque: Editora Civilização Brasileira, 9.a edição, volume 191, Rio de Janeiro, 1978

AGRADECIMENTOS

A Deus, cuja providência nunca falha;

Aos meus pais, pelo incentivo nessa jornada acadêmica;

Às professoras Drs. Maria Lúcia Calijuri e Angélica de Cássia de Oliveira Carneiro, pelo amor a profissão, que tornou mais leve o peso de cada desafio e por serem meus grandes exemplos de dedicação, determinação, força, disciplina e profissionalismo;

Aos professores Alberto Delgado dos Reis e Maria do Carmo Calijuri, pelas contribuições durante todas as fases da pesquisa e por sempre esbanjarem conhecimento e boa vontade sempre que solicitados;

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Civil, pela oportunidade concedida e pela formação acadêmica de qualidade;

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo;

Ao Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) de Viçosa – MG, pela parceria e apoio;

Aos professores Ann, Ana Augusta e Mudadu pelos ensinamentos desde a graduação;

Meus sinceros agradecimentos a todos os técnicos e funcionários do LESA: Agostinho, Capelão, Júlio, Priscila e Carlos, que sempre estiveram dispostos a colaborar com o experimento, pelas palavras de incentivo nos momentos de desespero, pela alegria no dia a dia e pelos momentos de descontração, que tornaram essa jornada muito mais agradável;

Ao “Seu Zé” pela construção e manutenção do experimento e pela paciência nos momentos de ansiedade;

Aos funcionários e amigos do LAPEM/LPM, em especial Law, Braw, Mateus e Miguel, pela ajuda com o experimento e as análises;

Aos colegas e amigos do SIGEO, em especial, Leticia, Jack e Luma pela parceria e amizade compartilhadas;

Aos estagiários que muito contribuíram com as análises laboratoriais: Rafinha, Artur, Wanderléria, Thainá e Heider;

Ao meu amigo Bê, por ter estado presente em todos os momentos nesses dois anos, pela motivação e apoio;

À Sabrina e Carol pelo apoio e amizade;

A todos os meus amigos e parentes que estiveram ao meu lado e não mediram esforços para me ajudar, em especial, Caio, Roberta, Bruna, Amaly e Beny;

Por fim, agradeço aos meus grandes parceiros, Maicão, Pretinha e Benezito que encheram de alegria os meus dias e a todos que de alguma forma contribuíram para a realização dessa pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE EQUAÇÕES.....	x
LISTA DE LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xi
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xv
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
1.1. Referências Bibliográficas.....	3
2. HIPÓTESE.....	5
3. OBJETIVOS.....	6
3.1. Objetivo geral.....	6
3.2. Objetivos Específicos.....	6
4. CAPÍTULO I: PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE DIFERENTES BIOMASSAS ALGAIS.....	7
4.1. Introdução.....	9
4.2. Materiais e Métodos.....	10
4.2.1. Local do experimento.....	10
4.2.2. Produção das biomassas algais.....	11
4.2.3. Determinação da produtividade das LATs.....	13
4.2.4. Preparação e caracterização das biomassas.....	14
4.2.5. Delineamento Experimental.....	16
4.3. Resultados e Discussão.....	16
4.3.1. Produtividade das LATs.....	16
4.3.2. Propriedades físicas e químicas das biomassas algais.....	17
4.3.3. Análise Termogravimétrica.....	24
4.4. Conclusões.....	26
4.2. Referências Bibliográficas.....	27
5. CAPÍTULO II: PRODUÇÃO DE BRIQUETES A PARTIR DE BIOMASSAS ALGAIS CULTIVADAS EM LAGOAS DE ALTA TAXA.....	33
5.1. Introdução.....	35
5.2. Materiais e Métodos.....	36
5.2.1. Local do experimento e Matéria-prima.....	36
5.2.2. Caracterização das biomassas.....	37
5.2.3. Produção dos briquetes.....	38
5.2.4. Propriedades dos briquetes.....	39
5.2.5. Delineamento Experimental.....	39

5.3. Resultados e Discussão.....	40
5.3.1. Características das biomassas.....	40
5.3.2. Propriedades dos briquetes.....	41
5.4. Conclusões	46
4.3. Referências Bibliográficas.....	47
6. CONCLUSÕES GERAIS.....	49
7. RECOMENDAÇÕES	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Produtividade máxima para os diferentes sistemas de produção das biomassas.....	16
Tabela 2. Composição química elementar das diferentes biomassas.....	18
Tabela 3. Composição química elementar da biomassa algal de efluente doméstico relatada por outros autores.....	20
Tabela 4. Macronutrientes, micronutrientes e metais pesados das biomassas L, P e I.....	20
Tabela 5. Propriedades físicas e químicas das diferentes biomassas algais.....	22
Tabela 6. Valores da perda de massa das biomassas algais em função da temperatura, em porcentagem.....	25
Tabela 7. Características das biomassas.....	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Dimensões das LATs utilizadas.....	12
Figura 2. Curvas termogravimétricas para as biomassas L, P e I. Atmosfera de nitrogênio, taxa de aquecimento de 10 °C/min.....	24
Figura 3. Delineamento experimental utilizado para a produção dos briquetes a partir das biomassas algais.....	38
Figura 4. Curvas para umidade de equilíbrio higroscópico (UEH) (%), densidade (g/cm), carga máxima de ruptura (kgf) e, materiais voláteis (%) em função do teor de biomassa algal presente nos briquetes.....	42
Figura 5. Curvas para materiais voláteis (%), carbono fixo (%), poder calorífico superior (kcal/kg) e densidade energética (kcal/m ³) em função do teor de biomassa algal presente nos briquetes.....	44

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. Poder Calorífico Inferior.....	14
Equação 2. Poder Calorífico Útil.....	14
Equação 3. Regressão Linear Simples.....	40
Equação 4. Regressão Linear Quadrática.....	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
B	Boro
BEN	Balanço Energético Nacional
C	Carbono
Ca	Cálcio
Cd	Cádmio
CNPE	Conselho Nacional de Política Energética
CO ₂	Dióxido de Carbônico
Cr	Cromo
Cu	Cobre
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
Fe	Ferro
H	Hidrogênio
HCN	Cianeto de hidrogênio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
K	Potássio
LAPEM	Laboratório de Painéis e Energia da Madeira
LAT	Lagoa de Alta Taxa
LESA	Laboratório de Engenharia Sanitária e Ambiental
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
N	Nitrogênio
N ₂ O	Óxido nitroso
Na	Sódio
ND	Não Detectável
Ni	Níquel
NO _x	Óxido de nitrogênio

O	Oxigênio
P	Fósforo
Pb	Chumbo
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PCU	Poder Calorífico Útil
pH	Potencial Hidrogeniônico
PSI	<i>Pound Force per square inch</i> (libra força por polegada quadrada)
PVC	<i>Polyvinil Chloride</i> (policloreto de vinil)
S	Enxofre
SO _x	Óxido de enxofre
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
TGA	Análise Termogravimétrica
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i> – reator anaeróbio de manta de lodo
UEH	Umidade de Equilíbrio Higroscópico
ω-3	Ômega-3
Zn	Zinco

RESUMO

COSTA, Taynan de Oliveira, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2016. **Potencial energético de biomassas algais obtidas em lagoas de alta taxa para a produção de biocombustíveis sólidos.** Orientadora: Maria Lúcia Calijuri. Coorientadora: Angélica de Cássia de Oliveira Carneiro.

O presente estudo teve como objetivo avaliar o potencial energético da biomassa algal produzida em lagoas de alta taxa para a produção de biocombustíveis sólidos. Assim, foram avaliadas diferentes biomassas algais para a produção de energia, todas cultivadas como subproduto do tratamento de efluentes em lagoas de alta taxa (LATs), a saber: i) Biomassa produzida em efluente doméstico e coletada diretamente da LAT (L) ii) Biomassa produzida em efluente doméstico em sistema misto lagoa-painéis e coletada dos painéis (P) e iii) biomassa proveniente do tratamento de efluente da indústria de beneficiamento de carnes e coletada diretamente da LAT (I). As três biomassas foram caracterizadas quanto a sua composição química elementar (CHNOS), matérias voláteis, carbono fixo, teor de cinzas, poder calorífico superior, inferior e útil, análise de macro, micronutrientes e metais pesados, densidade a granel, densidade energética e análise termogravimétrica. Posteriormente, foram produzidos briquetes a partir da mistura das biomassas algais com epicarpo do fruto de pinhão manso em diferentes proporções e foram determinadas e avaliadas as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos briquetes. Pode-se concluir que biomassa algal I mostrou-se como a melhor alternativa para geração de energia térmica, pois apresentou maior massa residual orgânica na análise termogravimétrica (TGA) e também devido ao seu maior teor de carbono e hidrogênio e ao seu alto poder calorífico e densidade energética. As biomassas L e P, em contrapartida, apresentaram características desfavoráveis à utilização energética principalmente devido ao baixo poder calorífico e alto teor de cinzas. A adição da biomassa algal na composição briquetes, em geral, diminuiu a higroscopicidade e o teor de carbono fixo, e por outro lado aumentou a densidade aparente, o teor de cinzas e a densidade energética. A produção de briquetes compostos por biomassa algal e epicarpo do fruto de pinhão manso em escala laboratorial mostrou-se tecnicamente viável devido principalmente a alta densidade energética obtida em todos os tratamentos. Dessa forma, a biomassa algal I, na proporção de 50%,

apresentou-se como a melhor matéria prima para produção de briquetes por promoverem o aumento do poder calorífico, teor de materiais voláteis, densidade aparente, densidade energética e por apresentar menores teores de cinzas comparados aos briquetes compostos pelas biomassas L e P.

ABSTRACT

COSTA, Taynan de Oliveira, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2016. **Energy potential of algal biomass obtained in high rate algal ponds for production of solid biofuels.** Adviser: Maria Lúcia Calijuri. Co- Adviser: Angélica de Cássia de Oliveira Carneiro.

The objective of this study is to assess the energy potential of algal biomass for solid biofuels production. Thus, were evaluated different algal biomass for energy production, all of them were cultured as a byproduct of the effluent treatment in the high rate algal ponds (HRAPs). They are: i) produced biomass in domestic wastewater and collected directly from HRAP (L) ii) Biomass produced in domestic wastewater on a mixed pond-panel system and collected from the panels (P) and iii) biomass from treatment of industrial effluent and collected directly from the HRAP (I). At first, the three biomass were characterized by chemical composition (CHNOS), volatile matter, fixed carbon, ash content, higher, lower and net calorific value, macro, micronutrients and heavy metals analysis, bulk density, energy density and TGA. From the analysis of the results it can be concluded that algal biomass I showed up as the best alternative to thermal power generation, as it presented higher organic residual mass in the thermogravimetric analysis (TGA) and also because of its higher carbon content, hydrogen, its high calorific value and energy density. The biomass L and P, however, it showed unfavorable characteristics to energy use mainly due to the low calorific value and high ash content. Subsequently, briquettes were produced from the mixture of algal biomasses with epicarp of *Jatropha* in different proportions, thus were determined, and evaluated the physical, chemical and mechanical properties of the briquettes. The results showed that the addition of the algal biomass in the briquettes, in general, decreased hygroscopicity and the fixed carbon content, and on the other hand increased bulk density, ash content and energy density. The production of briquettes made up of algal biomass and epicarp of the *jatropha* fruit on a laboratory scale proved that it is technically feasible mainly due to high energy density obtained in all treatments.

1. INTRODUÇÃO GERAL

Um dos grandes problemas ambientais do Brasil atualmente é o lançamento de efluentes poluidores nos corpos hídricos. Efluentes domésticos, agrícolas e industriais podem conter elevadas concentrações de nutrientes mesmo após o tratamento secundário (ARBIB et al., 2013) podendo produzir impactos negativos nos corpos receptores.

Aliado a isso, a inexistência de um sistema de esgotamento sanitário adequado tem sido preocupação crescente na maioria das cidades brasileiras. A atual carência de infraestrutura de saneamento tem feito parte do conjunto de fatores considerados empecilhos para o crescimento do país. Atualmente, o setor de água e esgoto consome 2,6% de toda energia elétrica do país (BEN, 2008), sendo que somente 28% das cidades brasileiras possuem algum tipo de tratamento (IBGE, 2011).

Nesse sentido, a possibilidade de se cultivar no esgoto a matéria prima para a produção de bioenergia torna-se uma alternativa altamente atrativa. Trata-se de uma via de mão dupla: produzir energia e tratar o efluente. Segundo Santiago (2013) várias são as possibilidades de se obter energia de água residuária, como o aproveitamento de biogás produzido em sistemas de tratamento anaeróbios ou obtido da digestão de lodo gerados em sistemas aeróbios, a transformação de óleos e graxas retirados em estações de tratamento em biodiesel e a produção de microalgas para a produção de biocombustíveis sólidos.

