



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA ACADÊMICA
COORDENAÇÃO GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS

Devanchirles Maria da Silva

**REDUÇÃO DA INCRUSTAÇÃO EM FORNOS
INDUSTRIAIS ATRAVÉS DA PRODUÇÃO DE
BRIQUETES COM RESÍDUOS DE BIOMASSA DE
MACRÓFITAS AÉREAS ASSOCIADAS A RESÍDUO
DE GESSO**

Recife

2017

Devanchirles Maria da Silva

**REDUÇÃO DA INCRUSTAÇÃO EM FORNOS
INDUSTRIAIS ATRAVÉS DA PRODUÇÃO DE
BRIQUETES COM RESÍDUOS DE BIOMASSA DE
MACRÓFITAS AÉREAS ASSOCIADAS A RESÍDUO
DE GESSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento em Processos Ambientais Universidade Católica de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em **Desenvolvimento de Processos Ambientais**.

Área de Concentração: Desenvolvimento em Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Biotecnologia e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dra. Leonie Asfora Sarubbo

Co- orientador: Prof. Dr. Valdemir Alexandre Dos Santos

Recife

2017

Silva, D. M.

Aproveitamento de Resíduos de Podas de Macrófitas para Queima Direta, 2016. 67p.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitoria Acadêmica. Curso de Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2016.

1. *Eichhornia crassipes*. 2. Macrófitas. 3. Combustão. 4. Biomassa. 5. Briquetes. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos

**REDUÇÃO DA INCRUSTAÇÃO EM FORNOS INDUSTRIAIS
ATRAVÉS DA PRODUÇÃO DE BRIQUETES COM RESÍDUOS DE
BIOMASSA DE MACRÓFITAS AÉREAS ASSOCIADAS A RESÍDUO
DE GESSO**

DEVANCHIRLES MARIA DA SILVA

Examinadores:

Profa. Dra. Leonie Asfora Sarubbo (Orientadora)
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

Prof. Dr. Francisco Madeiro Bernardino Júnior (Membro Interno)
Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP

Profa. Dra. Raquel Diniz Rufino
(Membro Externo)

Defendida em ____/____/____

Coordenadora: Prof. Dra. Clarissa Daisy Costa Albuquerque

Dedico as meus pais: Tereza Correia da Silva José
Francisco da Silva Irmão e ao meu esposo Joaquim
Alves da Silva (*in memorian*).

AGRADECIMENTOS

A DEUS por estar ao meu lado guiando meus passos nesta caminhada estando presente nos momentos de felicidade e tristeza ao longo da minha vida me mantendo sempre forte para nunca desistir dos meus objetivos.

Aos meus pais José Francisco da Silva Irmão Tereza Correia da Silva e ao meu esposo Joaquim Alves da Silva pelo carinho e atenção paciência e dedicação nesta caminhada.

Aos meus orientadores Prof^a. Dr^a. Leonie Asfora Sarubbo Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos pelo aprendizado e paciência.

À Profa. Dra. Clarissa Daisy, Coordenadora do Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais da UNICAP pelo atendimento prestado.

À 11^a turma do mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais da UNICAP pelo companheirismo e amizades.

A todos os colegas do grupo de pesquisa da Prof^a Dr^a Leonie Asfora Sarubbo e do Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos por compartilharem seus conhecimentos ao longo desta pesquisa.

Ao CNPq, CAPES-PROSUP e FINEP pelo suporte financeiro aos laboratórios do Centro de Ciências e Tecnologia da UNICAP.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Só um sentido de invenção e uma necessidade
intensa de criar levam o homem a revoltar-se, a
descobrir e a descobrir-se com lucidez.

(Pablo Picasso)

RESUMO

Foi avaliado o poder calorífico, da combustão direta de briquetes formados por resíduos da poda de macrófita flutuantes da espécie *Eichhornia crassipes* (aguapé) e resíduos de gesso. Essa mistura é recomendada para se evitar a presença de incrustações nas paredes das fornalhas, reduzindo-se o tempo de parada da mesma para limpeza e manutenção. Associada à sua grande capacidade de proliferação em ambientes aquáticos (rios e lagos), as macrófitas flutuantes da variedade *Eichhornia crassipes*, conhecidas como jacinto d'água ou aguapé, apresentam um grande potencial de produção de energia pela queima direta. Ao mesmo tempo esse tipo de biomassa apresenta restrições ao seu uso como fonte produtora de biogás e, conseqüentemente, biofertilizante. Neste último caso existe um inconveniente que é a fixação por essas macrófitas aquáticas, nos seus tecidos, de metais pesados. Para evitar que uma quantidade considerável da biomassa, a qual não sofre oxidação por falta de homogeneização entre os componentes da combustão, ou já se encontrar oxidada no interior da fornalha, dê origem a incrustações que reduzam a capacidade térmica do equipamento, optou-se pela adição de resíduos de gesso ao material de confecção dos briquetes de aguapé. A análise estatística dos experimentos auxiliou na definição de proporções adequadas da mistura, para reduzir a aderência de materiais indesejáveis nas paredes da fornalha e manter valores consideráveis para o poder calorífico da referida biomassa. Houve um decréscimo no valor do poder calorífico com o aumento do teor de gesso hidratado na composição dos briquetes. O percentual máximo de 4,0 % m/m pode ser utilizado como dosagem de resíduo de gesso hidratado. Neste caso, o briquete de macrófitas pode ser utilizado como combustível sólido com poder calorífico semelhante ao da madeira. O levantamento desses tipos de resíduos na região metropolitana do Recife, junto à prefeitura da Cidade do Recife/PE, mostrou que a disponibilidade dos mesmos pode garantir a produção de calor para atender a empresas de pequeno porte como olarias e padarias, contribuindo para o desenvolvimento de atividades socioambientais dessa capital.

Palavras-chave: Briquete; Incrustações em fornalhas; Combustão direta; *Eichhornia crassipes*; Resíduos de gesso; Poder calorífico.

ABSTRACT

The calorific value of the direct combustion of briquettes formed by floating macrophyte residues of the species *Eichhornia crassipes* (aguapé) and gypsum residues was evaluated. This mixture is recommended to avoid the presence of incrustations in the walls of the furnaces, reducing the stopping time of the furnace for cleaning and maintenance. Associated with its great proliferation capacity in aquatic environments (rivers and lakes), the floating macrophytes of the *Eichhornia crassipes* variety, known as hyacinth or water hyacinth, present a great potential of energy production by direct burning. At the same time, this type of biomass presents restrictions to its use as a producer of biogas and, consequently, biofertilizer. In the latter case there is a drawback which is the fixation by these aquatic macrophytes in their tissues of heavy metals. In order to avoid that a considerable amount of the biomass, which does not undergo oxidation due to lack of homogenization between the components of the combustion, or is already oxidized inside the furnace, causes incrustations that reduce the thermal capacity of the equipment, it was opted for Addition of gypsum residues to the material used to make the aguapé briquettes. Statistical analysis of the experiments assisted in the definition of suitable proportions of the mixture to reduce the adhesion of undesirable materials in the walls of the furnace and to maintain considerable values for the calorific value of said biomass. There was a decrease in the calorific value with the increase of the gypsum content in the composition of the briquettes. The maximum percentage of 4.0% m / m can be used as dosage of gypsum residue. In this case, the briquettes of macrophytes can be used as solid fuel with similar calorific power. The survey of these types of waste in the metropolitan area of Recife, together with the City of Recife / PE, showed that the availability of these Guarantee the production of heat to serve small businesses such as potteries and bakeries, contributing to the development of social and environmental activities of this capital.

Keywords: Briquette; Incrusts in furnaces; Direct combustion; *Eichhornia crassipes*; Gypsum waste; Heat power.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
SUMÁRIO	vi
LISTA DE ILUSTRAÇÃO	vii
RESUMO	ix
ABSTRACT	x
CAPÍTULO I	11
1.1 Introdução	12
1.2 Objetivos	14
1.2.1 Objetivo Geral	14
1.2.2 Objetivos Específicos	14
1.3 Revisões da Literatura	15
1.3.1 Macrófitas Aquáticas	15
1.3.2 Wetlands Construídos	17
1.3.3 Biomassa	18
1.3.4 Presença de Oxalato de Cálcio na Biomassa da <i>Eichhornia crassipes</i>	21
1.3.5 Combustão da Biomassa	22
1.3.6. Combustão Direta da <i>Eichhornia crassipes</i>	24
1.3.7 briquetes	26
1.4 Resíduos de Gesso	27
1.4.1 Decomposição Térmica do Gesso	28
1.4 Referências Bibliográficas	33
CAPÍTULO II	41
Utilização de resíduos de gesso para reduzir a incrustação causada pela queima direta de biomassa vegetal	41
1. Introdução	43
2. Material e Métodos	44

2.1. Macrófitas	44
2.2. Preparação dos Resíduos das Macrófitas	45
2.3. Decomposição Térmica do Gesso Hidratado	45
2.4. Decomposição Térmica do Oxalato de Cálcio	46
2.5. Produção e Queima dos Briquetes	46
Realização dos Experimentos	47
3. Resultados e Discussão	48
4. Conclusão	50
5. Agradecimentos	50
6. Referencias	51
CAPÍTULO III	53
Conclusões Gerais	54
ANEXOS	55

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

CAPÍTULO I

Figura 1: Ilustração das raízes de <i>Eichhornia crassipes</i>	16
Figura 2: Ilustração das folhas de <i>Eichhornia crassipes</i>	17
Figura 3: Macrófita em Wetlands.....	18
Figura 4: Etapas da combustão de uma biomassa	22
Figura-5: Formula estrutural do sulfato de cálcio di-hidratado ou minérgipsita.....	28
Figura-6: Fórmula estrutural do sulfato de cálcio semi-hidratado ou gesso.....	29
Figura 7: Tempo de reidratação de um gesso anidro.....	31
Figura-8: Temperatura em função da energia necessária á desidratação térmica do minério gipsita.....	32

CAPÍTULO II

Figura 1: Jacinto de água flutuante <i>Eichhornia crassipes</i>	45
--	-----------

Figura 2: Determinação da umidade de briquetes produzidos a partir de resíduos da poda de macrófitas e resíduos de gesso hidratado.....	47
Figura 3: Realização de experimentos da queima de briquetes com auxílio de um mini maçarico para identificação visual de níveis de incrustações em função do teor de resíduos de gesso hidratado.....	48
Figura 4: Poder calorífico dos briquetes de resíduos da poda de macrófitas (<i>Eichhornia crassipes</i>) em função do teor de resíduos de gesso hidratado.....	49
Figura 5: Teor de incrustação produzido pelos briquetes em função do percentual de gesso hidratado.....	50

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUÇÃO

Biomassa é toda matéria orgânica não fóssil, de origem animal, vegetal que pode ser utilizada na produção de calor, seja para uso térmico industrial, seja para geração de eletricidade. Podem ocorrer nas formas sólida (carvão vegetal, briquetes), líquida (etanol, biodiesel) e gasosa (biogás) (TONIN, 2014). É esperado um aumento do número de pessoas que dependem de combustíveis de biomassa, cerca de 2,7 bilhões em 2030, devido ao crescimento da população mundial (JITTABUT, 2015).

Conversão termoquímica é o aquecimento e/ou oxidação controlada da biomassa, a partir de várias vias para produzirem energia. As tecnologias de conversão termoquímica são classificadas pela sua taxa de oxidação ambiente, tamanho da partícula e aquecimento associado num ambiente endotérmico para uma oxidação exotérmica completa (TANGER et al., 2013).