A produção de microalgas em lagoas de alta taxa (LATs) vem recebendo crescente atenção de pesquisadores em todo o mundo. As LATs, também conhecidas como *raceways*, são fotobiorreatores abertos desenvolvidos por William J. Oswald no final da década de 50 (PICOT et al., 1991) para o simultâneo cultivo de microalgas e tratamento de efluentes. Diversos estudos afirmam que as microalgas podem apresentar taxa de crescimento elevada quando cultivadas em efluentes (SONG et al., 2008; CHO et al., 2011; SANTIAGO et al., 2013). Simplificadamente, a remoção da matéria orgânica ocorre pela relação mutualística existente entre algas e bactérias. O oxigênio dissolvido requerido para a degradação aeróbica de matéria orgânica pelas bactérias heterotróficas é fornecido através do processo de fotossíntese realizado pelas algas; enquanto

que os nutrientes (nitrogênio e fósforo) e carbono necessários ao crescimento algal são fornecidos através da decomposição dos componentes do efluente pelas bactérias (GARCÍA et al., 2000).

No entanto, apesar dessa relação mutualística, o crescimento de microalgas nas LATs pode ser limitado pela baixa concentração de CO₂ dissolvido no efluente. Assim, uma vez que o CO₂ do ar atmosférico é assimilado pelas microalgas, pode-se introduzir um reator com membranas em conjunto com a LAT, onde as microalgas possam crescer aderidas a esse material suporte, em contato direto com o ar atmosférico, condição essa, que favorece a assimilação de CO₂.

Quanto às formas de aproveitamento da biomassa têm-se avaliado diversas rotas, desde biodiesel sintetizado a partir do conteúdo lipídico das microalgas, passando pelo biogás oriundo da digestão anaeróbia, até produtos originados de processos termoquímicos de conversão, como a gaseificação, a pirólise e a liquefação hidrotérmica. Até o momento diversas pesquisas mostram que a produção de biocombustíveis utilizando a biomassa algal é tecnicamente viável, porém, muitos desafios ainda devem ser alcançados com relação a sua viabilidade econômica. Assim, além de serem necessárias mais pesquisas sobre os biocombustíveis tradicionais outras alternativas devem ser avaliadas.

Neste contexto, este estudo objetivou obter o potencial de diferentes biomassas algais para produção de biocombustíveis sólidos. Sendo assim, para a apresentação dos resultados obtidos, esta dissertação foi estruturada em dois capítulos escritos na forma de artigo científico, conforme apresentado a seguir:

- **Capítulo I:** “Caracterização de diferentes biomassas algais para a geração de energia térmica”
- **Capítulo II:** “Produção e caracterização de briquetes a partir de biomassas algais para geração de energia”

1.1. Referências Bibliográficas

ARBIB, Z., RUIZ, J., ÁLVAREZ-DÍAZ, P., GARRIDO-PÉREZ, C., BARRAGAN, J., PERALES, J. A. Long term outdoor operation of a tubular airlift pilot photobioreactor and a high rate algal pond as tertiary treatment of urban wastewater. **Ecological Engineering**, v. 52, p. 143-153, 2013.

BEN, Balanço Energético Nacional. Empresa de Pesquisa Energética. 2008.

CHO, S., LUONG, T. T., LEE, D., OH, Y. K., LEE, T. Reuse of effluent water from a municipal wastewater treatment plant in microalgae cultivation for biofuel production. **Bioresource technology**, v. 102, n. 18, p. 8639-8645, 2011.

GARCIA, J., MUJERIEGO, R., HERNANDEZ-MARINE, M. High rate algal pond operating strategies for urban wastewater nitrogen removal. **Journal of Applied Phycology**, v. 12, n. 3-5, p. 331-339, 2000.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). 2007. Atlas de Saneamento. Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/atlas_saneamento/default_zip.shtm. Acesso em 19/12/2016.

PICOT, B., EL HALOUANI, H., CASELLAS, C., MOERSIDIK, S., BONTOUX, J. Nutrient removal by high rate pond system in a Mediterranean climate (France). **Water Science & Technology**, v. 23, n. 7-9, p. 1535-1541, 1991.

SANTIAGO, A. F., CALIJURI, M. L., ASSEMANY, P. P., CALIJURI, M. D. C., REIS, A. J. D. D. Algal biomass production and wastewater treatment in high rate algal ponds receiving disinfected effluent. **Environmental technology**, v. 34, n. 13-14, p. 1877-1885, 2013.

SANTIAGO, A. F. **Avaliação do desempenho de lagoas de alta taxa submetidas a diferentes níveis de radiação solar e a efluente sanitário pré-desinfetado**. 2013. 158f. Tese (doutorado). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2013.

SONG, D., FU, J., SHI, D. Exploitation of oil-bearing microalgae for biodiesel. **Chinese Journal of Biotechnology**, v. 24, n. 3, p. 341-348, 2008.

2. HIPÓTESE

A biomassa algal produzida em lagoa de alta taxa pode ser aproveitada energeticamente para produção de biocombustíveis sólidos.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

Avaliar o potencial de biomassas algais provenientes de lagoas de alta taxa para a produção de biocombustíveis sólidos.

3.2. Objetivos Específicos

- Obter a produtividade de diferentes sistemas de produção da biomassa algal;
- Determinar as propriedades físicas e químicas das biomassas algais provenientes de LATs;
- Avaliar a degradação térmica das biomassas algais por meio de análises termogravimétricas, estabelecendo suas relações com a produção de energia;
- Produzir briquetes a partir da mistura das biomassas algais com epicarpo do fruto de pinhão manso em diferentes proporções em escala laboratorial;
- Determinar e avaliar as propriedades físicas, químicas e mecânicas dos briquetes.

4. CAPITULO I: PRODUÇÃO E AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE DIFERENTES BIOMASSAS ALGAIS

Resumo

Foram avaliadas diferentes biomassas algais para a produção de energia, todas cultivadas como subproduto do tratamento de efluentes em lagoas de alta taxa (LATs), a saber: i) Biomassa produzida em efluente doméstico e coletada diretamente da LAT (L) ii) Biomassa produzida em efluente doméstico em sistema misto lagoa-painéis e coletada dos painéis (P) e iii) biomassa proveniente do tratamento de efluente da indústria de beneficiamento de carnes e coletada diretamente da LAT (I). As três biomassas foram caracterizadas por composição química elementar (CHNOS), matérias voláteis, carbono fixo e teor de cinzas, poder calorífico superior, inferior e útil, análise de macro, micronutrientes e metais pesados, densidade a granel, densidade energética e análise termogravimétrica. A biomassa I apresentou maior produtividade, na LAT, em termos de sólidos e clorofila-a, maior teor de carbono, hidrogênio, alto poder calorífico, densidade a granel e densidade energética. Além disso, esta biomassa apresentou maior massa residual orgânica na análise termogravimétrica (TGA), apresentando, portanto, características favoráveis à produção de energia através da combustão. Em contrapartida, as biomassas L e P, apresentaram características desfavoráveis à utilização energética principalmente devido ao baixo poder calorífico e alto teor de cinzas. As biomassas L e P não apresentaram diferenças significativas a 95% de probabilidade para a maioria dos parâmetros avaliados, evidenciando que a forma de produção, ao contrário do tipo de efluente, não influenciou sobre as características intrínsecas das biomassas. Logo, conclui-se que a biomassa algal I apresenta-se como a melhor alternativa para geração de energia térmica devido ao seu maior potencial energético em relação às demais.

Palavras chaves: biomassa algal; lagoas de alta taxa; caracterização energética; bioenergia.

Abstract

Different biomass algae were evaluated for energy production, all cultured as a byproduct of the effluent treatment in the high rate ponds (HRAPs), namely: i) biomass produced in domestic wastewater and collected directly HRAP (L) ii) Biomass produced in domestic wastewater on a mixed pond-panel system and collected from the panels (P) and iii) biomass from treatment of industrial effluent and collected directly from the HRAP (I). The three biomasses were characterized by elemental chemical composition (CHNOS), volatiles, fixed carbon, ash content, higher calorific value and lower useful macro analysis, heavy micronutrients and metal, bulk density, energy density and thermogravimetric analysis. Biomass I showed higher productivity in terms of solids and chlorophyll-a, higher carbon content, hydrogen, high calorific value, bulk density and energy density. Moreover, this biomass showed higher organic residual mass in thermogravimetric analysis (TGA), and, thus, favorable characteristics for the production of energy by combustion. In contrast, biomass L and P, presented unfavorable characteristics to energy use mainly due to the low calorific value and high ash content. The biomass L and P showed no significant differences at 95% probability for most parameters assessed, showing that the form of production, as opposed to the type of effluent did not impact on the intrinsic characteristics of the biomass. Therefore, it is concluded that the algal biomass I presents itself as the best alternative to thermal power generation due to their higher energy potential over others.

Key words: algae biomass; high rate algal ponds; energy characterization; bioenergy.

4.1. Introdução

Atualmente, a matriz energética mundial baseia-se fundamentalmente em combustíveis fósseis e esses são explorados de forma intensiva para suprir a demanda constante por desenvolvimento em todo o mundo. Entretanto, devido às pressões ambientais pelas emissões inerentes ao uso de combustíveis fósseis, ao fator econômico e principalmente, devido às preocupações em relação ao esgotamento dos combustíveis fósseis, há a necessidade de uma renovação dos paradigmas em relação ao uso dessas fontes de energia.

Dessa maneira, o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) do Brasil, elaborou um documento intitulado “Plano Nacional de Energia 2030”, onde é previsto que para a geração de eletricidade no Brasil, haverá crescimento da participação de fontes primárias renováveis, como a energia eólica e a biomassa.

Neste contexto, tem-se observado um crescente interesse por novas fontes de biomassa, principalmente as oleaginosas, onde se destacam atualmente a soja, o girassol, a canola, a mamona, o amendoim, a palma e o algodão. Outra fonte, ainda pouco difundida no Brasil, são as microalgas, que além de se apresentarem como alternativa para a geração de bioenergia podem ser cultivadas em águas residuárias, auxiliando no tratamento dos efluentes. Desta maneira, a produção de microalgas contempla um duplo propósito: depurar o efluente e produzir biomassa (OLGUÍN, 2012).

A biomassa de microalgas é atraente do ponto de vista energético e ambiental devido a vários fatores: maior taxa de crescimento em relação a outras espécies vegetais, podendo produzir 20 vezes mais óleo por hectare do que as culturas oleaginosas terrestres, como soja e canola, possibilidade de cultivo ao longo de todo o ano, habilidade de se desenvolverem nos mais diferentes climas, a capacidade de crescerem em áreas impróprias para a agricultura e o seu efeito positivo na qualidade do ar, fixando o CO₂ atmosférico (BENEMANN, 2008 CHISTI, 2007, SAVAGE e HESTEKIN, 2013,)

Cabe ressaltar que, atualmente, a produção de microalgas em todo mundo é dedicada a extração de produtos de alto valor agregado, como os carotenoides e ω -3 ácidos graxos, usados para a alimentação e ingredientes de rações animais (WIJFFELS e BARBOSA, 2010). Porém, quando a produção da biomassa

algal se dá em efluentes domésticos priva-se de tais usos, fazendo-se necessário buscar novas alternativas de aproveitamento, como a produção de energia.

A biomassa algal pode ser convertida em biocombustíveis por meio de várias rotas, como o biogás através da digestão anaeróbia, o biodiesel através da transesterificação de lipídeos, o bioetanol pela fermentação de carboidratos e o bio-óleo (ou óleo bio-crude) através da conversão a alta temperatura (SUKIAS e CRAGGS, 2011). Contudo, atualmente, nenhuma das rotas conhecidas produzem biocombustíveis competitivos perante aos tradicionais biocombustíveis, sendo, portanto, necessário reduzir de forma significativa os custos de produção para tornar os combustíveis de microalgas economicamente viáveis (CLARENS et al. 2010, WIJFFELS, 2008)

Logo, a geração de energia através da combustão direta pode ser uma alternativa de aproveitamento energético à biomassa algal proveniente de lagoas de alta taxa (LATs), visto que a relação custo-benefício dessa utilização pode ser alta, uma vez que os custos do processo de queima direta são baixos quando comparado à geração dos biocombustíveis tradicionais. Além disso, esta rota de aproveitamento pode ser realizada após a extração dos lipídeos para a conversão à biodiesel e da digestão anaeróbia para o biogás, sendo uma terceira via de aproveitamento da mesma biomassa. No entanto, atualmente, há pouca evidência da viabilidade da combustão da biomassa algal (BRENNAN e OWEND, 2009). Assim, mais pesquisas são necessárias, principalmente no que tange a caracterização física e química das mesmas.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar a produtividade de diferentes biomassas algais provenientes do tratamento de águas residuárias e caracterizá-las para a obtenção do seu potencial energético.

4.2. Materiais e Métodos

4.2.1. Local do experimento

O experimento foi desenvolvido no município de Viçosa, Estado de Minas Gerais, Brasil (20°45'14"S, 42°52'54"W), no Laboratório De Engenharia Sanitária e Ambiental (LESA) e no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM).

O município de Viçosa, com altitude média de 648 m em relação ao nível do mar, caracteriza-se por uma precipitação média anual de aproximadamente 1221 mm, e temperatura média anual que oscila entre 19 °C e 20 °C. A umidade relativa do ar é, em média, de 81%. O clima local, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwa, tropical de altitude com verões quentes e chuvosos e invernos frios e secos (ROCHA et al., 2012).

4.2.2. Produção das biomassas algais

Foram produzidas três diferentes biomassas, todas cultivadas como subproduto do tratamento de efluentes em lagoas de alta taxa, a saber: i) Biomassa produzida em efluente doméstico e coletada diretamente da LAT (L) ii) Biomassa produzida em efluente doméstico em sistema misto lagoa-painéis e coletada dos painéis (P) e iii) biomassa produzida em efluente da indústria de beneficiamento de carnes e coletada da LAT (I).

As lagoas de alta taxa em escala piloto utilizadas para a produção das biomassas possuem as seguintes características: largura = 1,28 m, comprimento = 2,86 m, profundidade total = 0,3 m, profundidade útil = 0,3 m, área superficial = 3,3 m² e volume útil = 1 m³ (Figura 1). Essas lagoas foram confeccionadas em fibra de vidro e os pedais em PVC, com duas lâminas. Durante seu funcionamento, os pedais foram movimentados por motor elétrico de 1cv. A rotação foi reduzida por redutor acoplado ao motor e controlada por inversor de frequência (marca WEG série CFW-08), que garantiu velocidade entre 0,10 e 0,15 m/s. Valores semelhantes foram utilizados em diferentes pesquisas com LAT (PICOT et al., 1991; PARK et al., 2011) e asseguraram o revolvimento necessário.

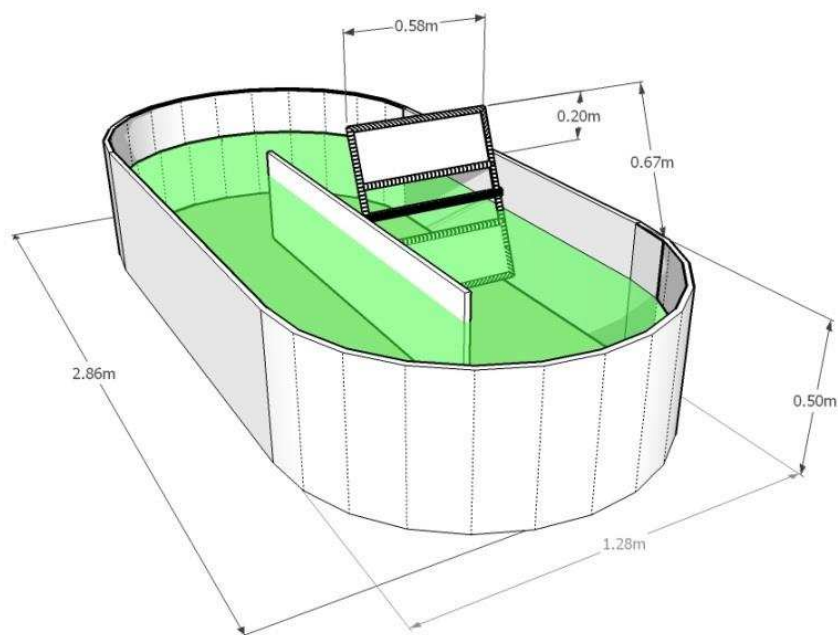


Figura 1. Dimensões das LATs utilizadas.

O pH foi controlado durante todo o período de operação, de modo a mantê-lo entre 7 e 8. Este controle foi feito com a adição de CO₂ sintético de um cilindro de gás com 99% de pureza por meio de coluna de carbonatação. A coluna foi construída em PVC, com 0,10 m de diâmetro e 2,20 m de altura. O fluxo de gás foi de 1 L/min, controlado por medidores de fluxo, com uma capacidade de 0 a 15 L/min. Uma bomba (Atman, AT304) foi usada para recircular o efluente através da coluna de carbonatação. A vazão de recirculação foi de 4 L/min.

O efluente utilizado para a produção das biomassas L e P, foi proveniente de reator UASB pré-fabricado em aço, vazão média = 115 m³/dia, volume = 48 m³ e altura = 5,7 m. O reator UASB recebeu esgoto sanitário proveniente de aproximadamente 1000 habitantes.

A biomassa L foi produzida e coletada diretamente das LATs que foram operadas em regime de fluxo contínuo com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 5 dias.

A biomassa P foi produzida em um sistema misto lagoa-painel. O reator de crescimento da biomassa foi constituído por painel plano vertical de 0,5 m², com material suporte para o crescimento algal, comumente chamado de entretela. O reator foi disposto verticalmente ao lado da LAT e diretamente em contato com o

ar atmosférico e radiação solar. A LAT foi operada em regime de fluxo contínuo, com TDH de 5 dias. O efluente da LAT foi bombeado a 0,017 m³/min e, por gotejamento percorria a área superficial do painel. Logo após, o efluente foi recolhido por uma calha e retornado à LAT por gravidade.

A biomassa I foi produzida na lagoa em regime de batelada, sendo que a operação teve duração de 10 dias. Foi utilizado efluente industrial proveniente de indústria que tem como atividade a produção de embutidos (salames do tipo mortadela, presuntos, apesuntados, linguiças diversas, salsichões, entre outros) e a produção de bacalhau dessalgado desfiado. O efluente de origem industrial foi gerado nas diversas etapas do processo produtivo, em especial nos descartes dos tanques de cozimento e resfriamento dos embutidos e descartes dos tanques de dessalga do bacalhau e também da lavagem dos pisos e equipamentos ao final dos processos produtivos. A ETE da empresa é composta das seguintes etapas: peneiramento em malha de 0,5 mm; etapa de flotação em flotador físico-químico (com adição de sulfato de alumínio e polímero) e reator de lodos ativados. Após a etapa de decantação o efluente tratado é descartado à rede de esgoto municipal. Os efluentes de origem sanitária são direcionados previamente ao sistema de fossa séptica e, na sequência, são bombeados à ETE para serem tratados juntamente com os efluentes industriais. Salienta-se que nesta pesquisa foi utilizado o efluente do flotador (efluente primário).

4.2.3. Determinação da produtividade das LATs

As variáveis sólidos suspensos totais (SST) (2540D) e sólidos suspensos voláteis (SSV) (2540E) seguiram as especificações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012). Entre parênteses, na frente de cada variável monitorada, encontra-se o número do procedimento adotado em cada análise.

A análise de clorofila-a foi realizada utilizando-se a técnica de extração com etanol 80% a quente como descrito em norma holandesa (NEDERLANDS Norm, 1981), com base em NUSH (1980).

Nos painéis, foram coletadas amostras compostas de seis posições da sua área superficial (amostra do lado direito, do lado esquerdo e do meio, frente e verso do painel), raspadas manualmente em intervalos de 48 horas, iniciando a

partir da primeira semana, que foi o tempo para a colonização. A quantificação da biomassa total através das análises de sólidos totais fixos e voláteis foi realizada de acordo com *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012), sendo que a área raspada de cada posição do painel foi de 0,25 x 0,25 m². Para a quantificação da biomassa algal através da clorofila-*a* foi raspada uma área de 0,1 x 0,1 m² de cada posição do painel e utilizada a equação de SCHWARZBOLD *et al.* (2013), adaptada de MARKER *et al.* (1980); e SARTORY e GROBBELLAR (1984).

4.2.4. Preparação e caracterização das biomassas

As biomassas algais L e I foram submetidas primeiramente à floculação química na LAT, depois foram centrifugadas, secas ao sol e posteriormente em estufa à temperatura de 60°C até atingir o teor de umidade médio de 12%. A biomassa P foi raspada manualmente dos painéis, depois submetida à secagem ao sol e posteriormente em estufa à temperatura de 60°C para atingir o teor de umidade médio de 12%.

Após secagem, as biomassas foram trituradas e classificadas em peneiras com abertura de 0,42 mm (40 mesh) e 0,25 mm (60 mesh) recolhendo-se a fração que ficou retida na peneira de 60 mesh para a determinação do poder calorífico superior, análise química imediata (materiais voláteis, carbono fixo e teor de cinzas) e análise termogravimétrica (TGA).

A composição química imediata (matérias voláteis, carbono fixo e teor de cinzas) foi determinada de acordo com a norma NBR 8112 (ABNT, 1986).

O poder calorífico superior foi obtido experimentalmente por meio do método da bomba calorimétrica adiabática, de acordo com a norma ASTM D 2015 (ASTM, 1982). Já os poderes caloríficos inferior e útil foram obtidos por meio das equações 1 e 2.

$$PCI = PCS - [600(9H/100)] \quad \text{(Equação 1)}$$

$$PCU = [PCI (1 - u)] - (600u) \quad \text{(Equação 2)}$$

Em que: H = teor de hidrogênio na biomassa (%); u = Umidade (%), PCI = Poder calorífico inferior (Kcal/kg) e PCU = Poder calorífico útil (Kcal/kg).

Para análise termogravimétrica (TGA) utilizou-se o aparelho DTG-60H, Shimadzu, em atmosfera de gás nitrogênio, a uma vazão constante de 50 mL/min empregando-se aproximadamente 2 mg de biomassa colocadas em cápsula de alumina aberta. As curvas termogravimétricas foram obtidas a partir de 100°C até temperatura máxima de 600°C, com taxa de aquecimento de 10°C/min. A curva termogravimétrica foi obtida para avaliar a perda de massa através da temperatura e a partir destas procederam-se os cálculos de perda de massa nos seguintes intervalos de temperatura: 100-200°C, 200-300°C, 300-400°C, 400-500°C e 500-600°C.

Para a determinação da densidade a granel, as biomassas foram acondicionadas em recipiente com as dimensões: 10 cm de largura x 10 cm de altura x 10 cm de comprimento. Por meio de uma balança analítica de precisão determinou-se a massa de partículas contida no volume do recipiente, sendo realizadas três repetições. A densidade a granel foi obtida dividindo-se a massa pelo volume da amostra. A densidade energética foi determinada por meio de cálculo, sendo produto do poder calorífico inferior com a densidade a granel (PINHEIRO et al., 2005).

Para as análises da composição química elementar (carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio) e dos teores de macro e micronutrientes e metais pesados, primeiramente as amostras foram secas e trituradas e depois classificadas em peneiras com abertura de 100 mesh. Os teores de carbono, hidrogênio e nitrogênio foram determinados via combustão seca, utilizando-se analisador elementar Perkin Elmer, PE-2400, série II. O método consiste em promover a combustão da amostra a 925°C e analisar os gases liberados por cromatografia gasosa. O teor de enxofre foi obtido por turbidimetria, com o auxílio de um espectrofotômetro, no comprimento de onda de 440 nm. O teor de oxigênio foi determinado pelo somatório das cinzas com C, H, N e S decrescido de 100.

Para determinação dos elementos totais, macro, micronutrientes e metais pesados das biomassas algais, de forma individual, foram submetidas à digestão nítrico-perclórica (4:1, v/v) determinando-se os elementos totais: P, quantificado por colorimetria; K, por fotometria de chama; Ca e Mg, por absorção atômica; S, por turbidimetria, N total determinado pelo método Kjeldahl; Mn, Cu, Fe e Zn, por absorção atômica; B, pelo método colorimétrico com o reagente azometina-H.

Excetuando o N total, as demais determinações foram realizadas conforme procedimentos da EMBRAPA (1997).

4.2.5. Delineamento Experimental

O experimento foi instalado segundo delineamento inteiramente casualizado com três biomassas, em três repetições, totalizando nove unidades amostrais. Os dados foram submetidos aos testes Cochran e Bartlett (homogeneidade de variâncias) e Lilliefors (normalidade). Depois, os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e, quando estabelecidas diferenças significativas, os tratamentos foram comparados entre si, por meio do teste de Tukey, a 95% de probabilidade.

4.3. Resultados e Discussão

4.3.1. Produtividade das LATs

Na Tabela 1 são apresentadas as produtividades das LATs dos diferentes sistemas em termos de clorofila-a e sólidos.

Tabela 1. Produtividade máxima para os diferentes sistemas de produção das biomassas.

Parâmetro	Biomassa Algal		
	Lagoa (L)	Painel (P)	Industrial (I)
Clorofila-a (g/m²d)	0,14 b	0,01 c	0,19 a
Sólidos totais* (g/m²d)	11,80 b	4,18 c	33,5 a
Sólidos voláteis* (g/m²d)	8,90 b	2,67 c	28,5 a

*Para as LATs que produziram as biomassas L e I foram realizadas análises de sólidos suspensos totais, enquanto que para a LAT P, foi realizada a análise de sólidos totais.

Observa-se que o efluente industrial mostrou-se como a melhor opção para a produção de biomassa, visto que a produtividade de sólidos e clorofila-a foi significativamente maiores em relação aos outros sistemas. Isso se deve à presença dos nutrientes essenciais ao crescimento das microalgas, nitrogênio e fósforo, existirem em altas concentrações nesse efluente. Os sólidos totais em

altas concentrações podem resultar no fenômeno de sombreamento, indesejável em sistemas de produção de microalgas, por reduzir a penetração de luz e, conseqüentemente, a taxa fotossintética. Porém, neste estudo, apesar da alta carga de sólidos presentes no efluente industrial observou-se maior produtividade em clorofila-a no mesmo.