As tecnologias de aproveitamento do potencial da biomassa sólida passam essencialmente pela queima em centrais térmicas, com tecnologias como: de grelha fixa, móvel ou inclinada e de leito fluidizado (Liquefação), ou centrais de cogeração para a produção de energia elétrica e de água quente, ou ainda a queima direta (Combustão) em lareiras (lenha) para a produção direta de calor Portal Energias /Energias Renováveis (PEER,2016). Conversão termoquímica é o aquecimento e/ou oxidação da biomassa controlada, a partir de várias vias para produzirem energia. A biomassa da macrófita flutuante *Eichhornia crassipes* (jacinto d'água ou aguapé) tem diferentes fins desde a alimentação de peixes e de animais (caprinos, bovinos), compostagem e adubação, tratamento de águas residuais, produção de papel e geração de energia térmica, devido a sua alta produtividade de biomassa. Segundo Santos (2013), essa biomassa pode ser convertida em combustíveis sólidos, líquidos e gasosos. A termoconversão de sua biomassa com 15 % de umidade a 400 °C produziu em torno de 45 % de biocarvão, 25% de biogás, 12% de bio-óleo com alto poder calorífico e 23 % de água. A composição de seu bio-óleo apresentou alcanos 26%, derivados aromáticos 13%, nitro compostos 24%, derivados fenólicos 27% e outros compostos 10% através do processo de pirólise mostrou-se uma alternativa para obtenção de combustíveis de segunda geração.

A combustão direta de macrófita é utilizada em diversos países. Em Bengali os resíduos da poda de jacinto d'água são utilizados como biocombustível, após serem recolhidos, empilhado; para secar no início da estação fria (DUKE, 1983). A

queima direta é utilizada em pequena escala em determinadas partes do mundo. Devido ao alto teor de umidade, cerca de 90% a 95 %, necessitando de uma secagem eficiente para reduzir esse teor e um local amplo para a biomassa secar (ABDELHMID; GABR, 1991).

A *Eichhornia crassipes* é um grande problema nos lagos e rios do Recife, em 2015 a Empresa de Limpeza Urbana (EMLURB) realizou uma operação de limpeza, no açude de Apipucos que está localizado no bairro de Casa Forte na zona norte do Recife e possui uma lâmina d'água formada de 15,8 hectares neste período a lâmina foi quase totalmente coberta pelo vegetal. Devido à alta densidade de vegetais foi necessário o uso de uma retroescavadeira para realizar a limpeza, a operação iniciou em maio, com prazo estipulado de 60 dias para sua finalização, mas devido ao grande número de vegetais foi estendida por mais 20 dias sendo retiradas 1,2 toneladas. Atualmente a manutenção é realizada manualmente por garris que recolhem aproximadamente 8,0 toneladas da planta diariamente totalizando aproximadamente 240,0 toneladas mensalmente que são recolhidas e direcionadas ao aterro sanitário (EMLURB 2016).

Na combustão da biomassa da macrófita ocorre a liberação do oxalato de cálcio que pode acarretar incrustações na parede da câmara de combustão, causando danos ao equipamento (D'AGUAL; PEREIRA e MARINHO, 2015) e requerendo um maior número de homens-hora durante as paradas para manutenção. A presença de contaminantes como cádmium, fósforo e potássio pode contribuir para a presença desse oxalato nas macrófita aquáticas (RUBIO, VALERIO e FERRUFINO, 2015). Portanto, faz-se necessário a elaboração de mecanismos reacionais que impeçam a formação dessas incrustações, para que essa matéria-prima abundantemente disponível e de baixo custo seja aproveitada em pequenas empresas ou em empresas de médio e grande porte durante operações de aquecimento de fornalhas de alguns processos térmicos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma tecnologia, para reduzir a formação de incrustação nas paredes externas das fornalhas durante a queima direta dos resíduos de poda de macrófitas (*Eichhornia crassipes*), utilizados como combustíveis sólidos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Definir condições de secagem para resíduos de poda das macrófitas.
- Realizar um planejamento experimental para testar a adição de resíduos de gesso em briquetes de macrófitas flutuantes.
- Aplicar a metodologia de superfície de resposta (MSR) para determinação de condições adequadas de queima para os briquetes de macrófita fluentes contendo resíduos de gesso.
- Obter um modelo de previsão para o poder calorífico dos briquetes contendo resíduos de gesso.

1.3 REVISÃO DA LITERATURA

Macrófitas Aquáticas

As macrófitas (*macro = grande, fita = planta*) aquáticas são vegetais terrestres que ao longo de seu processo evolutivo se adaptaram ao ambiente aquático e por isso apresentam algumas características de vegetais terrestres e grande capacidade de adaptação a variados ambientes. Habitam desde brejos até ambientes totalmente submersos, isto é, debaixo d'água. Como exemplo de gêneros destas plantas tem-se *Typha*, *Scirpus*, *Phragmites*, *Nymphaea*, *Nuphar*, *Lemna*, *Potamogeton*, *Hydricotyle*, *Spirodela* e *Eichhornia* sendo este último o mais citado na bibliografia no que se refere à construção de *wetlands*, em especial a espécie *Eichhornia crassipes* (PEDROSO, 2010).

De acordo com (CASTRO et al.,2011) o aguapé (*Eichhornia crassipes*) é uma macrófita aquática pertencente à família *Pontederiaceae*. É nativa da Amazônia, porém encontra-se em todo o mundo, possuindo intensa capacidade de crescimento em diferentes regiões. Devido a esta intensa reprodução, os aguapés rapidamente atingem uma grande densidade em corpos d'água provocando problemas como obstruções na via fluvial e o aparecimento de insetos. Uma das características anatômicas mais importantes das raízes de plantas aquáticas é a proporção de aerênquima; E o aerênquima da raiz pode aumentar em plantas tolerantes ao estresse (PEREIRA et al.,2014).

A aguapé é uma macrófita de pequeno porte composta por inflorescências de coloração lilás que acarretam à planta uma aplicação ornamental. Sua reprodução é dada pela propagação vegetativa com a formação de estalões na base do pecíolo foliares esponjosos que por sua vez são como bolsas de ar que mantém a aguapé sobre a lâmina d'água, a caracterizando como uma macrófita flutuante. Seu crescimento é rápido, podendo tornar-se um problema ambiental, por isso e comumente chamada de planta daninha ou invasora. Possui raízes submersas (formando um sistema radicular) longas e finas que atuam como um filtro absorvendo os nutrientes e outros elementos encontrados na água, mesmo que

estes se encontrem em quantidades elevadas, ou seja, considerados poluentes como, por exemplo, metais pesados e óleos (Figura 01).

Essa capacidade de as macrófitas capturarem e conseqüentemente removerem nutrientes e poluentes de corpos d'água pode ser explicada através de seu caráter biossorvente, pois as substâncias consideradas tóxicas são assimiladas e incorporadas à biomassa.

Além da remoção direta pela absorção das raízes, há outros processos químicos e biológicos como a liberação de oxigênio na zona radicular que cria condições de oxidação no meio, estimulando a degradação aeróbia do poluente, o crescimento de bactérias nitrificantes e a inativação de compostos que seriam tóxicos às raízes das plantas. Para uma melhor compreensão desta distribuição de oxigênio, tem-se que em média para cada cinco moléculas de oxigênio destinadas à respiração das raízes das plantas, apenas uma é disponibilizada para a rizosfera, assumindo-se que todo o gás carbônico respiratório é solubilizado na água, ao redor das raízes as plantas aquáticas apresentam uma elevada área superficial, conferindo-lhe um grande potencial para acumular solutos. Essa grande área superficial é decorrente da necessidade de remover nutrientes e água, que são essenciais ao seu desenvolvimento. As raízes, normalmente, são o principal órgão da planta responsável no processo; conseqüentemente, é onde se localizam as maiores concentrações de metais pesados e outros tóxicos. Porém, as folhas também estão em contato direto com a solução, podendo remover poluentes tanto quanto as raízes (Figura 02).

Figura 1- Ilustração das raízes de *Eichhornia crassipes*



Fonte: NASCIMENTO, Acervo pessoal (2014).

Figura 2-Ilustração das folhas de *Eichhornia crassipes*.



Fonte:Nascimento,Acervo pessoal (2014).

A macrófita possui na epiderme uma camada de células retangulares que permite absorver nutrientes e gases diretamente da água. Em sua anatomia as câmaras de ar e as passagens de gás nos rizomas, folhas e raízes possibilitam a flutuação da espécie (BRONZATO, 2016).

1.3.2 Wetlands Construídos

São denominadas de *wetlands* (em português, áreas alagadas) as regiões inundadas ou saturadas por água advinda de fontes superficiais e/ou subterrâneas. Estas inundações favorecem o surgimento de vegetações adaptadas às características do local. De acordo com (CALIJURI; CUNHA, 2013), diversas funções ecológicas são atribuídas aos *wetlands*, entre elas:

- a) ciclagem de nutrientes: as áreas alagadas atuam como fontes ou sumidouros de nutrientes por meio de processos como mineralização e decomposição de formas de carbono, enxofre, nitrogênio e fósforo;
- b) produção primária: ocorre a síntese de matéria orgânica por meio da fotossíntese ou quimiossíntese;

- c) manutenção de biodiversidade: *wetlands* constituem refúgio, habitat e local de reprodução de espécies da flora e da fauna;
- d) regulação climática: as áreas alagadas são componentes importantes do ciclo hidrológico e contribuem para o fluxo de água entre os diferentes compartimentos da hidrosfera e atmosfera, o que influencia diretamente o clima;
- e) controle do fluxo hidrológico: as áreas alagadas regulam a recarga e descarga de aquíferos, além de contribuir para a retenção de sedimentos, o armazenamento de água e o controle de enchentes nas bacias hidrográficas.

Os *wetlands* construídos são equipamentos utilizados no tratamento de efluentes domésticos, agrícolas e industriais, que reproduzem operação semelhante ocorrida nas áreas alagadas naturais, com ajustes que permitem sua otimização. Estas alterações tornam possível realizar a recuperação de águas residuárias através de reações como oxirredução, precipitação, dissolução, complexação e assimilação biológica que irão reduzir a carga poluidora do efluente e contribuir para a melhoria da qualidade da água (PERBANGKHEM; POLPRASERT, 2010). Portanto, *wetlands* construídos são ecossistemas artificiais com diferentes níveis de tecnologia que procuram atingir as mesmas funções ecossistêmicas básicas de *wetlands* naturais (GRULL, 2013). A utilização de *wetlands* construídos teve início no século 20 em países da Europa e nos Estados Unidos, se apresentando como uma alternativa aos tradicionais sistemas de tratamento. Na Alemanha, no início da década de 50, vários estudos sobre as propriedades dos *wetlands* construídos foram realizados no Instituto Max Plank. Estas pesquisas incluíram diversos testes com diferentes tipos de águas residuais, incluindo efluentes contaminados com fenóis e provenientes de processos agrícolas.

Wetlands são constituídos por um leito geralmente impermeabilizado (impedindo uma possível infiltração no solo) preenchido por água. De acordo com FOGLER (2009) sua operação se assemelha a de um reator do tipo pistão (PFR - *Plug Flow Reactor*) tendo em vista que o efluente entra em uma das extremidades do *wetland* construídos, realizando o percurso com escoamento laminar (velocidade baixa) sem mistura das fases, até a saída localizada na outra extremidade do tanque de forma que todas as partículas percorram o mesmo trajeto do início ao fim. Os *wetlands* de macrófitas aéreas (Figura 03) proporcionam, através de processos físicos, químicos e biológicos a remoção de diversos poluentes. As macrófitas aquáticas utilizadas nos sistemas *wetland* construídos podem ser de dois tipos:

emergentes e flutuantes. A escolha deve seguir alguns critérios: fácil propagação e rápido crescimento, alta capacidade de absorção de poluente, tolerância a ambientes eutrofizados e saturados com água e/ou esgoto, fácil colheita (SEZERINO et al.,2015).

Figura 3- Macrófita em Wetlands



Fonte: NASCIMENTO, Acervo pessoal (2014).

1.3.3 Biomassa

Biomassa é a forma de produção de energia mais antiga, utilizada pela humanidade sendo definida como toda matéria orgânica (vegetal ou animal) que pode ser utilizada na produção de energia (SANTOS,2013). O termo biomassa lignocelulósica é usado para descrever os principais componentes da biomassa vegetal que são lignina, celulose e hemicelulose estes percentuais variam de acordo com a idade desenvolvimento vegetais (LIMA,2014).