Salienta-se que os efluentes do processamento de produtos animais, como os gerados em laticínios, curtumes e processamento de carnes podem conter gordura, sólidos orgânicos e inorgânicos, além de substâncias químicas que podem ser adicionadas durante as operações de processamento (VERHEIJEN, 1996). Logo, a utilização de resíduos do processamento de carne tem recebido atenção pelo fato de representarem um recurso passível de conversão a produtos diversos (JAYATHILAKAN et al., 2012).

Apesar da baixa produtividade dos painéis comparativamente aos outros sistemas, existe um enorme interesse no desenvolvimento de sistemas de biomassa com crescimento aderido, em função principalmente da facilidade de colheita da biomassa. É estimado que os custos de colheita e desidratação de biomassa algal para produção de biocombustível contribua com até 30% do custo total de produção, e que em uma LAT, os custos relativos a colheita é de cerca de 21% (MOLINA GRIMA et al., 2003; DAVIS et al., 2011). Além disso, outras vantagens são citadas para sistemas de tratamento aderido, como a elevada concentração de biomassa (menor umidade), menor sensibilidade aos efeitos de toxicidade, melhoria dos sistemas de tratamento de esgoto existentes e rápida formação de biomassa (JOHNSON e WEN, 2010; OZKAN et al., 2012; GROSS et al., 2013; ZAMALLOA et al., 2013; SCHNURR et al., 2013; LIU et al., 2013).

4.3.2. Propriedades físicas e químicas das biomassas algais

Na Tabela 2 estão apresentados os valores médios de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre, oxigênio e cinzas para as biomassas algais.

Tabela 2. Composição química elementar das diferentes biomassas.

Biomassa	Composição elementar						
	algal	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	Cinzas (%)
L		24,48 c	4,28 b	3,40 b	1,01 a	28,55 a	39,30 a
P		28,89 b	4,92 b	4,59 ab	1,10 a	22,03 c	39,57 a
I		38,39 a	6,51 a	5,57 a	0,95 a	26,70 b	22,83 b

Médias seguidas da mesma letra, na coluna, não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey

Observa-se que a biomassa I apresenta o percentual de carbono e hidrogênio superior ao das biomassas L e P. Cabe salientar que os teores de carbono e nitrogênio encontrados nas biomassas são devidos à composição celular das algas e bactérias e também podem estar ligados a algum material não degradado durante o tratamento do efluente. Segundo MIRÓN et al. (2003), a biomassa de microalgas contém aproximadamente 50% de carbono em sua massa seca. Neste estudo observou-se que a biomassa I, apresentou maior teor de clorofila-a, indicando maior percentual de microalgas em sua composição, e por consequência um maior teor de carbono em sua constituição. Ressalta-se que a biomassa total, medida pela variável sólidos totais, são compostas basicamente da biomassa algal, da biomassa bacteriana, da matéria orgânica que não foi degradada e da matéria inorgânica. As biomassas L e P apresentaram menores teores de hidrogênio e carbono, evidenciando baixo percentual de material orgânico e como consequência apresentaram baixo poder calorífico. Observa-se também que a biomassa L apresentou significativamente menor teor de carbono quando comparado às outras biomassas em base livre de cinzas, tendo os valores obtidos para as biomassas L, P e I de 40,33, 47,81 e 49,75%, respectivamente.

Quanto ao teor de nitrogênio, como esperado, observa-se que a biomassa I apresentou maior percentual, devido à disponibilidade deste nutriente ser maior no efluente industrial que no doméstico. Assim, há maior assimilação do nitrogênio pelas microalgas produzidas nesta LAT. O nitrogênio e o oxigênio não contribuem para a geração de energia e colaboram negativamente para processo de combustão, pois o nitrogênio compete com o carbono para formar os compostos nitrogenados oxidados diminuindo a contribuição energética do

carbono (BORGES *et al.*, 2008). Além disso, deve-se atentar para o fato de que o nitrogênio pode gerar no processo de queima emissões de NO_x, HCN e N₂O, que são prejudiciais ao meio ambiente.

O oxigênio é encontrado na biomassa em grandes quantidades quando comparado a combustíveis fósseis convencionais (VIRMOND, 2007). Segundo Rodrigues (2010) a presença de oxigênio na biomassa, contribui para as reações de oxidação, agindo como comburente, e não como combustível. Observa-se que o teor de oxigênio obtido para as biomassas L e I foram significativamente superiores ao obtido para a biomassa P.

O percentual de cinzas dos materiais destinados para uso como fonte de energia deve ser constantemente observado, pois altas concentrações podem ocasionar problemas na queima, na manutenção de equipamentos, aumentar a emissão de materiais particulados, além de ocasionar perda de eficiência do processo. Verifica-se que os percentuais de inorgânicos presentes nas diferentes biomassas foram altos em comparação a algumas fontes tradicionais de biomassa para a energia, a exemplo da madeira.

Um fato a se considerar é que o efluente doméstico utilizado na produção das biomassas L e P, não foi submetido a nenhum tratamento físico apresentando, portanto, grande quantidade de material inerte, como areia e argila em sua constituição. Logo, o teor de cinzas para estas biomassas foram significativamente altos quando comparados à biomassa I. Salienta-se que elevado percentual de cinzas aumentam os custos do processo, podendo até inviabilizar a utilização da biomassa. Assim, devem ser tomadas medidas para minimizar a quantidade de cinzas na biomassa para aumentar o seu potencial energético.

Outros autores avaliaram a composição química elementar da biomassa algal cultivada em sistema de tratamento de águas residuárias e obtiveram valores próximos aos valores descritos neste estudo para as biomassas L e P (Tabela 3). Não foram encontradas referências sobre composição elementar de biomassa produzida em efluente da indústria de beneficiamento de carnes.

Tabela 3. Composição química elementar da biomassa algal de efluente doméstico relatada por outros autores.

Referência	C (%)	H (%)	N (%)	S (%)	O (%)	Cinzas (%)
SHARARA et al. (2012)	28,26	3,63	2,83	0,57	23,06	41,89
CHEN et al. (2014)	27,90	3,01	3,90	0,40	17,29	47,50

A composição química elementar constitui a base para a análise dos processos de combustão. Sena (2005) comenta que quanto maior os teores de carbono e hidrogênio maior será a eficiência na liberação da energia durante a combustão. O enxofre também libera energia durante a queima, embora seja um inconveniente devido à corrosão das caldeiras e a formação de gases poluentes, como o SO_x, que é um gás nocivo a saúde humana.

Na Tabela 4 são apresentados os valores médios dos macro e micronutrientes e metais pesados observados para as diferentes biomassas algais.

Tabela 4. Macronutrientes, micronutrientes e metais pesados das biomassas L, P e I.

Biomassa	N	P	K	Ca	Mg	S	Na		
	(%)								
L	3,99	1,11	0,27	9,55	0,37	1,01	0,21		
P	4,41	0,84	0,45	2,42	0,22	1,1	0,18		
I	5,59	1,18	0,14	9,76	0,36	0,95	0,83		
Biomassa	Zn	Fe	Mn	Cu	B	Cd	Pb	Cr	Ni
	(ppm)								
L	282,1	44321	625,3	82,6	4,49	ND	6,6	48,5	26,2
P	229,3	41810	912,5	57,3	1,35	3,8	1,1	81,9	38,4
I	192,7	23415	158,2	37	2,89	ND	ND	23,2	15,1

ND = Não detectável

Da mesma forma que o percentual de cinza deve ser observado, em se tratando de biomassa para energia, a quantificação e qualificação dos minerais presentes na fase inorgânica são importantes tanto para a deposição final das cinzas quanto para questões relacionadas aos processos e aos controles

ambientais. GARCIA (2010) relatou que altos teores de magnésio, cálcio e fósforo elevam a quantidade de cinzas residuais, sendo necessárias limpezas constantes nos queimadores. A biomassa I, apesar de apresentar maiores teores desses elementos, obteve menor percentual de cinzas que as outras biomassas. Segundo o mesmo autor, o potássio e o sódio contribuem para a corrosão nos queimadores e equipamentos, além de reduzir a temperatura de fusão das cinzas.

Cuiping et al. (2004) consideraram os elementos Ca, Fe, K, Mg, Na e P como os principais formadores de cinzas provenientes da biomassa e esses são importantes para alguns processos termoquímicos de conversão. Segundo os mesmos autores, os altos teores de alcalinos podem causar sérios problemas quando utilizados para a produção de energia, como *slagging*, *fouling* e *sintering*. Neste trabalho, foram encontrados maiores teores de Na e P na biomassa I e os teores Ca e Mg foram maiores para as biomassas L e I.

Dentre os elementos citados no estudo de Cuiping et al. (2004), os elementos Cd, Mn, Zn, Pb, Cr, Zn foram citados por ter influência sobre a emissão de gases e na composição de cinzas. Foram observados relativamente maiores teores de Zn, Mn e Cd para a biomassa P.

Chen et al. (2014), estudaram a biomassa algal do tratamento de efluentes domésticos e encontraram valores de Na, Ca, P e Mg igual a 0,36, 16,5, 0,93 e 0,37 (%), respectivamente.

Os valores médios da composição química imediata, poder calorífico superior, inferior e útil, densidade a granel e densidade energética das biomassas em estudo, estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Propriedades físicas e químicas das diferentes biomassas algais.

Parâmetro	Biomassa algal		
	L	P	I
Materiais voláteis (%)	54,5 b	54,4 b	69,0 a
Teor de cinzas (%)	39,3 a	39,6 a	22,8 b
Carbono fixo (%)	6,2 b	6,0 b	8,2 a
Poder calorífico superior (Kcal/kg)	3459 b	3157 b	4867 a
Poder calorífico inferior (Kcal/kg)	3227 bc	2891 c	4515 a
Poder calorífico útil (Kcal/kg)	2846 b	2550 b	4031 a
Densidade a Granel (kg/m³)	597,9 ab	525,9 b	623,1 a
Densidade energética (Mcal/m³)	1930 b	1521 b	2813 a

Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey.

Um combustível é tanto melhor quanto mais alto for seu poder calorífico, seu teor de carbono fixo e de material volátil e menor for seu teor de umidade e cinzas. Observa-se que as biomassas L e P apresentaram teor de cinzas significativamente maior em relação a biomassa I, o que influenciou negativamente o seu poder calorífico. Além disso, essas biomassas apresentaram baixo conteúdo de matérias voláteis, que são importantes durante a ignição e as etapas iniciais do processo de combustão (CORTEZ *et al.*, 2008).

O percentual de carbono fixo refere-se à fração de carvão que se queima no estado sólido. Combustíveis com teores mais elevados de carbono fixo são preferíveis por queimarem mais lentamente (STURION *et al.*, 1988) entretanto, essa característica é mais importante na produção de carvão. As três biomassas apresentaram baixo teor de carbono fixo. Ressalta-se que o teor de carbono fixo e o teor de cinzas possuem elevado índice de correlação com o poder calorífico, entretanto, nesse estudo, apesar do baixo teor de carbono fixo e alto teor de cinzas observado para a biomassa I, a mesma apresentou alto poder calorífico, devido ao maior percentual de C e H em sua composição.

O poder calorífico é um excelente parâmetro para se avaliar a potencialidade energética de combustíveis, sendo definido como a quantidade de energia liberada na combustão completa de uma unidade de massa do material combustível (PROTÁSIO *et al.*, 2011). Pode-se observar pela Tabela 5, que a biomassa I, apresentou poder calorífico significativamente maior que as outras

biomassas, sendo 40,71% maior que a biomassa L e 54,15% maior que a biomassa P. Essa diferença pode ser justificada pela diferença entre a constituição química elementar e mineral da biomassa I em relação às outras e a significativa dependência do poder calorífico a essas variáveis. O baixo poder calorífico das biomassas L e P está relacionado provavelmente ao alto percentual de cinzas e este justificado pela ausência de pré-tratamento do efluente utilizado. Esse problema pode ser facilmente corrigido pela inserção da etapa de tratamento físico, como uma caixa de areia a montante do reator UASB ou das LATs.

O lodo, também subproduto do tratamento de efluentes, vem sendo avaliado para a geração de energia por diversos autores. BORGES et al. (2008), obtiveram valor de poder calorífico superior de 4804,01 kcal/kg para o lodo sanitário, 4660,61 kcal/kg para o lodo de celulose e papel e 4063,10 kcal/kg para o lodo de indústria têxtil. RODRIGUES (2010) encontrou para o lodo da indústria de papel e celulose 3991,40 kcal/kg e AVELAR (2012), encontrou para o lodo da indústria têxtil 5215,10 kcal/kg.

Um parâmetro de grande importância para caracterizar biomassa para a produção de energia é a densidade energética, que é calculada em função do poder calorífico inferior e da densidade a granel. A densidade a granel é um parâmetro relevante, pois quantifica a massa que pode ocupar um volume definido, considerando os espaços vazios entre as partículas, fornecendo informações úteis para a logística de um produto. Assim, para que a utilização da biomassa seja viável, também é desejável que ela apresente elevados valores de densidade a granel e consequente densidade energética, pois os custos de transporte e armazenamento são essenciais na viabilidade econômica das energias renováveis. Observa-se que a biomassa I, apresentou significativamente maior densidade energética que as demais biomassas, visto que apresentou maior poder calorífico e densidade a granel, evidenciando o seu potencial para geração de energia na forma de calor.