A matéria-prima da biomassa pode ser geralmente classificada em dois grupos. O primeiro grupo inclui grãos de milho, cana de açúcar, soja, sementes oleaginosas. O segundo grupo de biomassa, a biomassa celulósica (resíduos florestais, plantas aquáticas), pode evitar impactos adversos sobre a oferta de alimentos, porque eles não são amido comestível (GHOSH, 2016).

A biomassa líquida é constituída por compostos oxigenados Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO, 2012). Seu processo de conversão mais usual é a pirólise rápida a partir de diversos produtos como: resíduos florestais, resíduos de indústria da madeira, bagaço de cana-de-açúcar, cascas de cereais e

plantas aquáticas. Segundo SANTOS (2013), a biomassa líquida pode ser convertida via transesterificação, onde ocorre a conversão do bio-óleo, obtida após prensagem da biomassa e extração por solvente, reagindo com álcool (metanol ou etanol) em presença de um catalisador (NaOH ou KOH), convertendo-se em glicerina e ésteres (biodiesel). Por fermentação ocorre via ação biológica, onde a glicose é convertida em álcoois pela ação de microrganismos, produzindo etanol.

Para a biomassa gasosa o caminho tradicional é a produção de biogás. Neste caso, consiste na digestão anaeróbica de amido, principalmente a partir de culturas energéticas (COTANA et al.,2015). Segundo ainda Cotana e colaboradores (2015), a adaptação e utilização de plantas para a produção de biogás é proposta, a fim de reduzir a concorrência com as culturas alimentares e aumentar a sustentabilidade de toda a cadeia, em termos de consumo de terra e água.

A composição química elementar correspondente à massa sólida seca e composta de carbono, hidrogênio e enxofre PROTÁSIO (2014). A composição química molecular corresponde ao percentual em massa seca das biomoléculas que são principalmente de celulose, hemicelulose e lignina. Segundo ainda o referido autor a composição química imediata refere-se aos teores de carbono fixo, materiais voláteis e cinzas e estes são obtidos por um ensaio denominado análise química imediata. De acordo com a composição química da biomassa, há técnicas específicas para remover a lignina, obter o monômero de glicose e, conseqüentemente, sintetizar um biocombustível. Informações estruturais e o método de conversão térmica são obtidos a partir de técnicas como, Análise Termogravimétrica (TGA) e Infravermelho (IV), obtendo-se informações sobre a decomposição térmica, mecanismos de reação e produtos formados no processo de combustão (GAO et al.,2013).

A biomassa sólida é um recurso abundante que pode ser produzido em agricultura, silvicultura e sistemas aquáticos. A estrutura básica da parede celular vegetal é composta por três polímeros orgânicos: celulose, hemicelulose e lignina (MASON et al.,2013). Tem como fonte os produtos da agricultura, incluindo substâncias vegetais e animais, os resíduos da floresta, resíduos de indústrias e a parte biodegradável dos resíduos industriais e urbanos Ministério de Minas e Energia (MME, 2015). A utilização de resíduos sólidos como fonte de energia, através de seu adensamento, compactação ou aglomeração (briquetes) proporciona uma série de vantagens, quando comparada a sua utilização em estado natural,

principalmente no tocante ao armazenamento, manuseio e aumento de densidade e poder calorífico (TAVARES; SANTOS, 2013).

1.3.4 Presença de oxalato de cálcio na Biomassa da *Eichhornia crassipes*

Em amostragens realizadas anualmente na Flórida, na *Eichhornia crassipes* foram encontradas concentrações de oxalatos variando cerca de 0,2 a 0,6 % (méd. 0,4%) BAGNALL et al., (1973). Os principais tipos de cristal de oxalato de cálcio que ocorrem em monocotiledôneas são os : ráfides, estilóides e drusas, a presença de estilóides é, portanto, um caráter sinapomórfico para algumas famílias (e.g. Iridaceae) ou grupos de famílias (por exemplo Philydraceae, Pontederiaceae e Haemodoraceae).

Os cristais de oxalato de cálcio podem aparecer nos vegetais de duas formas: monohidratado ou dihidratado. O tipo de cristal presente na *Eichhornia crassipes* é o estilóide, chamado de cristal prismático ou pseudo-ráfide, são mais espessos do que ráfides e geralmente solitários em uma célula. Os estilóides podem ter extremidades pontiagudas, ou quadradas e pode ser alongada ou cuboidal. Alguns estilóides são cristais geminados (PRYCHID; RUDALL 1999).

A *Eichhornia crassipes* desenvolve em áreas poluídas por possuir o mecanismo de hiperacumulação, a capacidade de acumular de mais que 1.000 µg Ni g⁻¹ em massa seca de suas partes aéreas. Os cristais de oxalato de cálcio são acumulados nas raízes, rizoma, pecíolos e folhas. A presença dos cristais pode ser considerada uma forma de tolerância aos metais Cd, Pb, e Sr estes metais podem ser complexados nos cristais. Os Cristais de oxalato de cálcio e compostos fenólicos foram reportados como uma forma de mitigar a toxicidade de metais em plantas, incluindo macrófitas flutuantes PINTO (2008). Na *Eichhornia crassipes* os cristais de oxalato de cálcio são inclusões e estão associados com a formação dos aeríferos, a presença dos cristais de oxalato de cálcio na *Eichhornia crassipes* pode estar relacionada com o acúmulo de oxalato de cálcio (RUBIO et al., 2015).

O jacinto de água contém cristais afiados de oxalato de cálcio que causam irritação na boca dos animais e são responsáveis pela baixa palatibilidade em várias espécies de animais. Os níveis das agulhas de oxalato de cálcio são muito baixos de 0,8 a 1,2 % de matéria seca HEUZÉ et al., (2015). A elevada percentagem de cinzas,

sílica e a presença de oxalato na biomassa da macrófita ocasiona incrustações nas paredes de fornos e caldeiras, por isto o briquete fabricado com o material e indicado apenas para fornos rudimentares (TAVARES;SANTOS 2013).

1.3.5 Combustão da Biomassa

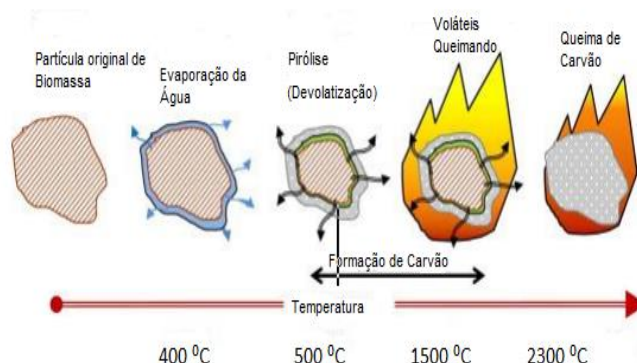
Conversão termoquímica é o aquecimento e/ou oxidação controlada de uma biomassa sólida, a partir de várias vias para produzirem energia. As tecnologias de conversão termoquímica são classificadas pela sua taxa de oxidação ambiente, tamanho da partícula e aquecimento associado num ambiente endotérmico para em seguida produzir uma oxidação exotérmica completa da biomassa (TANGER et al.,2013).

As tecnologias de aproveitamento do potencial da biomassa sólida passam essencialmente pela queima em centrais térmicas, com tecnologias como: de grelha fixa, móvel ou inclinada e de leito fluidizado (liquefação), ou centrais de cogeração para a produção de energia elétrica e de água quente, ou ainda a queima direta (combustão) em lareiras (lenha) para a produção direta de calor (PEER, 2016).

A combustão direta de biomassa é a via de bioenergia dominante no mundo e envolve a produção de calor, como resultado da oxidação da biomassa rica em carbono e hidrogênio convertendo-os em CO₂ e H₂O (TANGER et al.,2013). Entretanto, a cinética química detalhada possui reações de combustão que são complexas. Conforme o Instituto Superior de Agronomia (ISA, 2016) as etapas da Combustão da biomassa em sequência são: aquecimento e secagem, pirólise e/ou volatilização e combustão do resíduo Carbonoso (Char burning).

Segundo PEER (2016) definem-se as etapas sequenciais: aquecimento, secagem, decomposição ou pirólise, gaseificação do combustível sem água, gaseificação do carbono sólido e oxidação dos gases combustíveis

Figura 4 - Etapas da combustão de uma biomassa



Fonte: INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA (2016)

O aquecimento é a primeira etapa, iniciando a uma temperatura de aproximadamente 100°C e ocorre na alimentação dos sistemas de combustão. Os combustíveis sólidos estão normalmente à temperatura ambiente, sendo necessário um aquecimento.

Secagem é a segunda etapa em sequência, iniciando-se entre (100°C e 150°C). Começa com a vaporização da água existente no combustível. É um processo endotérmico e depende de vários parâmetros de transferência de calor. A etapa de secagem começa quando a pressão de saturação da água à temperatura da superfície da partícula for maior que a pressão parcial da água no reservatório e termina quando a partícula esteja completamente seca (CEREJEIRO, 2014).

Na decomposição ou pirólise (150°C e 230°C) os componentes de cadeias longas dos biocombustíveis sólidos são quebrados em cadeias curtas, surgindo os gases e compostos líquidos de alcatrão, como monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos gasosos. Não é necessário o oxigênio nesta etapa. De acordo com KIM (2015) denomina-se pirólise rápida a decomposição térmica de compostos orgânicos, na ausência de oxigênio. A distribuição de produtos depende da composição da biomassa e outras condições de reação, incluindo o tempo de permanência, temperatura e outras.

Os processos citados anteriormente são endotérmicos. Sendo atingido o ponto da inflamação (230°C) iniciam-se as reações exotérmicas com a entrada de oxigênio. A superfície exterior da partícula sólida pode ser inflamada a cerca de 300°C e a partir dos 400°C , ocorre à combustão espontânea (PEER, 2016).

A gaseificação do combustível sem água (230°C e 500°C). Nesta etapa a decomposição térmica do combustível sem água, tem influência direta do oxigênio, o ponto de inflamação inicia-se aos 230°C nesta fase da gaseificação ocorre o início do surgimento da chama. Está ocorrendo oxidação em fase gasosa havendo neste momento a degradação secundária de alcatrões, gases de combustão e seus voláteis. (TANGER et al.,2013).

A gaseificação do carbono sólido (500°C e 700°C) ocorre sob a influência do dióxido de carbono (CO_2), vapor de água existente e oxigênio (O_2), produzindo o monóxido de carbono combustível. A gaseificação do carbono sólido é exotérmica liberando luz e calor, que forma a chama visível. O gás combustível liberado a partir da biomassa explode em uma difusão de chama amarelo-alaranjado após ocorrer à mistura com o ar (BJORNSSON, 2014).

Na oxidação dos gases combustíveis (700°C e 1.400°C) os gases resultantes das etapas anteriores são oxidados, e representam o fim da reação de combustão para os combustíveis sólidos. Sob a influência do ar secundário é efetuada a combustão completa limpa da mistura de gases. Quando a queima do carbono não ocorre completamente, este se transforma em CO queimando juntamente como os voláteis, ocorrendo apenas cinco etapas e sendo gerada uma combustão incompleta (TONIN 2014).

A combustão completa ou direta ocorre na presença de oxigênio em excesso. A combustão incompleta ou indireta ocorre na presença controlada de O_2 . Os produtos resultantes da queima completa são os óxidos de nitrogênio (NO_x) e monóxido de carbono (CO), carbono (C), hidrocarbonetos e compostos de alcatrão (C_mH_n) e partículas não queimadas. O resultante da queima incompleta é o monóxido de carbono (CO). Esses poluentes podem variar de acordo com a origem da biomassa, sua composição química elementar e imediata (MASON et al.,2014).

O comburente é o ar necessário para a queima do combustível. A quantidade do ar para que ocorra a queima é baseada na composição do combustível (ISA 2016):

Oxigênio Teórico – número de mols de O_2 necessário, para queimar todo o combustível admitindo uma queima completa.

Ar Teórico – Quantidade de ar que contém o oxigênio teórico.

Excesso de Ar - Quantidade de ar que contém o oxigênio.

1.3.6 Combustão Direta da *Eichhornia crassipes*

Segundo Santos (2013), a biomassa da macrofita aquática *Eichhornia crassipes* pode ser convertida em combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, a termoconversão dessa biomassa, foi realizada com 15 % de umidade, a 400 °C em torno de 45 % de biocarvão, 25% de biogás, 12% de bio-óleo com alto poder calorífico. A composição de seu bio-óleo apresentou 26 % de alcanos, 13 % de derivados aromáticos, 24 % de nitro-compostos 27 % de derivados fenólicos e 10 % de outros compostos.

A biomassa é viável apenas se haver um tratamento, portanto, vale a pena somente se o teor de água for reduzido para 10-15% (GUNNARSSON; PETERSEN, 2007). Sendo assim, é necessário um tratamento prévio antes da queima, pois a secagem ao sol não é eficiente e pode interferir diretamente na eficiência da combustão, sendo necessária mais energia para a secagem antes da ignição (LIMA, 2014). Conforme ainda Lima (2014) os resultados de testes mostraram que o material desidratado a 65% em base úmida deve sustentar a combustão da *Eichhornia crassipes*. Mas a agitação do material, durante a combustão, seria necessária. Usando um queimador de óleo combustível e uma retorta, uma quantidade maior de material com maior umidade tem sido incinerada Organização das Nações Unidas para Alimentação e a Agricultura (FAO, 2011) mostrou que se o material colhido for reduzido a cinzas, em seguida, o transporte e a descarga seriam reduzidos ao mínimo.

Para (D'ÁGUA, PEREIRA e MARINHO, 2015) a biomassa da macrófita é viável para a confecção de briquetes e sua posterior utilização como combustível sólido. Os referidos autores observaram que para formação dos briquetes não foi necessário aquecimento e ligantes. A biomassa apresenta um teor de umidade necessária em relação a outros materiais. Dessa forma, o alto rendimento de matéria verde, sua periodicidade e abundância, superam outras biomassas utilizadas comercialmente, mostrando ser uma alternativa energética viável para países ibero-americanos. Os referidos autores encontraram para a espécie *Eichhornia crassipes* um poder calorífico inferior (PCI) de 15,52 MJ/kg. Esse valor está de acordo com MUNJERI et al., (2016), o qual encontrou um valor de 14,5 MJ/kg. Ainda segundo MUNJERI e colaboradores (2016) o briquete confeccionado com a biomassa do aguapé teve em média 7,8% de água, teor de cinzas de 12,4%, teor de matéria

volátil 65,7% e carbono fixo de 21,9%. Dessa forma, o poder de combustão dessas macrófitas assemelha-se ao da madeira, apresentando vantagens de não causar desmatamento e não ser um material alimentício.

A matéria seca da macrófitas é equivalente à matéria seca de outras espécies em termos de energia. Uma tonelada de matéria seca é aproximadamente equivalente a 2,4 a 3 barris de petróleo. A secagem e queima direta é usado em pequena escala no mundo, pois a biomassa possui alto teor de água, cerca de 90%. Quando o nível de umidade é reduzido para 10%, a densidade de energia não é mais de (1,3 GJ/m³). Isto pode ser comparado com 9,8 GJ/m³ de lenha e não faz o jacinto d'água ser indicado para combustão direta.

A combustão da macrófitas segue as etapas de secagem, aquecimento, decomposição ou pirólise na fase endotérmica a gaseificação do carbono sólido, oxidação dos gases combustíveis na fase exotérmica seguindo os parâmetros para combustão de uma biomassa lignocelulósica. Normalmente a combustão direta é realizada em fogões, (cocção) geração de vapor e fornos na metalurgia PEER (2016).

As cinzas ou resíduo mineral são formados após o processo de combustão. Suas emissões devem obedecer a critérios da Resolução de número 436, do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA (2011). Essa resolução define limites para emissão na atmosfera. Para SANTOS (2014), o teor de cinzas encontrado em *Eichhornia crassipes*, em relação ao material seco, foi de 19,2 %, estando de acordo com a literatura. Ainda segundo o mesmo autor os teores de cinzas e seus componentes inorgânicos, são importantes catalisam a formação de carbono durante a pirólise.

Estes resultados podem variar de acordo com a coleta e as condições de processamento. Os sistemas de combustão modernos possuem uma via separadora do ar primário e secundário, e uma zona de combustão suficientemente grande, criam as condições certas para a existência de baixas e controladas emissões de cinzas TONIN (2014).

1.3.7. Briquetes

Em 1848 o norte-americano William Easby patenteou, nos Estados Unidos um método de conversão de carvão miúdo em torrões sólidos, através de pressão, transformando um material sem valor em um combustível para mover navios a vapor

e fornos para preparação de alimentos. A palavra briquete surgiu em Paris em meados de 1862, designando uma mistura de turfa, água e argila plástica; a briquetagem foi desenvolvida e adotada por companhia automobilística da época como a Ford Motor Company.

O mercado de combustíveis sólidos passou a despertar interesse mundial após a crise do petróleo em 1973 e a decisão de países Europeus de reduzir o uso de combustíveis fósseis, para reduzir as emissões de gases causadores do efeito estufa os (GEE) entre estes o CO₂ TAVARES (2013). Os briquetes produzem CO₂ como a lenha e outras fontes de energia entretanto otimizam o uso de diversos resíduos que em seu processo de decomposição iriam produzir gás carbônico Fundação Verde (FUNVERDE, 2013). No Brasil o potencial para exploração da biomassa provém da atividade sucroenergética, e agroindustrial (culturas e resíduos de culturas agrícolas, efluentes domésticos e de instalações de agropecuária,) efluentes e resíduos de indústrias (agroalimentares, florestal, silvicultura e industrial) produtos e subprodutos da floresta e resíduos da indústria da madeira OLIVEIRA (2017).

A heterogeneidade, necessidade de armazenamento do produto em local coberto, dificuldades de coleta de resíduos em locais, elevado custo do frete, disponibilidade de resíduos suficientes para briquetagem, falta de acesso a tecnologias modernas de aproveitamento da biomassa, carência de lei, normas e estatísticas e apoio governamental são algumas barreiras para intensificação de uso dos briquetes no Brasil BAUER (2015).

Os briquetes confeccionados com a biomassa da *Eichhornia crassipes* são uma boa fonte para geração de combustível sólido, suporta combustão possuem alta resistência do material como um combustível de alto valor, que os qualificam como alternativa à lenha e carvão para energia doméstica e industrial. Estes briquetes produzidos com a biomassa do jacinto de água são ambientalmente amigáveis, reduzem a desertificação e suas implicações ambientais, reduzindo ainda o risco para a saúde associado ao uso da lenha e carvão vegetal (DAVIES, R; DAVIES, O; MOHAMMED, 2013).

1.4 Resíduos de Gesso

A Resolução do Conama n^o 307, de 5 de julho 2002 estabelece as diretrizes e os critérios e procedimentos a serem adotados por municípios e envolvidos para

reduzir os impactos ambientais. Teve seu art. 3º alterado pela Resolução do Conama nº 469, de 29 de julho de 2015, onde o gesso é classificado na classe B sendo considerado resíduo reciclável para outra destinação CONAMA (2015). O programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos de Construção e Demolição (PMGRCD) e diretrizes para pequenos geradores e transportadores, e Projetos de Gerenciamento de Resíduos de Construção e Demolição (PGRCD) destinado aos grandes geradores de resíduos público e privados (TESSARO, AS, SCREMIN 2012).

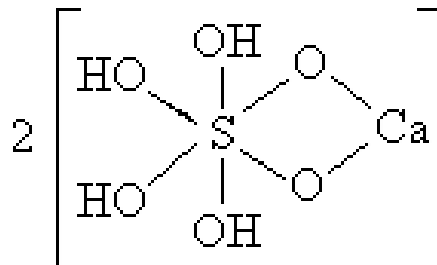
Segundo a resolução nº 431 do (CONAMA 2011) Conselho Nacional do Meio Ambiente são resíduos recicláveis para outras destinações os plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeira e gesso são inseridos na classificação B, na classe C são inseridos os resíduos que não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação.

Depois de sua separação de outros resíduos da construção os resíduos de gesso readquirem as características químicas de gipsita, seu material de origem pode ser utilizado na cadeia produtiva, o seu reaproveitamento pode ser: pela indústria cimenteira, onde atua como retardante de pega do cimento, setor agrícola como corretivo para acidez de solos melhorando suas propriedades físicas e químicas, indústria de transformação do gesso, que reincorpora seus resíduos em seus processos de produção Ministério de Minas e Energia (MMA 2009).

1.4.1 Decomposição Térmica do Gesso

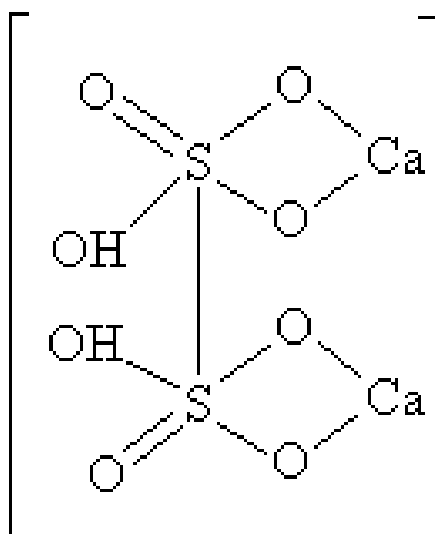
O gesso é um mineral aglomerante produzido a partir da desidratação térmica do minério gipsita (Figura 5), este último abundante na natureza. É composto principalmente por sulfato de cálcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) e pelo semi-hidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) obtido pela calcinação deste (Figura 6). É encontrado em praticamente no mundo todo, e ocorre no Brasil em terrenos cretáceos de formação marinha, principalmente no Maranhão, no Ceará, no Rio Grande do Norte, no Piauí e em Pernambuco. Sua cor geralmente é branca, mas impurezas podem conferir a ele tons acinzentados, amarelados, rosados ou marrons (PERES; BENACHOUR e SANTOS, 2008).

Figura 5- Fórmula estrutural do sulfato de cálcio di-hidratado ou minério gipsita



Fonte: MOISET (1997)

Figura 6- Fórmula estrutural do sulfato de cálcio semi-hidratado ou gesso

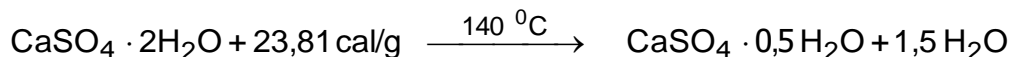


Fonte: MOISET (1997)

Quando se aquece o minério gipsita, de 20 °C a 1400 °C tem-se a oportunidade de distinguir cinco fases do sulfato de cálcio:

- 1 - Na temperatura ambiente o minério é essencialmente sulfato de cálcio semi-hidratado.
- 2 - Ao se alcançar 60 °C, conforme as condições experimentais de desidratação iniciam-se a perda pela gipsita de moléculas de água, onde pode variar de 0 a 2. É possível, entretanto, admitir a existência de mais de um tipo de semi-hidrato, dependendo da temperatura e pressão do processo, com teor de água que varia

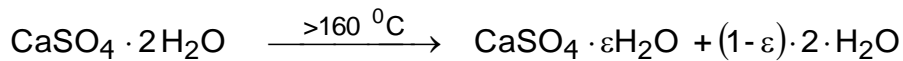
entre 0,15 e 0,66 moléculas de água, sendo o hidrato com meia molécula de água, uma forma particular intermediária, de grande interesse comercial pela sua estabilidade química.