De modo geral, não foram evidenciadas diferenças significativas entre as biomassas L e P para as diferentes propriedades avaliadas. Assim, pode-se constatar que o método de produção, ao contrário do tipo de efluente, pouco influenciou nas propriedades intrínsecas da biomassa.

4.3.3. Análise Termogravimétrica

Na Figura 2 estão apresentadas as curvas termogravimétricas para as biomassas, na faixa de temperatura de 100 a 600°C.

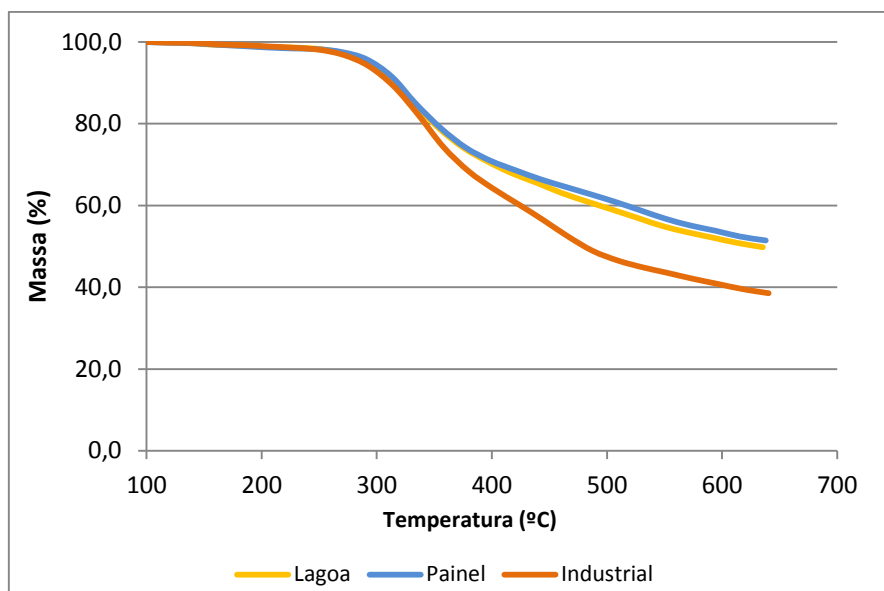


Figura 2. Curvas termogravimétricas para as biomassas L, P e I. Atmosfera de nitrogênio, taxa de aquecimento de 10 °C/min.

Por meio da análise termogravimétrica é possível verificar em que temperatura é iniciada a decomposição térmica e ainda, em que faixa de temperatura a decomposição térmica da biomassa é mais pronunciada (OLIVEIRA, 2003). Comparando-se as curvas de degradação térmica para as biomassas, verifica-se que ambas perdem a maior parte da sua massa entre as temperaturas de 300 e 500°C, entretanto as biomassas L e P perdem massa mais lentamente, tendo conseqüentemente maior massa residual total. Além disso, destaca-se que as biomassas são estáveis até $\pm 300^{\circ}\text{C}$, o que pode sugerir que a torrefação dessas biomassas para o aumento do poder calorífico é uma interessante alternativa que deve ser avaliada.

No estudo da pirólise de lodo de esgoto, as perdas de massa ocorridas a temperaturas inferiores a 600°C são atribuídas principalmente à degradação térmica da matéria orgânica, e as perdas ocorridas acima de 600°C à decomposição da matéria inorgânica, como carbonato de cálcio, por exemplo

(BIAGINI et al., 2002). Logo, acredita-se que as biomassas desse estudo tenham comportamento semelhante conforme pode ser observado na Figura 2.

Na Tabela 6 são apresentados os valores das perdas de massa obtidas para cada biomassa, em função de faixas de temperatura de 100 a 600°C, com intervalos de 100°C, além da massa residual total isenta de inorgânicos, ou seja, a massa residual orgânica.

Tabela 6. Valores da perda de massa das biomassas algais em função da temperatura, em porcentagem.

Biomass	Faixas de Temperatura (°C)					Massa residual (%)	
	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600	Total	Total sem inorgânicos
L	1,18	8,15	20,03	11,65	8,13	50,86	11,56
P	1,35	7,12	20,60	10,08	8,44	52,42	12,85
I	1,11	9,80	24,95	17,66	6,95	39,54	16,71

Observa-se que as biomassas L e P, obtiveram menores porcentagens de perda de massa para todas as faixas de temperatura compreendidas entre 200 e 500°C. Essa menor perda de massa é função do alto teor de material inorgânico presente, confirmado pelo menor percentual de massa residual orgânica (sem cinzas). A biomassa I, ao contrário, apesar de ter apresentado maiores porcentagens de perda de massa, obteve maior massa residual orgânica, indicando que a degradação térmica dessa fração ocorreu mais lentamente. Assim pode-se dizer que esta biomassa possui maior resistência térmica, sugerindo que a mesma seja um melhor combustível para a queima direta.

Segundo a classificação de diferentes biomassas proposta por HEIKKINEN et al.(2004), o lodo frigorífico é constituído majoritariamente de compostos orgânicos de baixa estabilidade dado que apresenta taxas máximas de decomposição na faixa de temperatura de aproximadamente 209 a 346°C. Observa-se que para a biomassa algal produzida neste tipo de efluente, a maior decomposição ocorreu na faixa entre 300 e 500°C, indicando que a presença de microalgas, provavelmente, contribuiu para menor degradação desta biomassa.

4.4. Conclusões

- A LAT que produziu a biomassa I apresentou a maior produtividade em termos de sólidos totais, voláteis e clorofila- *a*;

- As biomassas L e P não apresentaram diferenças significativas a 95% de probabilidade para a maioria dos parâmetros avaliados, evidenciando que a forma de produção, ao contrário do tipo de efluente, não influenciou sobre as características intrínsecas das biomassas;

- As biomassas L e P não apresentaram características favoráveis para sua utilização como fonte de energia principalmente pelo alto teor de cinzas e baixo poder calorífico, necessitando de procedimentos para a retenção dos inorgânicos presentes no efluente;

- A biomassa I, obteve uma maior massa residual orgânica na análise termogravimétrica, indicando maior estabilidade térmica durante a sua degradação;

- A biomassa I apresentou-se como melhor alternativa para uso como biocombustível sólido, devido principalmente ao seu alto poder calorífico e densidade energética, além da sua maior produtividade na LAT.

4.2. Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM D2015**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal And Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter. Philadelphia, USA, 1982.

APHA. Standard Methods for examination of water and wastewater. Washington: American Water Work Association, Water Environmental Federation. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6922 – Carvão vegetal - Ensaios físicos determinação da massa específica (densidade a granel)**. Rio de Janeiro, 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 8112 – Análise química imediata do carvão vegetal**. Rio de Janeiro, 1986.

AVELAR, N.V. **Potencial dos resíduos sólidos da industrial têxtil para fins energéticos**. 2012. 71f. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2012

BENEMANN, J. R. Opportunities and challenges in algae biofuels production. **Algae World**, p. 17-18, 2008.

BIAGINI, E., LIPPI, F., PETARCA, L., TOGNOTTI, L. Devolatilization rate of biomasses and coal–biomass blends: an experimental investigation. **Fuel**, v. 81, n. 8, p. 1041-1050, 2002.

BORGES, F., SELLIN, N., MEDEIROS, S. H. W.. Caracterização e avaliação de lodos de efluentes sanitário e industrial como biomassa na geração de energia. **Ciência & Engenharia**, v. 17, n. 1/2, p. p. 27-32, 2008.

BRENNAN, L., OWENDE, P. Biofuels from microalgae—a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 14, n. 2, p. 557-577, 2009.

CHEN, W. T., ZHANG, Y., ZHANG, J., YU, G., SCHIDEMAN, L. C., ZHANG, P., MINARICK, M. Hydrothermal liquefaction of mixed-culture algal biomass from

wastewater treatment system into bio-crude oil. **Bioresource technology**, v. 152, p. 130-139, 2014.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology advances**, v. 25, n. 3, p. 294-306, 2007.

CLARENS, A. F., RESURRECCION, E. P., WHITE, M. A., COLOSI, L. M. Environmental life cycle comparison of algae to other bioenergy feedstocks. **Environmental science & technology**, v. 44, n. 5, p. 1813-1819, 2010.

CORTEZ, L. A. B., LORA, E. E. S., GÓMEZ, E. O. Caracterização da biomassa. In: GÓMEZ, E. O. Biomassa para energia. Campinas, Editora da Unicamp, p 31-62, 2008.

CUIPING, L., CHUANGZHI, W., HAITAO, H. Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China. **Biomass and bioenergy**, v. 27, n. 2, p. 119-130, 2004.

DAVIS, R., ADEN, A., PIENKOS, P.T. Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production. **Applied Energy**, v. 88, n. 10, p. 3524-3531, 2011.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *Manual de métodos de análise de solo*. 2nd ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p

GARCIA, D. P. Caracterização química, física e térmica de pellets de madeira produzidos no Brasil. 2010. 101 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de engenharia de Guaratinguetá. Guaratinguetá 2010.

GRIMA, E. M., BELARBI, E. H., FERNÁNDEZ, F. A., MEDINA, A. R., CHISTI, Y. Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. **Biotechnology advances**, v. 20, n. 7, p. 491-515, 2003.

GROSS, M., HENRY, W., MICHAEL, C., WEN, Z. Development of a rotating algal biofilm growth system for attached microalgae growth with in situ biomass harvest. **Bioresource technology**, v. 150, p. 195-201, 2013.

HEIKKINEN, J. M., HORDIJK, J. C., DE JONG, W., SPLIETHOFF, H.. Thermogravimetry as a tool to classify waste components to be used for energy generation. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 71, n. 2, p. 883-900, 2004.

JAYATHILAKAN, K., SULTANA, K., RADHAKRISHNA, K., BAWA, A. S. Utilization of byproducts and waste materials from meat, poultry and fish processing industries: a review. **Journal of Food Science and Technology**, 49(3), p. 278–293. 2012.

JOHNSON, M. B., WEN, Z. Development of an attached microalgal growth system for biofuel production. **Applied microbiology and biotechnology**, v. 85, n. 3, p. 525-534, 2010.

LIU, T., WANG, J., HU, Q., CHENG, P., JI, B., LIU, J., ... GAO, L. Attached cultivation technology of microalgae for efficient biomass feedstock production. **Bioresource technology**, v. 127, p. 216-222, 2013.

MARKER, A.F.H.; NUSCH, H.; RAI, H.; RIEMANN, B. The measurement of photosynthetic pigments in freshwaters and standardization of methods: conclusion and recommendations. **Archiv für Hydrobiologie**, v.14, p. 91-106, 1980.

MIRÓN, A. S., GARCIA, M. C. C., GÓMEZ, A. C., CAMACHO, F. G., GRIMA, E. M., CHISTI, Y. Shear stress tolerance and biochemical characterization of *Phaeodactylum tricornutum* in quasi steady-state continuous culture in outdoor photobioreactors. **Biochemical Engineering Journal**, v. 16, n. 3, p. 287-297, 2003.

NORM, Nederlandse. NEN 6520. **Norma holandesa sobre determinação de clorofila a pelo método do etanol**, 1981.

NUSH, E. A. Comparison of different methods for chlorophyll and phaeopigment determination. **Arch. Hydrobiol. Beih**, v. 14, p. 14-36, 1980.

OLGUÍN, E. J. Dual purpose microalgae–bacteria-based systems that treat wastewater and produce biodiesel and chemical products within a Biorefinery. **Biotechnology advances**, v. 30, n. 5, p. 1031-1046, 2012.

OLIVEIRA, E. **Características anatômicas, químicas e térmicas da madeira de três espécies de maior ocorrência no semi-árido nordestino**. 2003, 149f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

OZKAN, A., KINNEY, K., KATZ, L., BERBEROGLU, H. Reduction of water and energy requirement of algae cultivation using an algae biofilm photobioreactor. **Bioresource technology**, v. 114, p. 542-548, 2012.

PARK, J. B. K., CRAGGS, R. J., SHILTON, A. N. Recycling algae to improve species control and harvest efficiency from a high rate algal pond. **Water research**, v. 45, n. 20, p. 6637-6649, 2011.

PICOT, B., EL HALOUANI, H., CASELLAS, C., MOERSIDIK, S., BONTOUX, J. Nutrient removal by high rate pond system in a Mediterranean climate (France). **Water Science & Technology**, v. 23, n. 7-9, p. 1535-1541, 1991.

PINHEIRO, G.F., RENDEIRO, G., PINHO, J. T. Densidade energética de resíduos florestais. **Biomassa & energia** v.2, n.2, p.113-123, 2005.