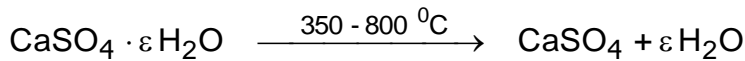
Quando a desidratação é realizada em autoclave, a pressões acima de uma atmosfera manométrica, um produto caracterizado por cristais bem formados dá origem a um hemidrato denominado de semi-hidrato α . Se a retirada da água combinada é realizada sob pressões próximas da atmosférica ou em atmosfera de vácuo, obtém-se um sólido micro poroso e caracterizado por cristais mal formados denominados de semi-hidrato β . A má formação destes cristais é atribuída à saída relativamente brusca da água de hidratação no decorrer da reação. Porém, a cinética da reação a 60 °C é muito lenta. Em processos industriais a velocidade requerida de produção é conseguida trabalhando-se em uma faixa de temperatura entre 140 e 160 °C.

Nesta fase da desidratação do minério gipsita, em particular nos fornos de produção de gesso, observa-se a formação de uma massa líquida com aspecto de um fluido em ebulição. Esse aspecto é levado em consideração quando da fabricação dos fornos de gesso para evitar perda de material durante o processo produtivo (PERES; BENACHOUR; SANTOS, 2008).

3 - Quando a temperatura de 200 °C é alcançada, o hemidrato perde quase toda sua água e obtém-se uma anidrita solúvel (instável), denominada anidrita III. A anidrita solúvel, de fórmula, indica que este produto pode conter água de cristalização, embora em baixo teor (HOLDRIDGE, 1985), variável entre 0,11 a 0,06 moléculas de água. Este tipo de anidrita confere ao gesso final uma redução em suas propriedades mecânicas, devido às condições adversas em que é formada no processo (excesso de temperatura). Sendo muito reativa, transforma-se em semi-hidrato com a umidade do ar. Esta hidratação tem sido verificada após 12 horas de armazenamento do produto em atmosferas com umidade relativa de 80%. Industrialmente esta reidratação ocorre após o gesso sair do forno em uma etapa conhecida como estabilização do gesso.

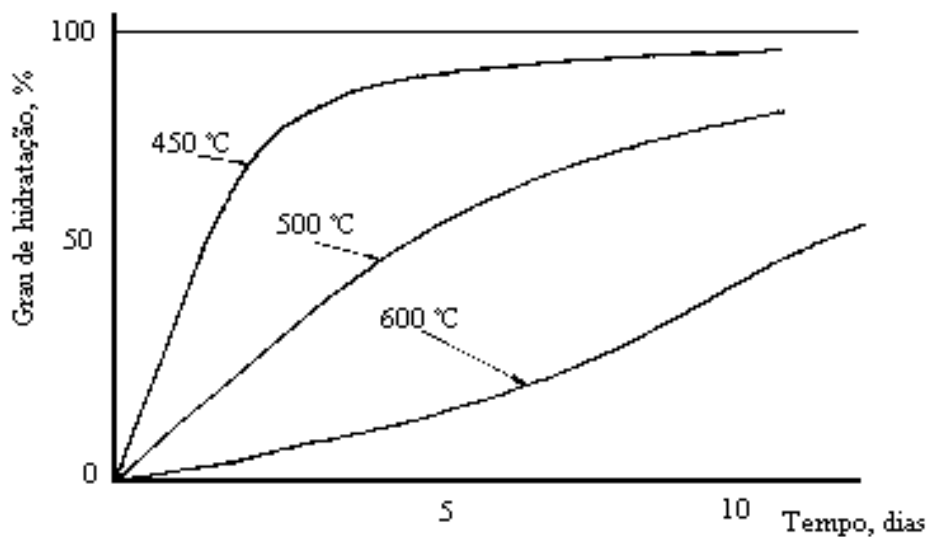


4 - Ao se alcançar cerca de 400 °C, a anidrita III transforma-se em anidrita II, esta última de hidratação lenta e, como o processo de transformação da fase III para a fase II é exotérmico, a transformação é muito rápida e não reversível:



Quando a temperatura de reação aumenta acima de 400 °C, a velocidade de desidratação do produto obtido é cada vez mais lenta. A 500 °C necessita-se de mais de quatro dias, em média, para reidratar metade da anidrita (Figura 7). A 600 °C necessita-se de mais de 10 dias para reidratar metade da anidrita e, a 800 °C, o produto é considerado de difícil reidratação.

Figura 7 - Tempo de reidratação de um gesso anidro



Fonte: MOISET (1997)

A anidrita II também chamada de anidrita artificial solúvel, ou ainda anidrita supercalcinada, de fórmula CaSO_4 , pode ser obtida entre 350 e 800 °C. Entre 700 - 800 °C é denominada de gesso calcinado à morte. Sua produção controlada entre 400 e 500 °C produz uma anidrita utilizada como um dos constituintes dos gessos de

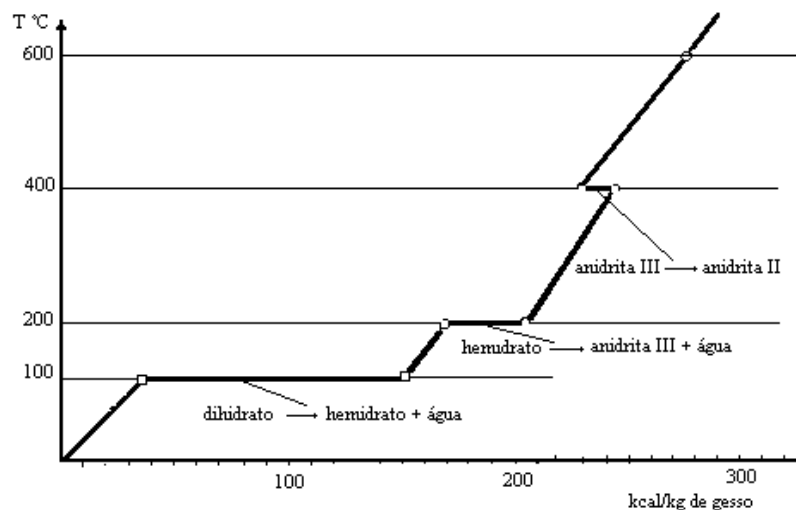
construção, principalmente o gesso para revestimento de parede, por conferir resistências especiais à erosão e à compressão para a mistura final.

5 - Quando se calcina o minério de gipsita pouco acima de 800 °C, o produto é similar à anidrita natural encontrada em minério de gipsita e conhecida como anidrita I, de hidratação extremamente difícil.

6 - Quando se atingem temperaturas de calcinação acima de 1250 °C, a gipsita decompõe-se em óxido de cálcio e anidrido sulfúrico.

A Figura 8 resume todo o processo de desidratação térmica do gesso, desde o aparecimento do semi-hidrato à decomposição do gesso em CaO e SO₃.

Figura 8-Temperatura em função da energia necessária à desidratação térmica do minério gipsita



Fonte: MOISET (1997)

1.4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELHAMID, A. M.; GABR, A.A. Evaluation of water hyacinth as feed for ruminants. Archives of Animal Nutrition (**Archiv fuer Tiererna"hrung**) USA, 1991. p. 745–756. Disponível em: < www.sceindirect.com>. Acesso em: 15 abr. 2016.

Atlas de biomassa Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em:< [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-biomassa\(2\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-biomassa(2).pdf)>. Acesso em: 20 mai 2016.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT 6023.** Informação e documentação referências- elaboração. Rio de janeiro. 2002.24 f.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT 14724.** Informação e documentação- Trabalhos acadêmicos-Apresentação, 2011. Disponível em: http://www.univap.br/marketing/publico/posgrau/Documentos/normas_ABNT.pdf. >. Acesso em :10 out. 2016.

Empresa Nacional de Energia Elétrica. **Aplicações Atlas de Biomassa.** Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicações/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicações/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf) □. Acesso em 20 abr. 2016.

Centro Nacional de Biologia Universidade de São Paulo. **Banco de biomassa de resíduos agroindustriais.** Disponível em :< <http://www.cenbio.iee.usp.br/saibamais:/bancobiomassa./residuos./agroindustriais.htm>. Acesso em: 20 set. 2016.

BAGNALL, L, O.;SHIRLEY,R,L .;HENTGES,J,F. **Processing, Chemical Composition and Nutritive Value of Aquatic Weeds by Publication** ,Florida ,No. 25,p.55.Water Resources Research Center Research Project Technical Completion Report Owrr Project Number A-017-FLA Annual Allotment Agreement Numbers 14-31-0001-3209 14-31-0001-3509 14-31-0001-3809.1973, [BERGIER, I.et al. Biofuel production from water hyacinth in the Pantanal wetland.Brasil, **Ecology and Hydrobiology**. v. 12, n. 1, p. 77-84, 2012. Disponível em :<\[https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=926015&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22BERGIER,I.%22&qFacets=autoria:%22BERGIER,I.%22&ort=&paginacao=t&paginaAtual=1\]\(https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=926015&biblioteca=vazio&busca=autoria:%22BERGIER,I.%22&qFacets=autoria:%22BERGIER,I.%22&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1\)>. Acesso em: 12 maio .2016.](http://ufdcimages.uflib.ufl.edu/AA/00/00/14/98/00001/00025_Processing_Chemical_Composition_and_Nutritive_Value_of_Aquatic>Weeds.pdf p.02-53>. Acesso em : 20 abr. 2016.</p></div><div data-bbox=)

BAUER J, M. **Estímulos e Barreiras para Reaproveitamento de Resíduos de Madeira na Fabricação de Briquetes: Estudo de casos-São Leopoldo** 2015,125 f. Dissertação de mestrado Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo

Rio Grande do Sul. Disponível em :<

http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/5147/J%C3%A9ssica%20Mariella%20Bauer_.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2016.

BULLER, L. S. Modelagem sistêmica do ciclo de vida do aguapé no Pantanal e análise do uso desta biomassa para a produção de bio-óleo e bio-fertilizante, 2012. Dissertação mestrado apresentada á faculdade de Engenharia de Alimentos Unicamp-Universidade de Campinas, 191f. Disponível em:<
<http://www.unicamp.br/fea/ortega/extensao/Dissertacao-SeleneBuller.pdf>>. Acesso em: 20 Jul. 2016.

BJORNSSON, S. Advanced Control Methodology for Biomass Combustion. Washington. 2014. Master of science in Mechanical Engineering university of Washington 20 p.111. Disponível em :<
https://digital.lib.washington.edu/researchworks/bitstream/handle/1773/26051/Bjornsson_washington_0250O_13776.pdf?sequence=1>. Acesso em: 20 jun. 2016.

BIBBIANI, C. et al. Wood Biomass as Sustainable Energy for Greenhouses Heating in Italy. Agriculture and Agricultural Science Procedia. 2016 .v.8, p.637-645. Disponível em:<www.sciencedirect.com>. Acesso em: 15 abr. 2016.

Fundação nacional Verde. **Briquete a Lenha Ecológica**. Disponível em:<[http://www.funverde.org.br/briquete a lenha ecológica](http://www.funverde.org.br/briquete_a_lenha_ecologica)>. Acesso em: 30 dez. 2016.

BRONZATO, R. F. Investigação da Biomassa de *Eichhornia crassipes* (AGUAPÉ) Para a Obtenção de Etanol de Segunda Geração Como um Processo Mitigatório da Poluição Aquática, 2016, 94 f. Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp – Campus de Botucatu Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho Faculdade de Ciências Agronômicas Campus de Botucatu – SP ,2016. Disponível em :<
https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/141985/bronzato_grf_me_bot.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Acesso em: 30 dez. 2016.

CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. Engenharia Ambiental: Conceitos, tecnologia e gestão. 1. ed. Rio de Janeiro. RJ. Elsevier .161-177 p. ISBN: 9788535261912. Disponível em :< <https://www.elsevier.com/books/engenharia-ambiental/calijuri/978-85-352-5954-4>>. Acesso em :12 jun. 2016.

Cartilha de resíduos de gesso. Disponível em:<[http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/18018fef/cartilha-residuos de gesso.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/18018fef/cartilha-residuos-de-gesso.pdf)>. Acesso em: 02 jan. 2017.

CEREIJO, G, N. Modelagem simplificada e simulação da combustão de uma partícula de biomassa suspensa em escoamento unidimensional. 2014.107 f. Dissertação de Mestrado Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica- Universidade de Campinas, Campinas, SP, 2014. Disponível em: <<https://www.biblioteca.digital.unicamp.br>>. Acesso em: 01 mai. 2016.

CONAMA-Conselho Nacional de meio ambiente, Resolução, nº 431, de 24 de maio de 2011 Diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos

da construção civil. Disponível em:<www.mma.gov.br/port/conamares/fes11/fes4312011>. Acesso em: 20 dez. 2016.

CONAMA-Conselho Nacional de meio ambiente, Resolução, nº 469, de 29 de julho de 2015. Publicada no DOU nº 144, de 30 de julho de 2015, Seção 1, pag. 109 a 110. Correlação: • Altera art. 3º da Resolução CONAMA nº 307/2002. Disponível em:<www.mma.gov.br/port/conamares/fes11/fes4312011>. Acesso em: 20 dez. 2016.

CONAMA-Conselho Nacional de meio ambiente, Resolução no 436, de 22 de dezembro de 2011 publicada no dou nº 247, 26 de dezembro de 2011. Disponível em :< <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=660>>Acesso em: 20 mai. 2016.

CONAMA-Conselho Nacional de meio ambiente, Resolução, nº 307, de 05 de julho de 2002. Publicada no DOU nº 136, de 17/07/2002, p. 95-96. Disponível em:<www.mma.gov.br/port/conamares/fes11/fes4312011>. Acesso em :20 dez. 2016.

COTANA, F.et al. Lignocellulosic Biomass Feeding in Biogas Pathway: State of the Art and Plant Layouts.**Energy Procedia.**v.81, p. 1231–1237, dez 2015. Disponível em:< <http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em :20 jul .2016.

D'AGUA, J,A, C,B.; PEREIRA, R.G.; MARINHO, F.J.V. Preparacion y Carcterización Física del Biocombustible Sólido del Lirio Acuático (*Eichhornia crassipes*), **Información Tecnológica**, v. 26, n.3, p. 53-62. 2015. Disponível em:<www.scielo.com.br>. Acesso em :28 mar. 2016.

DAVIES, R, M.; DAVIES, O, A.; MOHAMMED, U, S. Combustion Characteristics of Traditional Energy Sources and Water Hyacinth Briquettes. **International Journal of Scientific Research in Environmental Sciences (IJSRES)**, 2013.v.1(7), p. 144-151, .Disponível em: <<http://www.ijsrpub.com/uploads/papers/IJSRES/IJSRES-July2013/IJSRES-13-15.pdf>>.Acesso em :20 dez .2016.

DUKE, J, A. 1983. **Handbook of energy crops. Unpublished.** Available via PURDUE. <[Http://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/Eichornia_crassipes.html](http://www.hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/Eichornia_crassipes.html)>. Acesso em :20 nov.2016.

PERNAMBUCO. Empresa de Limpeza Urbana. **Lagos e rios urbanos de Recife.** Recife, 2015 10 f.Disponível em :<<http://www.recife.pe.gov.br>>. Acesso em: 20 jul. 2016.

FOGLER, H, S. **Elementos de Engenharia das Reações Químicas.** 4. Ed. Rio de Janeiro: RJ. LTC, p. 854. 2009.

GOSH,S, H. Biomass & Wastw Supply Chain Sustainability for Bio-energy and Bio – fuel Production. **Procedia.** INDIA. V.31.p. 31-39, 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com>>.Acesso em :01 maio. 2016.

GAO, N. et al. FTIR and Py-GG\MS analysis on pyrolysis and combustion of pine sawdust. China, **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. v .100, p. 26-32, 2013. Disponível em :< www.elsevier.com/locate/jaap>. Acesso em: 20 abr. 2016.

GUNNARSSON, C.; C, PETERSEN, C, M. 2007. Water hyacinth as a resource in agriculture and energy production: a literature review. Uppsala, Sweden, **Waste Management**. v. 27, p.117-129. Disponível em :< <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X06000109>>. Acesso em: 22 abr. 2016.

GRULL, D. Remediação e readequação de sistemas aquáticos superficiais contaminados. In: **CALIJURI, Maria do Carmo; CUNHA, Davi Gasparini Fernandes. Engenharia Ambiental: Conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013, p. 621-641.

HEUZÉ, V et al..**Water hyacinth (Eichhornia crassipes). Feedipedia, a programme by INRA, CIRAD, AFZ and FAO**. Disponível em :< <http://www.feedipedia.org/node/160> last updated on october 13, 2015>. Acesso em: 20 abr. 2016.

HO, K, K, .**Understanding the thermochemical conversion of biomass to overcome biomass recalcitrance**, 2015. 154 f. Ames, Iowa, USA, A dissertation submitted to the graduate faculty in partial fulfillment of the requirements for the degree of doctor of philosophy. Iowa state University Ames yowa, 2015. Disponível em :< <http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=5389&context=etd>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

HOLDRIDGE, D. A.**The characterization of plaster, Trans. of the British Ceram. Society**, 64 (4) 1975.

Instituto Superior de Agronomia. Universidade de Lisboa. **Combustão**. Lisboa Disponível em:< <https://fenix.isa.ulisboa.pt/qubEdu/conteudos-publicos/ficheiros?oid.p.01-41>>. Acesso em: 01 maio. 2016.

JITTABUT, P. Physical and Thermal Properties of Briquette Fuels from Rice Straw and Sugarcane Leaves by Mixing Molasses. **Energy Procedia** 2015, v.79, p.2-9, 2015. Disponível em: <>. Acesso em :15 abr. 2016.

LIMA, L, C, S. **Aplicação de micropirólise/catalítica no estudo da conversão térmica de plantas aquáticas para a obtenção de biocombustível de 2ª geração**. 2014. 93 f. Dissertação de mestrado A apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão- SE. Disponível em:< <http://btd.ufs.br/handle/tede/2465>>. Acesso em: 20 mar. 2016.

LUO, G; STRONG, P.J.WANG, H.NI, W.SHI, W. Kinetics of the pyrolytic and hydrothermal decomposition of water hyacinth. **Biosource Technology**, v .102, p.6990-6992. 2011. Disponível em :<

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852411005621>>. Acesso em :20 abr.2016.

MASON, P.E. et al. Single particle flame-Combustion Studies on Solid biomass **Fuel**, USA, v.151, p.21-30, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236114011995> >. Acesso em: 15 abr. 2016.

MOISSET, J., Review of the Main Processes Used for Plaster Production. **Anais da Gypsum Fair 97**, Recife, Abr .1997.

OLIVEIRA, C, M. **Biomassa Bioenergia Briquete Woodpellets**, Ed 1, p. 540 2016. Disponível em:<<http://www.brasilbiomassabioenergia.com.br>>. Acesso em: 12 dez. 2016.

Portal. **O Que é Energia da Biomassa**. Disponível em :<<http://www.portal-energia.com/o-que-e-energia-biomassa>>. Acesso em: 20 abr. 2016.

PEDROSO, G, A. **Utilização do aguapé e da cal no tratamento da água residuária do café processado por via úmida**, 2010.50 f. Trabalho de conclusão de curso para obtenção de grau de Tecnólogo em cafeicultura. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul de Minas Gerais, Muzambinho, MG, 2010.

PEREIRA, F.J.et al. Mecanismos anatômicos e fisiológicos de plantas de aguapé para a tolerância à contaminação por arsênio. Viçosa, MG, **Planta Daninha**. 2011. v. 29, n.2, p. 259-267. Disponível em :< <http://www.scielo.br>>Acesso em: 02 fev. 2016.

PEREIRA, F.J. et al. Lead tolerance of water hyacinth (*Eichhornia crassipes* Mart. - Pontederiaceae) as defined by anatomical and physiological traits. **An. Acad. Bras. Ciênc.** Rio de Janeiro. 2014. v. 86, n. 3, p. 1423-1433. Disponível em :< http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652014000301423&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 10 Jun. 2017.

PERBANGKHEM, T.; POLPRASERT, C. 2010. Biomass production of (*Cyperus papyrus*) in constructed wetland treating low-strength domestic wastewater. **Bioresource technology**, Bangkok, Thailand, v .101 (2010) p.833-835. Disponível em:< <http://www.elsevier.com/locate/biortech>>. Acesso em: 20 mai .2015.

PERES, L. S.; BENACHOUR, M.; SANTOS, V. A. **Gesso: Produção e Utilização na Construção Civil**. 2. Ed. Recife: SEBRAE, vol. 1, p.119, 2008.

PINTO, L, F. **Alterações ecofisiológicas e estruturais em *Eichhornia crassipes* (MART) SOLMS (aguapé) no rio Paraíba do sul e rio Imbé**, 2008,102 f. Dissertação de mestrado em ecologia e recursos naturais. UENF. Universidade Estadual do Norte Fluminense. Disponível em:<\posgraduação\ecologia-recursosnaturais\wp-content\uploads\sites\7\2013\10\Frederico-Lage-Pinto.pdf.10.59.>Acesso em: 20 ago. 2016.

PRYCHID, C, J .;RUDALL, P, J. Calcium oxalate crystals in monocotyledons: A Review of their structure and Systematics. 1999, England. **Annals of Botany**

p.725- 739. Disponível em:<

http://www.esalq.usp.br/lepse/imgs/conteudo_thumb/Calcium-Oxalate-Crystals-in-Monocotyledons--A-Review-of-their-Structure-and-Systematics.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2016.

PROTÁSIO T, P. **Biomassa Residual do Coco Babaçu Potencial de uso bioenergético nas Regiões Norte e Nordeste do Brasil**. 2014, 173f. Dissertação Mestrado em Ciência e Tecnologia da Madeira - Processamento e Utilização da Madeira. Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2014. Disponível em <:// <http://www.repositorioufla.br>. >. Acesso em: 01 maio. 2016.

REZANIA. S.et al. The diverse applications of water hyacinth with focus on sustainable energy and production for new era: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Malaysia.v. 41, p. 943–954, 2015.Disponível em<<http://www.sceincoirect.com>>. Acesso em:20 maio. 2016.

RUBIO, Alí V.; VALERIO, Giselle A.; FERRUFINO, Lilian. Anatomía caulinar y foliar de tres especies de plantas acuáticas. **Portal de la Ciencia**, v. 8, p. 31-44, 2015. Disponível em :<www.scielo.com.br>. Acesso em: 28 mar. 2016.

SANTOS, L, O. **Estudo para obtenção de bio-óleo de 2ª geração através da pirólise de plantas aquáticas**. 2013.75 f, Dissertação de mestrado Programa de Pós-Graduação em Química, do Departamento de Química da Universidade Federal de Sergipe Campus São Cristóvão, SE, 2013. Disponível em :<<http://bdtd.ufs.br/handle/tede/2446>>. Acesso em: 15 abr. de 2016.

SEZERINO, P, H. et al. **Experiências brasileiras com wetlands construídos aplicados ao tratamento de águas residuárias: parâmetros de projeto para sistemas horizontais**. Eng. Sanit. Ambient. Rio de Janeiro, v. 20, n. 1, p. 151-158, mar. 2015. Disponível em :<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522015000100151&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 10 jun. 2017.

TANGER, P, et al .Biomass for Thermochemical conversion: targets and challenges. **Pant Science**, Colorado USA.v.4. n. 218. Jul. 2013. Disponível em:<www.fronierrsin.org>. Acesso em: 28 de abr. 2016.

TAVARES, M, A, M, E. **Estudo da viabilidade da produção de briquetes e seus possíveis impactos sobre o meio ambiente e o mercado de trabalho da região do baixo-Açu**, 2013, 247f. Dissertação (Mestrado em Economia do Trabalho e Economia de Empresas) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2013. Disponível em :<<http://tede.biblioteca.ufpb.br:8080/handle/tede/tede/5015>>. Acesso em: 20 abr.2016.

TAVARES S.R.L.; SANTOS T.E. Uso de Diferentes Fontes De Biomassa Vegetal Para Produção De Biocombustíveis, Natal, Rio Grande do Norte, **Holos**, ano 29.5 v. 5, p.19-27, 2013. Disponível em <www.scielo.com.br>. Acesso em: 28 mar. 2016.