PROTÁSIO, T. P., BUFALINO, L., TONOLI, G. H. D., COUTO, A. M., TRUGILHO, P. F., JÚNIOR, M. G. Relação entre o poder calorífico superior e os componentes elementares e minerais da biomassa vegetal. **Pesq. Flor. Bras.**, Colombo, v.31, n.66, p. 113-122, 2011.

ROCHA, E. O., CALIJURI, M. L., SANTIAGO, A. F., DE ASSIS, L. C., ALVES, L. G. S. The contribution of conservation practices in reducing runoff, soil loss, and transport of nutrients at the watershed level. **Water resources management**, v. 26, n. 13, p. 3831-3852, 2012.

RODRIGUES, V. A. J. **Valorização energética de lodo biológico da indústria celulósica através da briquetagem**. 2010. 234 p. Dissertação (Mestrado em ciência florestal) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa 2010.

SARTORY, D.P.; GROBBELAAR, J.U. Extraction of chlorophyll a from freshwater phytoplankton for spectrophotometric analysis. **Hydrobiologia**, v. 114, 177-187, 1984.

SAVAGE, P. E.; HESTEKIN, Jamie A. A perspective on algae, the environment, and energy. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 32, n. 4, p. 877-883, 2013.

SCHNURR, P. J., ESPIE, G. S., ALLEN, D. G. Algae biofilm growth and the potential to stimulate lipid accumulation through nutrient starvation. **Bioresource technology**, v. 136, p. 337-344, 2013.

SCHWARZBOLD, A.; BURLIGA, A. L.; TORGAN, L. C. **Ecologia do Périfiton**. São Carlos: RiMa Editora, 2013, 413 p.

SENA, R. F. D. **Avaliação da biomassa obtida pela otimização da flotação de efluentes da indústria de carnes para a geração de energia**. 2005. 94p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SHARARA, M. A., SADAKA, S., ANATOLE, H. Auger reactor gasification of algal blooms produced in a waste water treatment facility. In: **ASABE Annual International Meeting**. 2012.

STURION, J. A., PEREIRA, J. C. D., CHEMIN, M. S. Qualidade da madeira de *Eucalyptus viminalis* para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte. **Boletim de Pesquisa Florestal, Colombo**, n. 16, p. 55-59, 1988.

SUKIAS, J., CRAGGS, R. Digestion of wastewater pond microalgae and potential inhibition by alum and ammoniacal-N. **Water Science & Technology**, v. 63, n. 5, p. 835-840, 2011.

VERHEIJEN, L. A. H. M., WIERSEMA, D., HULSHOFF POL, L. W. Management of Waste from Animal Product Processing. **J. De Wit International Agriculture Centre Wageningen**, The Netherlands, January, 1996.

VIRMOND, E. Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia. 2007. 137p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

WIJFFELS, R. H. Potential of sponges and microalgae for marine biotechnology. **Trends in Biotechnology**, v. 26, n. 1, p. 26-31, 2008.

WIJFFELS, R. H., BARBOSA, M. J. An outlook on microalgal biofuels. **Science (Washington)**, v. 329, n. 5993, p. 796-799, 2010.

ZAMALLOA, C., BOON, N., VERSTRAETE, W. Decentralized two-stage sewage treatment by chemical–biological flocculation combined with microalgae biofilm for nutrient immobilization in a roof installed parallel plate reactor. **Bioresource technology**, v. 130, p. 152-160, 2013.

5. CAPITULO II: PRODUÇÃO DE BRIQUETES A PARTIR DE BIOMASSAS ALGAS CULTIVADAS EM LAGOAS DE ALTA TAXA

RESUMO

O uso de biomassas como fonte de energia tem ganhado forças no mercado em todo mundo devido, principalmente, ao seu apelo ambiental. No entanto, as biomassas geralmente apresentam características que dificultam seu aproveitamento na forma original, como alta umidade, forma irregular, tamanho variado e baixa densidade. A produção de briquetes pode ser uma maneira simples e eficaz de solucionar estes problemas por transformar uma massa de partículas dispersas em um sólido com forma regular e com alta densidade, reduzindo assim os custos de logística. Assim, este trabalho objetivou avaliar as propriedades físicas, químicas e mecânicas de briquetes produzidos a partir da mistura em diferentes proporções da biomassa algal e epicarpo de pinhão manso (casca externa do fruto). Para avaliação dos briquetes foram determinadas as seguintes propriedades: umidade de equilíbrio higroscópico, densidade aparente, carga máxima de ruptura, poder calorífico, densidade energética, teores de voláteis, carbono fixo e cinzas. A adição da biomassa algal a composição dos briquetes, em geral, diminuiu a higroscopicidade e o teor de carbono fixo, e por outro lado aumentou a densidade aparente, o teor de cinzas e a densidade energética. Concluiu-se que a produção de briquetes compostos por biomassa algal e epicarpo do fruto de pinhão manso em escala laboratorial mostrou-se tecnicamente viável devido principalmente a alta densidade energética obtida em todos os tratamentos.

Palavras chave: biomassa algal; lagoas de alta taxa; briquetes; bioenergia.

ABSTRACT

The use of biomass as an energy source has gained strength in the market worldwide, mainly due to its environmental appeal. However, the biomass generally exhibit characteristics that hinder their use in its original form, as high humidity, irregular shape, vary in size and low density. The production of briquettes may be a simple and effective way to solve these problems by transforming a mass of solid particles dispersed in a regular manner and with high density. This research aimed to evaluate the physical, chemical and mechanical briquettes produced from the mixture in different proportions of algal biomass and epicarp of jatropha (outer shell of the fruit). To evaluate the briquettes were determined the following properties: moisture equilibrium moisture content, bulk density, maximum tensile strength, calorific value, energy density, volatile content, fixed carbon and ash. The addition of the algal biomass in briquettes, in general, decreased hygroscopicity and the fixed carbon content, and on the other hand increased bulk density, ash content and energy density. The production of briquettes made up of algal biomass and epicarp of the jatropha fruit on a laboratory scale proved to be technically feasible mainly due to high energy density obtained in all treatments.

Keywords: algae biomass; high rate algal ponds; briquettes; bioenergy.

5.1. Introdução

A busca por combustíveis alternativos vem ganhando destaque nas últimas décadas, existindo grande esforço com relação ao aproveitamento de novas fontes de energia que sejam capazes de substituir os combustíveis fósseis por outras fontes mais econômicas e ambientalmente corretas (CAIRES, 2010). Neste contexto, o uso da biomassa surge como alternativa no cenário de utilização de energias renováveis.

Neste sentido, o Brasil possui relevante posição no mercado mundial de energia. Segundo dados do balanço energético nacional de 2015, referente a 2014 aproximadamente 40% da energia interna do Brasil são provenientes de fontes renováveis, dos quais aproximadamente 24% correspondem à energia proveniente da biomassa (BEN, 2015).

Apesar da expressividade dos números, existe a possibilidade da utilização de outras fontes de biomassa que ainda são pouco exploradas no Brasil, a exemplo da energia obtida através do tratamento de águas residuárias. Neste sentido, o uso de microalgas cultivadas em lagoas de alta taxa para a produção de energia consiste em opção promissora, visto que elas podem ser convertidas em combustíveis a partir de diversas rotas. Uma rota de conversão pouco avaliada, é a queima direta da biomassa algal para a geração de energia na forma de calor. Brennan e Owende (2009), afirmaram que esta rota necessita de mais pesquisas para determinar a sua viabilidade.

Apesar disso, o uso de biomassas em geral como fonte de energia tem ganhado força no mercado em todo mundo devido, principalmente, ao seu apelo ambiental. No entanto, as biomassas geralmente apresentam características que dificultam seu aproveitamento na forma original, como alta umidade, forma irregular, tamanho variado e baixa densidade. Além disso, a queima da biomassa particulada pode acarretar problemas operacionais e ambientais.

Logo, a produção de briquetes a partir de biomassas pode ser uma maneira simples e eficaz de solucionar estes problemas. O processo de briquetagem consiste, basicamente, na aplicação de pressão em uma massa de partículas dispersas, com o objetivo de torna-las um sólido com forma regular e com alta densidade. Bhattacharya et al., (2012) destacam como principais vantagens dos briquetes o aumento da densidade energética, maior facilidade de

transporte e estocagem, queima uniforme e consequente aumento da eficiência do processo.

Rodrigues (2010) e Avelar (2012) avaliaram a briquetagem do lodo da indústria têxtil e o lodo da indústria celulósica (também subprodutos do tratamento de efluentes), respectivamente, e verificaram que a compactação dessas biomassas é tecnicamente viável devido, principalmente, as características energéticas inerentes destas biomassas. No entanto, ainda são os trabalhos relacionados ao uso de biomassas algais para produção de briquetes para geração de energia. Assim, o objetivo desse trabalho foi avaliar a viabilidade da produção de briquetes a partir da mistura de biomassas algais e epicarpo do fruto de pinhão manso para geração de energia térmica.

5.2. Materiais e Métodos

5.2.1. Local do experimento e Matéria-prima

Os experimentos foram desenvolvidos no município de Viçosa, Estado de Minas Gerais, Brasil (20°45'14"S, 42°52'54"W), no Laboratório de Painéis e Energia da Madeira (LAPEM).

Utilizou-se como matérias primas para produção dos briquetes três diferentes biomassas algais e o epicarpo do fruto de pinhão manso (*Jatropha curcas* L.).

As biomassas algais foram cultivadas como subproduto do tratamento de efluentes em lagoas de alta taxa, a saber: i) Biomassa produzida em efluente doméstico e coletada diretamente da LAT (L) ii) Biomassa produzida em efluente doméstico em sistema misto lagoa-painéis e coletada dos painéis (P) e iii) biomassa produzida em efluente da indústria de beneficiamento de carnes e coletada da LAT (I). Após a coleta, as biomassas algais L e I foram submetidas primeiramente à floculação química na LAT, centrifugadas, secas ao sol e posteriormente em estufa à temperatura de 60°C até atingir o teor de umidade médio de 12%. A biomassa P foi raspada manualmente dos painéis, depois submetida à secagem ao sol e posteriormente em estufa à temperatura de 60°C para atingir o teor de umidade médio de 12%. Depois, as biomassas algais foram

trituras manualmente e classificadas em peneira de malha de 2 mm para adequação da granulometria.

O epicarpo do fruto de pinhão manso (*Jatropha curcas* L.), casca externa, foi doada pelo laboratório do banco de germoplasma de *Jatropha curcas* da UFV, localizado na fazenda experimental da cidade de Araponga-MG, após descascamento do fruto para proceder a extração mecânica do óleo para produção de biodiesel. O epicarpo foi reduzido a partículas em moinho martelo e classificado em peneiras com malha de 2 mm, para se adequar as características da matriz da briquetadeira. Após a classificação, as partículas foram secas em estufa a temperatura de 60°C até alcançarem umidade média de 12%.

Após a secagem, as biomassas foram devidamente acondicionadas em sacos plásticos, para evitar que as mesmas absorvessem umidade do ar.

5.2.2. Caracterização das biomassas

O teor de umidade das biomassas foi determinado através de diferença de uma massa conhecida antes e após a secagem a 103 ± 2°C até massa constante, em estufa de esterilização e secagem com controle de temperatura de acordo com a norma NBR 7993 (ABNT, 1983).

Para a determinação da densidade a granel, as biomassas foram acondicionadas em recipiente com as dimensões: 10 cm de largura x 10 cm de altura x 10 cm de comprimento. Por meio de uma balança analítica de precisão determinou-se a massa de partículas contida no volume do recipiente, sendo realizadas três repetições. A densidade a granel foi obtida dividindo-se a massa pelo volume da amostra.

O teor de cinzas foi determinado de acordo com a norma NBR 8112 (ABNT, 1986).

O poder calorífico superior foi obtido experimentalmente por meio do método da bomba calorimétrica adiabática, de acordo com a norma ASTM D 2015 (ASTM, 1982).

5.2.3. Produção dos briquetes

Os briquetes foram produzidos usando como base o epicarpo do fruto do pinhão manso, casca externa do mesmo, devido sua composição lignocelulósica adequada ao processo de compactação.

Os briquetes foram produzidos em três experimentos distintos (Figura 3) em função do tipo de biomassa algal, a saber: Experimento I (Lagoa) – Briquetes constituídos por epicarpo de pinhão manso e a biomassa L, sendo 5 tratamentos compostos de misturas de 0 até 100% (amplitude de 25%); Experimento II (Painel) – Briquetes constituídos por epicarpo de pinhão manso e biomassa P, sendo 5 tratamentos compostos de misturas de 0 até 100% (amplitude de 25%); Experimento III (Industrial) – Briquetes constituídos por epicarpo de pinhão manso e a biomassa I, sendo 5 tratamentos compostos de misturas de 0 até 100% (amplitude de 25%).