TESSARO, A B.SA, J, S. SCREMIN, L, B. Quantificação e classificação de resíduos procedentes da construção civil e demolição no município de Pelotas R.S. **Ambiente construído**, Porto Alegre, v.12, n.2.p.121-130. abril/jun 2012.Disponível em :<<http://www.seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/20395/18760>>. Acesso em: 20 jan. 2017.

TONIN, A. **Análise Técnica e Econômica para a Queima de Resíduo da Filtração de Biodiesel em Caldeiras**, 2014,67 f. Trabalho de Conclusão de Curso-Passo Fundo, Universidade de Passo Fundo Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Passo Fundo, MG. Disponível em: <KW. Usuários. upf.br>. Acesso em :28 mar. 2016.

THABUOT, M, et al. Effect of Applied Pressure and Binder Proportion on the Fuel Properties of Holey Bio-Briquettes, Thailand, **Energy Procedia**, v.79, p.890-895, 2015.Disponível em :< >. Acesso em: 15 abr.2016.

VITORINO, F, A.; CONTIJO, C, A, V.; LERMONTOV, A. **Wetlands processos naturais para remoção de nutrientes em estações de tratamento de esgotos** [s.l.:s.n] 2014 .Disponível em < <http://www.grupoaguasdobrasil.com.br/wp-content/uploads/2013/01/Wetland-Juturnaiba-.pdf>, >.Acesso em : 24 maio. 2015.

CAPÍTULO II

Utilização de resíduos de gesso para reduzir a incrustação causada pela queima direta de biomassa vegetal

Manuscrito submetido para publicação na Revista *Chemical Engineering Transactions*.

Utilização de resíduos de gesso para reduzir a incrustação causada pela queima direta de biomassa vegetal

Devanchirles M. A. da Silva, Leonardo B. dos Santos, Leonie A. Sarubbo, Valdemir A. dos Santos*

**Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Católica de Pernambuco, Rua do Príncipe, n. 526, Boa Vista, Cep: 50050900, Recife, Pernambuco, Brasil
leonie@unicap.br*

A formação de incrustações nas paredes das câmaras de combustão tem sido um fator limitante para uso de biomassa sólida como combustível, para queima direta em fornos não rudimentares. Apesar de seu alto teor de lignina, com respectivo alto Poder Calorífico, a biomassa composta de resíduos de poda de macrófitas flutuantes, da espécie *Eichhornia crassipes*, tem sofrido restrições de uso. Para contribuir com tecnologia de adaptação de uso de biomassa sólida em fornos de tecnologia superior o presente trabalho realizou estudos sobre a adição de resíduos de gesso a briquetes de resíduos de macrófitas. A técnica proposta baseia-se na formação de uma massa líquida, rica em óxido de cálcio que se forma durante a decomposição térmica dos resíduos de gesso. Semelhante ao resíduo de gesso hidratado o Oxalato de Cálcio contido nos resíduos da poda das macrófitas liberar moléculas de CaO, as quais são mantidas na massa parcialmente liquefeita de resíduos de gesso adicionados à briquetes de resíduos de macrófitas. Foram então realizados experimentos para quantificar e qualificar a influência do teor de gesso na composição dos briquetes de macrófitas, empregando-se um planejamento do tipo tratamento. Medidas do PCI dos briquetes foram realizadas com auxílio de um calorímetro Parr®. Gráficos do tipo box plot registraram resultados de PCI dos briquetes e a formação de incrustações em função do teor de gesso hidratado. O PCI dos briquetes contendo percentuais de 4,0 % resíduos de gesso apresentou um valor médio semelhante ao da madeira (3290 kcal/kg).

1. Introdução

A biomassa sólida é um recurso abundante que pode ser produzido em agricultura, silvicultura e sistemas aquáticos. Essa biomassa é composta principalmente de celulose, hemicelulose, lignina e menores quantidades de outros componentes extraíveis, como pectinas, proteínas glicoproteínas, compostos graxos (cutina, suberina e as ceras), oxalatos, taninos, resinas, além de substâncias minerais como sílica, carbonato de cálcio e água (Tanger *et al.*, 2013). Produtos da agricultura, incluindo substâncias vegetais e animais, resíduos da floresta, resíduos das indústrias e a parte biodegradável dos resíduos industriais e urbanos, são suas principais fontes (Ozcan *et al.*, 2014).

A utilização de resíduos sólidos como fonte de energia pode ser realizada por queima direta (Rakatoarisoal *et al.*, 2015) ou por produção de um biogás (Cotana *et al.*, 2015). Na queima direta utiliza-se normalmente sua compactação ou aglomeração (briquetes), proporcionando uma série de vantagens. Entre essas vantagens, quando comparadas com a utilização dessa biomassa em estado natural, encontram-se as facilidades de armazenamento, manuseio e aumento de densidade, com conseqüente melhoria do poder calorífico. Essa forma de briquete para biomassa sólida permite ainda que a mesma seja utilizada em diferentes tipos de queimadores (Rezania *et al.*, 2016).

As macrófitas aquáticas são uma comunidade importante em ecossistemas de águas rasas, possuindo uma elevada taxa de produção primária, participando na reciclagem de nutrientes e fornecendo alimento para herbívoros e detritívoros. Os lagos da região brasileira são ricos em macrófitas aquáticas, incluindo a abundante macrófita aérea *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms (Pontederiaceae) (Villamagna e Murphy, 2010).

A biomassa da *Eichhornia crassipes* apresenta um maior teor de lignina e um menor teor de celulose, o que poderia classifica-la como excelente biocombustível, pelo alto valor de Poder Calorífico Superior (PCS) atribuído à lignina = 5.995 kcal/kg; celulose = 3.797 kcal/kg). Entretanto, outros fatores devem ser considerados, como os teores de cinzas e de sílica (Tavares e Santos, 2013). Essas macrófitas são plantas herbáceas, possuindo caules não lenhosos, o que se torna um fator limitante para a combustão direta. Geralmente o elevado teor de cinzas resulta em problemas

como produção de escórias (D'agua *et al.*, 2015). Não são bem recomendadas como combustível de caldeiras, pois poderiam causar danos às mesmas, devido à formação de incrustações originadas pela decomposição térmica do oxalato de cálcio.

A decomposição térmica do oxalato de cálcio presente nos resíduos de macrófitas leva à formação de carbonato de cálcio, o qual por sua vez decompõe-se em CaO e CO₂. Como o CaO é uma substância responsável por incrustações, as referidas macrófitas são indicadas como biocombustíveis de queima direta apenas para fornos rudimentares. Nestes trabalhos resíduos de gesso foram misturados na composição de briquetes para reduzir o perigo de incrustações durante a queima direta de macrófitas da espécie *Eichhornia crassipes*, o que possibilitaria o uso das mesmas como combustível para qualquer tipo de equipamento térmico.

2. Material e Métodos

2.1. Macrófitas

As macrófitas da espécie *E. crassipes* (Crema *et al.*, 2012) foram coletadas em seu habitat natural, na Lagoa de Dois Irmãos, localizada na cidade do Recife, Estado de Pernambuco, Brasil, onde essa planta é abundante (Figura 1).



Figura 1: Macrófitas da espécie *E. crassipes* (Mart.) Solms (Pontederiaceae)

2.2. Preparação dos Resíduos das Macrófitas

Os resíduos da poda de macrófitas foram obtidos de um wetlands construído (Rakatoarisoal *et al.*, 2015) para o tratamento de água oleosa. Os resíduos foram deixados para secagem sob o Sol por cerca de dois dias. Em seguida, foram triturados e mantidos em estufa a 50°C até peso constante. A partir desses resíduos foram confeccionados briquetes, sem e com a adição de resíduos de gesso hidratado, para monitoração do poder calorífico e das massas das incrustações deixadas nas paredes das câmaras onde esses briquetes foram queimados, como descritos a seguir.

2.3 Decomposição Térmica do Gesso Hidratado

Num meio reacional contendo minério Gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou resíduo de gesso hidratado, que tem a mesma constituição molecular, ao se alcançar temperaturas entre 60 °C e 160 °C, nas proximidades da pressão atmosférica, inicia-se uma reação de desidratação térmica (Paulik *et al.*, 1992). Essa perda de moléculas de água, onde pode variar de 0.0 a 0.5, moléculas podendo dar origem a um semi-hidrato denominado de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$), depende do tempo de reação. Quando o meio atinge uma temperatura em torno de 200 °C, esse material perde quase toda sua água de hidratação e obtém-se um sulfato de cálcio com pouca ou nenhuma capacidade de hidratação ($\text{CaSO}_4 \cdot \varepsilon\text{H}_2\text{O}$), recebendo a denominação de Anidrita solúvel ou III, de caráter instável, O valor de ε fica na faixa de 0.06 a 0.11 mol de água por mol de Anidrita.

Ao se alcançar cerca de 400 °C, a Anidrita III transforma-se em Anidrita II ($\cdot \varepsilon \cong 0$). Esta última forma é de hidratação lenta e, como o processo de transformação da fase III para a fase II é exotérmico, a transformação é muito rápida e não-reversível para reidratar metade da anidrita e, a 800 °C, o produto é considerado de difícil reidratação. Durante a decomposição do resíduo de gesso hidratado, ou minério Gipsita, observa-se a formação de um estado pseudo líquido, motivo pelo qual os fornos de gesso possuem anteparo para evitar perda de material por derramamento (Melo, 2012). A formação desse estado liquefeito da massa de gesso

pode ser utilizada para aglutinar moléculas de CaO ou MgO, evitando na etapa final da reação a formação de incrustações (CaO ou MgO) que podem migrar para nas paredes da câmara de combustão que delimitam o meio reacional.

2.4 Decomposição Térmica do Oxalato de Cálcio

Responsável por incrustações nas paredes das câmaras de combustão, o Oxalato de Cálcio monohidratado decompõe-se termicamente conforme estas etapas (Rak *et al.*, 1995):

Etapa 1: $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaC}_2\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O}$ (96,8 °C e 186,4 °C)

Etapa 2: $\text{CaC}_2\text{O}_4 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}$ (380,4 °C e 491,9 °C)

Etapa 3: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (579,9 °C e 734,9 °C)

A realização de experimentos em laboratório permite que se identifiquem as temperaturas correspondentes ao início e término de cada evento térmico além da temperatura máxima representada pelo pico de DTG. Com base nos dados da TGA pode reconhecer as faixas de decomposição e até mesmo calcular as variações de massa pelas perdas de água, CO e CO₂.

2.5 Produção e Queima dos Briquetes

A biomassa da macrófita é viável para a confecção de briquetes e sua posterior utilização como combustível sólido (D'Agual *et al.*, 2015). Os referidos autores observaram que para formação dos briquetes não foi necessário aquecimento e ligantes porque essa biomassa apresenta um teor de umidade necessária em relação a outros materiais. Dessa forma, o alto rendimento de matéria verde, sua periodicidade e abundância, superam outras biomassas utilizadas comercialmente, mostrando ser uma alternativa energética viável para países ibero-americanos.

Para confecção dos briquetes, os resíduos de poda das macrófitas foram submetidos à secagem, até umidade de 13 % em base úmida, determinada com auxílio de uma termo balança (Figura 2).

Esses percentuais foram calculados em função de um valor médio de 1,51 % do teor de Cálcio comumente encontrado em macrófitas flutuantes (Water Hyacinth) da espécie *Eichhornia crassipes*, segundo Tabuti *et al.* (1998). A estratégia de se verificar valores de PCI dos briquetes com cerca de 4 vezes mais gesso que o correspondente ao cálcio presente na biomassa de macrófitas foi observar o aumento da qualidade do biocombustível com o percentual de gesso adicionado aos briquetes.



Figura 2: Determinação da umidade de briquetes produzidos a partir de resíduos da poda de macrófitas e resíduos de gesso hidratado

2.6 Realização dos Experimentos

A realização do experimento obedeceu a um planejamento experimental de um único fator, para o qual foi escolhido o teor de resíduos de gesso na confecção dos briquetes. A variável resposta foi o PCI do briquete em função do teor de gesso.