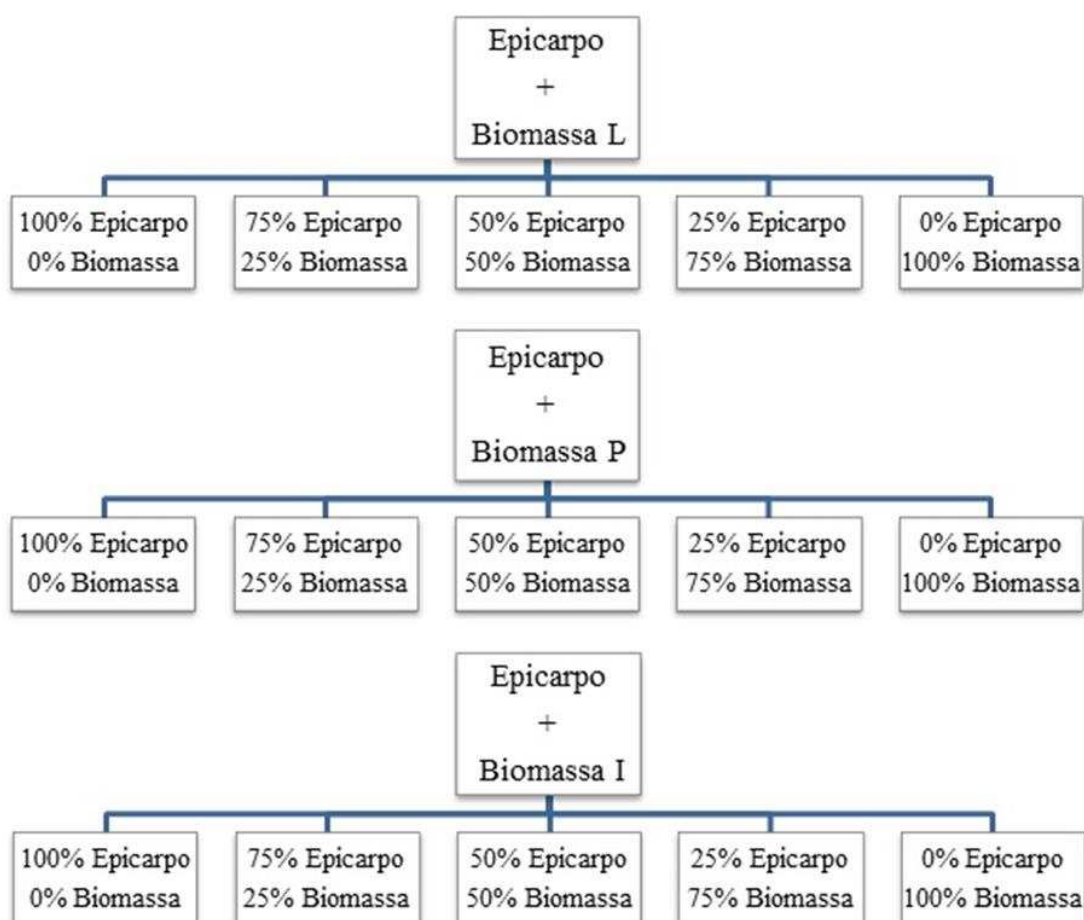


Figura 3. Delineamento experimental utilizado para a produção dos briquetes a partir das biomassas algais.

Para a produção dos briquetes utilizou-se uma briquetadeira laboratorial da marca Lippel modelo LB-32, ajustada na temperatura de 120°C. O tempo de prensagem e de resfriamento dos briquetes foram ambos de 5 minutos e pressão de compactação de 1200 PSI. As variáveis tempo, temperatura e pressão foram obtidas a partir de testes realizados previamente ao experimento.

Para a produção de cada briquete foi utilizado 18,0 g de mistura de materiais, na granulometria inferior que 2 mm e teor de umidade de aproximadamente 12%, base seca. Após a produção, os briquetes foram condicionados em câmara climática até atingir a umidade de equilíbrio, nas condições de 65 ± 3 % de umidade relativa e temperatura de 20 ± 3 °C.

5.2.4. Propriedades dos briquetes

A umidade de equilíbrio higroscópico (UEH) foi obtida após climatização dos briquetes em câmara climática a 23°C e 65% de umidade relativa.

A densidade aparente foi determinada de acordo com o método proposto por VITAL (1984), utilizando-se uma balança hidrostática para determinação do volume deslocado.

A determinação do conteúdo de materiais voláteis, carbono fixo e cinzas foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR 8112 (ABNT, 1986).

O poder calorífico superior foi obtido experimentalmente por meio do método da bomba calorimétrica adiabática, de acordo com a norma ASTM D 2015 (ASTM, 1982).

A carga máxima de ruptura foi calculada durante a aplicação de força de compressão plana, utilizando-se máquina de testes universal modelo LOSENHAUSEN. O procedimento de análise foi de acordo com a metodologia NBR 7190 – Anexo B (ABNT, 1997), uma vez que não se tem normas específicas para esse teste em briquetes.

5.2.5. Delineamento Experimental

Cada experimento, individualmente, foi analisado segundo um delineamento inteiramente casualizado. Os dados foram submetidos aos testes de Lilliefors para testar a normalidade, e Cochran para testar a homogeneidade

das variâncias. Em seguida, procedeu-se à análise de variância pelo teste F e quando observado efeito significativo realizou-se gráficos de regressão linear simples, Equação 3, e quadrática, Equação 4, dependendo do comportamento dos dados, do coeficiente de determinação (R^2), do erro padrão residual e da distribuição dos resíduos, sendo:

$$\text{Linear: } Y = \beta_1 \cdot X + \beta_0 \quad \text{(Equação 3)}$$

$$\text{Quadrática: } Y = \beta_2 \cdot X^2 + \beta_1 \cdot X + \beta_0 \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde β_0 , β_1 e β_2 são os coeficientes de regressão.

5.3. Resultados e Discussão

5.3.1. Características das biomassas

Na Tabela 7 são apresentadas as principais características das biomassas utilizadas para a produção dos briquetes.

Tabela 7. Características das biomassas utilizadas para a produção dos briquetes.

Parâmetro	Material			
	Biomassa L	Biomassa P	Biomassa I	Epicarpo
Umidade (base seca) (%)	12,0 a	11,80 a	11,93 a	12,02 a
Densidade a granel (Kg/m³)	597,9 ab	525,9 b	623,1 a	208,72 c
Cinzas (%)	39,3 a	39,57 a	22,83 b	14,76 c
PCS (Kcal/Kg)	3459 c	3157 c	4867 a	4056 b

Médias seguidas da mesma letra, na linha, não diferem entre si a 5% de significância pelo teste de Tukey.

Observa-se que o teor de umidade, base seca, das biomassas usadas para a produção dos briquetes ficaram próximas a estabelecida inicialmente (12%), e não diferiram entre si. Logo, não se espera efeito da umidade nas propriedades dos mesmos.

Verifica-se, também, que o epicarpo do fruto de pinhão manso apresentou densidade a granel e teor de cinzas significativamente menor que as biomassas algais.

O poder calorífico superior da biomassa algal I foi significativamente superior as demais, provavelmente, devido alto teor de carbono e hidrogênio em sua composição elementar.

5.3.2. Propriedades dos briquetes

Na Tabela 8 são apresentadas as equações e os respectivos coeficientes de determinação (R^2) para a estimativa das propriedades dos briquetes.

Tabela 8 – Equações e coeficientes de determinação (R^2) para estimativa das propriedades dos briquetes, por experimento, em função da porcentagem de biomassa algal

Propriedade	Experimento	Equação	R^2
UEH	Lagoa	$y = 0,0002x^2 - 0,072x + 14,971$	0,9899
	Painel	$y = 0,003x^2 - 0,0645x + 14,817$	0,988
	Industrial	$y = 0,0005x^2 - 0,0525x + 14,658$	0,465
Densidade aparente	Lagoa	$y = 0,0029x + 1,0444$	0,9887
	Painel	$y = 0,0035x + 1,0454$	0,9902
	Industrial	$y = 0,0014x + 1,0647$	0,9123
PCS	Lagoa	$y = -5,9483x + 4053,9$	0,9999
	Painel	$y = -8,9616x + 4053,8$	0,9899
	Industrial	$y = 8,1438x + 4054$	0,9979
Carbono fixo	Lagoa	$y = -0,0919x + 15,386$	0,9971
	Painel	$y = -0,094x + 15,246$	0,997
	Industrial	$y = -0,0715x + 15,286$	0,9945
Materiais voláteis	Lagoa	$y = -0,1538x + 69,937$	0,9994
	Painel	$y = -0,1538x + 69,815$	0,9881
	Industrial	$y = -0,0067x + 69,825$	0,733
Teor de cinzas	Lagoa	$y = 0,2462x + 14,76$	0,9996
	Painel	$y = 0,2485x + 14,699$	0,9975

	Industrial	$y = 0,0795x + 14,779$	0,9974
Carga de ruptura	Lagoa	$y = -0,0134x^2 + 1,9219x + 104,85$	0,796
	Painel	$y = 0,0056x^2 + 2,0314x + 105,02$	0,9504
	Industrial	$y = -0,0365x^2 + 3,6685x + 101,19$	0,6156
Densidade energética	Lagoa	$y = 11,489x + 780,77$	0,9892
	Painel	$y = 7,3966x + 780,84$	0,9969
	Industrial	$y = 20,355x + 780,72$	0,9971

As equações obtidas neste trabalho (Tabela 8) foram consideradas satisfatórias, pois os valores de R² para as equações foram, na sua maioria, superiores a 90%.

Nas Figuras 4 e 5 são apresentadas as curvas para a análise dos parâmetros determinados em função das porcentagens da biomassa algal presente nos briquetes.

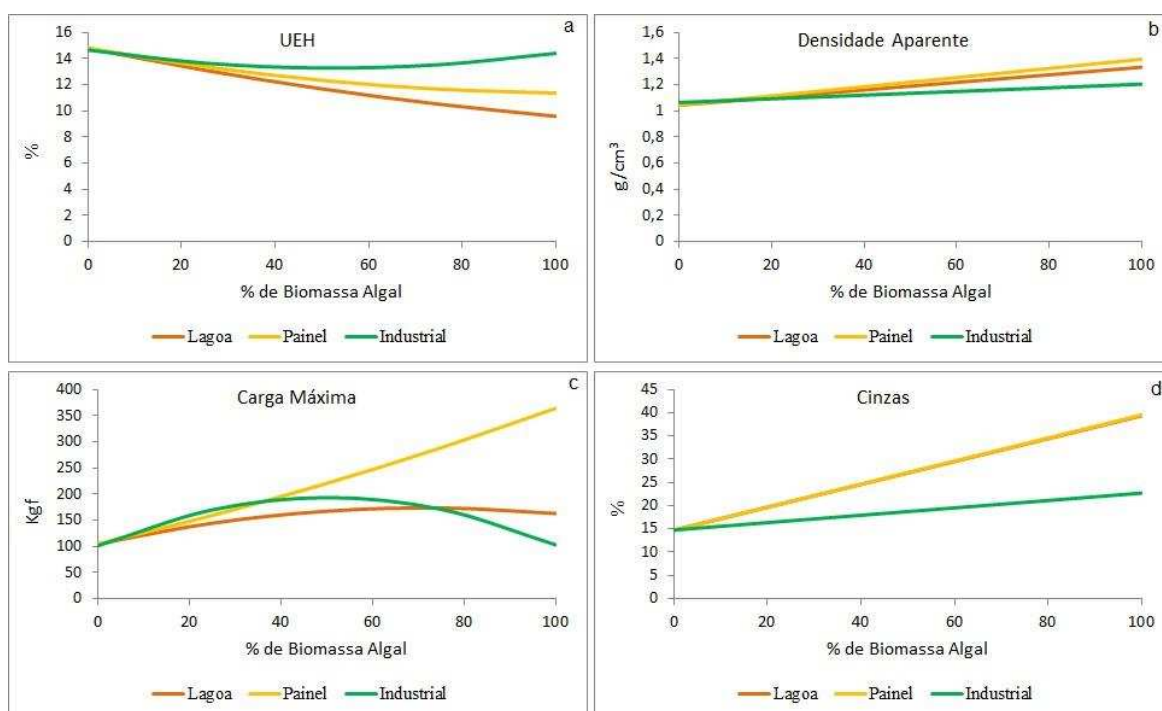


Figura 4. Valores observados e estimados de equilíbrio higroscópico (UEH) (%), densidade aparente (g/cm³), carga máxima de ruptura (kgf) e, materiais voláteis (%) em função do teor de biomassa algal presente nos briquetes.

Na Figura 4a observa-se que a umidade de equilíbrio higroscópico dos briquetes compostos pelas biomassas L e P diminui com o aumento da

porcentagem de biomassa algal adicionada aos briquetes, característica importante em se tratando de combustíveis, pois, a baixa UEH confere aos briquetes seu formato compactado e, conseqüentemente, maior resistência física e mecânica (VILAS BOAS, 2011). Além disso, a adição de materiais que contribuam para menor absorção de umidade pelo briquete durante as etapas de sua logística até o uso diminuem os custos da mesma e aumentam a eficiência energética do produto.

A densidade aparente expressa a quantidade de material por unidade de volume, portanto, quanto maior, mais concentrada estará a energia e, assim, tem-se um briquete com maior potencial energético em um mesmo volume (FURTADO et al., 2010). Verifica-se na Figura 4b que há um incremento da densidade aparente à medida que se aumenta a quantidade de biomassa algal na composição dos briquetes e isso se deve a maior densidade das biomassas algais comparadas ao epicarpo do pinhão manso.

Rogrigues (2010) relatou valores entre 1,10 e 1,50 g/cm³ para briquetes produzidos com diferentes proporções de lodo de celulose e papel e finos de madeira e Avelar (2012) encontrou para os briquetes compostos de lodo de indústria têxtil e resíduo de algodão valores entre 1,18 e 1,27 g/cm³, sendo ambos próximos aos valores encontrados neste trabalho.

A força requerida durante o teste de resistência a compressão plana expressa a tensão máxima suportada pelo briquete até o seu rompimento e está relacionada com as forças de aderência entre as partículas do material que o constitui (KALIYAN E MOREY, 2009). Observa-se que a carga máxima de ruptura aumenta com os incrementos de biomassa algal a composição dos briquetes até 50% para todos os experimentos, sendo que o aumento mais acentuado é para a biomassa P, indicando que as partículas desta e o epicarpo de pinhão manso tiveram relativamente maior aderência entre si. Pode-se observar que os briquetes fabricados com a biomassa I, tiveram maior higroscopicidade e pior desempenho no ensaio de compressão, confirmando que a maior UEH reduz a resistência mecânica dos briquetes, conforme evidenciado (Figura 4c).

Avelar (2012) verificou em seu trabalho que o aumento da porcentagem de lodo da indústria têxtil em briquetes de resíduo de algodão diminui a resistência dos mesmos. Vilas Boas (2011), estudando briquetes de diferentes madeiras encontrou valores entre 114 e 139 kgf para a carga máxima de ruptura. Observa-

se que os valores encontrados neste estudo, independente da biomassa algal utilizada, ficaram próximos aos valores tradicionais obtidos para madeira, exceto para os briquetes produzidos com 100% de biomassa algal I.

Cabe salientar, que durante o ensaio de compressão observou-se que os briquetes produzidos com maior percentual de biomassa algal fragmentaram, enquanto os produzidos com maior porcentagem de epicarpo de pinhão manso apenas rachavam, permanecendo com sua estrutura inicial intacta, provavelmente, devido ao percentual de lignina presente no epicarpo, a qual age como aglutinante natural entre as partículas conferindo maior resistência aos briquetes.

As biomassas algais possuem alto teor de cinzas em sua constituição, dessa forma pode-se observar na Figura 4d que a medida que se adiciona biomassa algal aumenta-se o teor de cinzas dos briquetes, sendo que a inclinação da reta é maior para as equações que explicam e estimam os dados dos briquetes compostos pelas biomassas L e P. Isso é devido ao maior percentual de cinzas presente nestas biomassas.

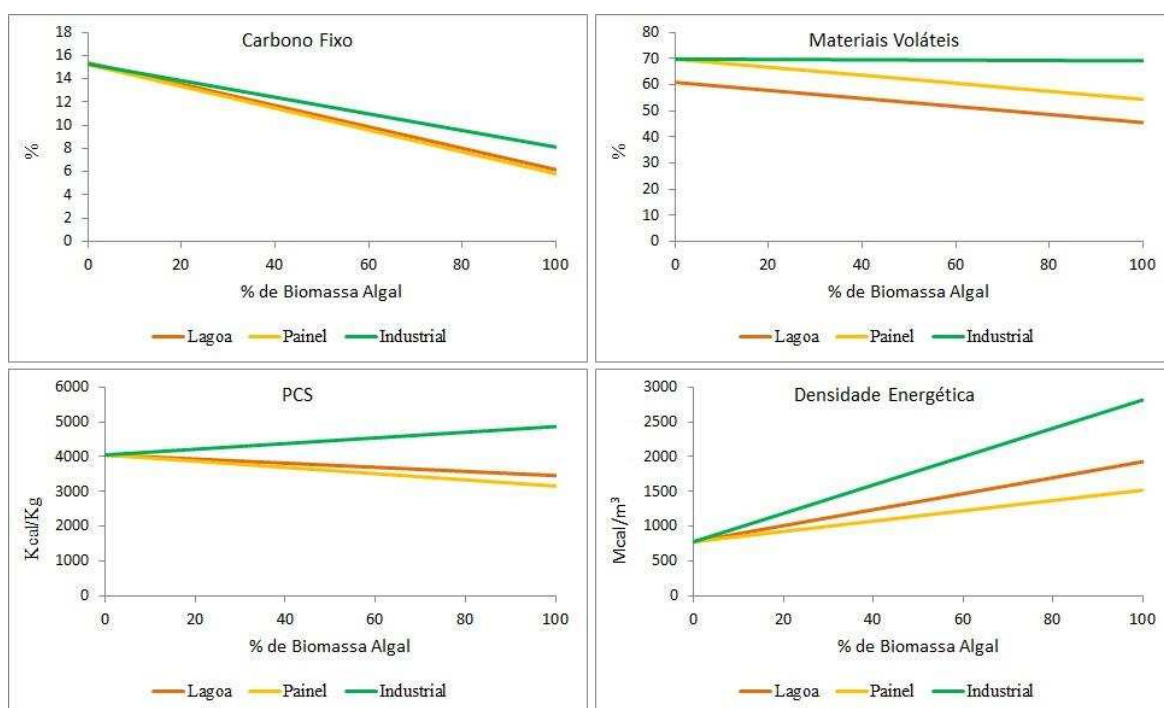


Figura 5. Valores observados e estimados de carbono fixo (%), materiais voláteis (%), poder calorífico superior (kcal/kg) e densidade energética (Mcal/m³) em função do teor de biomassa algal presente nos briquetes.

Observa-se que o aumento da porcentagem de biomassa algal diminuiu os teores de carbono fixo nos briquetes (Figura 5a), conforme o esperado, visto que as biomassas algais possuem baixos teores de carbono fixo em sua constituição. Já para os teores de matérias voláteis observou-se o decréscimo apenas para os briquetes compostos pelas biomassas L e P, uma vez que o teor de voláteis dessas biomassas é de aproximadamente 55%, enquanto que para o epicarpo de pinhão manso esse valor é próximo a 70%. Além disso, durante o processo de compactação, a temperatura utilizada na briquetadeira pode ter ocasionado a degradação térmica ou volatilização de alguns constituintes das matérias primas. Para os briquetes compostos por epicarpo de pinhão manso e a biomassa I, o teor de voláteis permaneceu praticamente constante (Figura 5b), devido a essas biomassas apresentarem valores similares de matérias voláteis.

Para o poder calorífico superior (Figura 5c), observa-se para as biomassas L e P que as retas apresentam declividade negativa, ou seja, o PCS diminui com os incrementos da biomassa algal. Por outro lado, para os briquetes fabricados com a biomassa I, devido ao seu alto poder calorífico, houve aumento no mesmo com a adição desta biomassa algal.

A respeito da densidade energética, pode-se observar pela Figura 5d que todas as curvas obtiveram coeficiente angular positivo, ou seja, houve um aumento da densidade energética com o aumento da porcentagem da biomassa. Isso deve-se a alta densidade das biomassas, superando o baixo poder calorífico das mesmas.

Em geral, pode-se dizer que a adição da biomassa algal apesar de afetar negativamente algumas das características energéticas dos briquetes, como poder calorífico, teor de carbono fixo, voláteis e cinzas, as mesmas produziram briquetes com altos valores de densidade energética, além disso, os mesmos produzidos com maiores teores de biomassa algal apresentaram menor higroscopicidade, alta densidade aparente e satisfatórias cargas máximas de ruptura, características estas fundamentais para a logística e armazenamento dos briquetes.

5.4. Conclusões

- A produção de briquetes compostos por biomassa algal e epicarpo de pinhão manso em escala laboratorial foi tecnicamente viável;
- A adição da biomassa algal, em geral, aumentou a UEH e a densidade aparente, fatores que facilitam e diminuem os custos de armazenamento e transporte;
- A adição da biomassa P ao epicarpo de pinhão manso melhorou a resistência à compressão dos briquetes em escala laboratorial;
- A adição das biomassas L e P nos briquetes aumentaram o teor de cinzas e diminuiu os teores de materiais voláteis, carbono fixo e poder calorífico superior, sendo essas características relevantes no processo de queima direta;
- A adição das biomassas algais, independente da procedência, aumentou a densidade energética dos briquetes;
- Por fim conclui-se que a biomassa algal I, na proporção de 50%, apresentou-se como a melhor matéria prima para produção de briquetes por promoverem o aumento do poder calorífico, teor de materiais voláteis, densidade aparente, densidade energética e por apresentar menores teores de cinzas comparados aos briquetes compostos pelas biomassas L e P.

4.3. Referências Bibliográficas

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: **ASTM D2015**: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal And Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter. Philadelphia, USA, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT **NBR 7993** – Determinação da umidade da madeira por secagem em estufa quando reduzida à secagem. Rio de Janeiro, 1983.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT **NBR 8112** – Análise química imediata do carvão vegetal. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT **NBR 8633** – Carvão vegetal – Determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7190** – Anexo B – Métodos de ensaio para determinação das propriedades das madeiras para projetos de estrutura – resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

AVELAR, N.V. **Potencial dos resíduos sólidos da industrial têxtil para fins energéticos**. 2012. 71f. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2012.

BEN, Balanço Energético Nacional. Empresa de Pesquisa Energética. 2015

BHATTACHARYA, S. C., LEON, M. A., RAHMAN, M. M. A study on improved biomass briquetting. **Energy for sustainable development**, v. 6, n. 2, p. 67-71, 2002.

BRENNAN, L., OWENDE, P. Biofuels from microalgae - a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 14, n. 2, p. 557-577, 2009.

CAIRES, R.R. **Briquetagem – Biomassa**. Campinas. 2010. 8p. Disponível em: {<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA-X4AF/briquetagem-biomassa>}. Acesso em 15/12/15.

FURTADO, T. S., VALIN, M., BRAND, M. A., BELLOTE, A. F. J. Variáveis do processo de briquetagem e qualidade de briquetes de biomassa florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 62, p. 101, 2010.

KALIYAN, K., MOREY, R.V. **Factors affecting strength and durability of densified biomass products**. Biomass & Bioenergy, Oxford, GB v.33, n.3, p.337-359, 2009.

RODRIGUES, V.A.J. **Valorização energética de lodo biológico da indústria de polpa celulósica através da briquetagem**. 2010.134f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal). Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2010.

VILAS BOAS, M. A. **Efeito do tratamento térmico da madeira para a produção de briquetes**. 2011. 65f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2011.

VITAL, B. R. **Métodos de determinação da densidade da madeira**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 1984. 21 p.

6. CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho objetivou avaliar o potencial energético da biomassa algal para a produção de biocombustíveis sólidos. O estudo foi realizado com três biomassas: i) Biomassa produzida em efluente doméstico e coletada diretamente da LAT (L) ii) Biomassa produzida em efluente doméstico em sistema misto lagoa-painéis e coletada dos painéis (P) e iii) biomassa proveniente do tratamento de efluente da indústria de beneficiamento de carnes e coletada diretamente da LAT (I).

Os resultados obtidos no capítulo I, permitiram concluir que dentre as biomassas avaliadas, a biomassa I apresentou características favoráveis para o seu aproveitamento energético, ao contrário das biomassas L e P. Também se pôde concluir que as biomassas L e P não apresentaram diferenças significativas a 95% de probabilidade para a maioria dos parâmetros avaliados, evidenciando que a forma de produção, ao contrário do tipo de efluente, não influi sobre as características intrínsecas das biomassas.

A partir dos resultados obtidos no capítulo II, pôde-se concluir que a produção de briquetes compostos por biomassa algal e epicarpo de pinhão manso em escala laboratorial é tecnicamente viável, pois estes se apresentaram bem estruturados, com compactação adequada e com alta densidade energética. Porém, a adição das biomassas L e P nos briquetes aumentaram o teor de cinzas e diminuiu os teores de materiais voláteis, carbono fixo e poder calorífico superior. Por fim, concluiu-se que a biomassa algal I, na proporção de 50%, apresentou-se como a melhor matéria prima para produção de briquetes por promoverem o aumento do poder calorífico, teor de materiais voláteis, densidade aparente, densidade energética e por apresentar menores teores de cinzas comparados aos briquetes compostos pelas biomassas L e P.

7. RECOMENDAÇÕES

- Sugere-se para futuros estudos utilizando efluente doméstico, a inserção a montante da LAT de uma etapa de tratamento físico para separação do material inerte e/ou a redução do pH posteriormente a colheita para a precipitação dos inorgânicos. A presença destes materiais, conforme observado neste estudo, afeta negativamente o potencial energético da biomassa algal e a, além disso, pode reduzir a penetração de luz na LAT e, por consequência a taxa fotossintética, prejudicando a produtividade da lagoa e o desempenho do tratamento biológico;
- Para uma melhor análise da viabilidade da utilização da biomassa algal para a produção de energia, sugere-se realizar análises das emissões atmosféricas que podem ser geradas durante a combustão das mesmas;
- Por fim, como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se realizar um estudo de viabilidade econômica levando em consideração os custos de colheita e secagem de cada biomassa.