Para obtenção de valores médios do PCI dos briquetes de resíduos de macrófitas e de gesso foi utilizado um calorímetro Parr® aparelho selado que suporta altas temperaturas e não há transferência de calor. A ignição ocorre por um fio interno no calorímetro que através de corrente elétrica queima a amostra, na bomba há uma quantidade de água conhecida, a partir do calor produzido pela combustão da amostra que aquece a água.

Testes experimentais de queima de e detecção visual de resíduos foram realizados com auxílio de um mini maçarico numa capela em laboratório (Figura 3). Para isso, os briquetes eram colocados no interior de uma cápsula de alumínio e calcinado utilizando-se o maçarico. Imagens comparativas dos aspectos visuais dos resíduos forneceram material qualitativo para comparação entre condições de formação das incrustações nas paredes da câmara de combustão da biomassa.

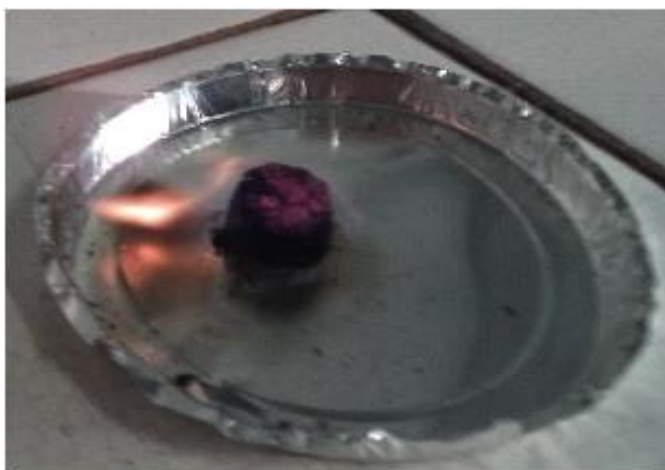


Figura 3: Realização de experimentos da queima de briquetes com auxílio de um mini maçarico para identificação visual de níveis de incrustações em função do teor de resíduos de gesso hidratado

3. Resultados e Discussão

Estatisticamente foram empregados métodos gráficos do tipo Box plot (Carter et al., 2009). O gráfico da Figura 4 ilustra a influência do teor de gesso hidratado no valor do poder calorífico dos briquetes de resíduos da poda de macrófitas da espécie *Eichhornia crassipes*. Observa-se no referido gráfico um decréscimo no valor do poder calorífico com o aumento do teor de gesso hidratado na composição dos briquetes. Observa-se também que um percentual máximo de 4,0 % m/m pode ser

utilizado como dosagem de resíduo de gesso hidratado, pois este percentual reduziu a formação de incrustações e manteve o Poder Calorífico Inferior próximo ao da madeira. Nas dosagens de 2,0 %, 6,0 % e 8,0% de resíduo de gesso hidratado não houve formação de incrustação, entretanto houve redução do Poder Calorífico Inferior. Neste caso, o briquete de macrófitas pode ser utilizado como combustível sólido com poder calorífico semelhante ao da madeira, determinado por Telmo e Lousada (2011) como da ordem de 3,290 kcal/kg. A combustão dos briquetes foi intensa e não houve diferença entre a testemunha e as outras amostras, entretanto após a queima da testemunha foi possível visualizar uma leve camada aderida na placa comportamento não observado nas outras queimas, este comportamento está relacionado aos teores de gesso adicionados na amostra.

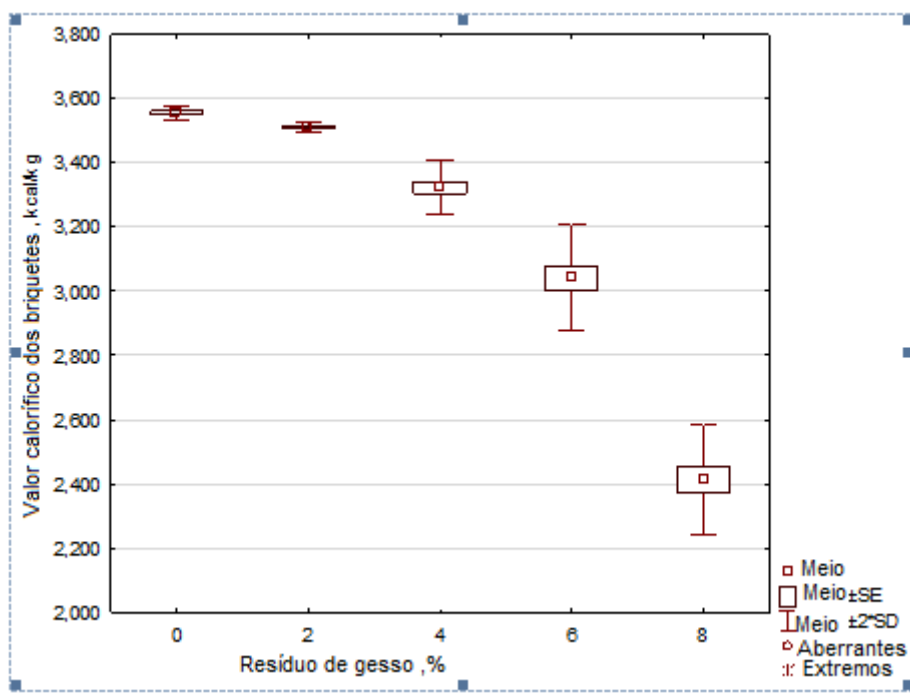


Figura 4: Poder calorífico dos briquetes de resíduos da poda de macrófitas (*Eichhornia crassipes*) em função do teor de resíduos de gesso hidratado

Resíduos resultantes de incrustações deixadas nos cadinhos onde foram realizadas as queimas sucessivas dos briquetes, com diferentes percentuais de gesso hidratado, tiveram seus teores de incrustações avaliados e postos em um

gráfico do tipo box plot (Figura 5). Na referida figura os dados utilizados na confecção do gráfico tiveram seus valores normalizados em função das dificuldades visuais para se diferenciar a quantidade de massa retida em cada incrustação.

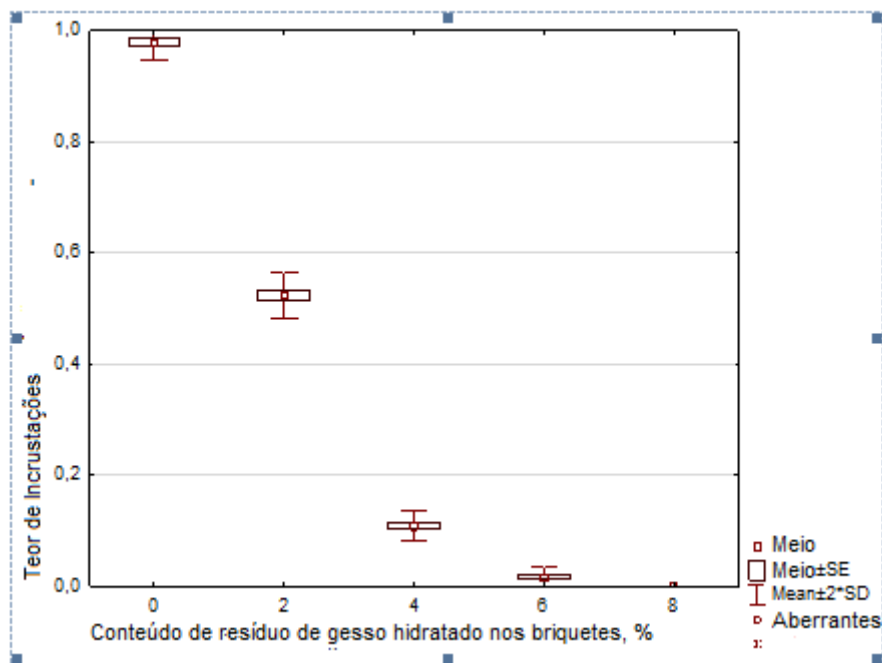


Figura 5: Teor de incrustação produzido pelos briquetes em função do percentual de gesso hidratado

4. Conclusão

As macrófitas aéreas da espécie *Eichhornia crassipes* foram, durante muito tempo, conhecidas como verdadeiras pragas em lagos e rios por reduziram condições de sobrevivência da fauna aquática. Este trabalho apresentou uma alternativa atrativa de uso dos resíduos da poda dessas macrófitas, associados aos resíduos de gesso hidratado, como biocombustível sólido de PCI elevado e redução da formação de incrustações, com redução de tempo de manutenção de fornos utilizados para sua combustão.

Agradecimentos Este estudo foi financiado pela Fundação para o Apoio à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), pelo Programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pela Termoelétrica Candeia Energia (Grupo Global), pelo Conselho Nacional de

Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Os autores agradecem aos laboratórios do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Católica de Pernambuco.

Referências

CARTER, N.J., SCHWERTMAN, N.C., KISER, T.L., 2009, A comparison of two boxplot methods for detecting univariate outliers which adjust for sample size and asymmetry. *Statistical Methodology*, 6, 604–621.

COTANA, F., CAVALAGIO,G.,PETROZZI, A., COCCIA, V., 2015, Lignocellulosic biomass feeding in biogas pathway: state of the art and plant layouts. V.31. p. 31-39. **Energy Procedia**, 81, 1231–1237.]

CREMA, L.C., BIUDES, J.F.V., CAMARGO, A.F.M., 2012, Effect of Urucu oil (Brazilian Amazon) on the biomass of the aquatic macrophyte *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms (Potenderiaceae). **Acta Limnologica Brasiliensia**. 23, 406-411.

D'AGUAL, J.A. C.B., PEREIRA, R.G., MARINHO, F.J.V., 2015, Preparacion y Carcterización Física del Biocombustible Sólido del Lirio Acuático (*Eichhornia crassipes*). **Información Tecnológica**, 26, 53-62.

MELO, D,C.Processo de calcinação de Gipsita/resíduos em um forno piloto rotativo contínuo para produção de gesso beta reciclável.2012.109 p. Thesis. Federal University of Pernambuco, Recife, Brazil.

MUJERI et al.,2015,On the Potencial of water hyacinth as a biomass briquette for heating applications.International journal of Energy and Enviromental Engineering.p,37-43.doi: 10.1007\s40095-015-0195-8

OZCAN, M., OZTURK, S., OGUZ, Y., 2015, Potential evaluation of biomass-based energy sources for Turkey. **Eng. Sci. Technol.** 18, 178-184.

PAULIK, F., PAULIK, J., Arnold, M., 1992, Thermal Decomposition of Gypsum. **Thermochimica Acta**, 200,195-204.

RAK, J., SKURSKI, P., GUTOWSKI, M., BLAZEJOWSKI, J., 1995, Thermodynamics of the thermal decomposition of calcium oxalate monohydrate examined theoretically. **J. Thermal Anal.**, 43, 239-246.

RAKATOARISOAL, T.F., WAEBER, P.O., RICHTER, T., MANTILLA-CONTRERAS, J., 2015, Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), any opportunities for the Alaotra wetlands and livelihoods. **Madagascar Conservation & Development**, 10, 128-137.

REZANIA, S., DIN, M.F.M., KAMARUDDIN, S.F., TAIB, S.M., SINGH, L., YONG, E.L., DAHALAN, F.A., 2016, Evaluation of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) as a potential raw material source for briquette production. **Energy**, 111, 768-773.

TABUTI, J.R.S., ORYEM-ORIGA, H., MUTUMBA, G.M., KASHAMBUZI, J.K., 1998, Partitioning of soluble calcium in the water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Martius) Solms) in Lake Victoria, Uganda. **Plant Biology**, 111, 4.

TANGER, P., [Field](#), J.L., JAHN, C.E., DEFOORT, M.W., [Leach](#), J.E., 2013, Biomass for thermochemical conversion: Targets and challenges. *Front. Plant Sci.* 4. 1-20.

TAVARES, S.R.L., SANTOS, T.E., 2013, Uso de diferentes fontes de biomassa vegetal para a produção de biocombustíveis sólidos. **Holos**, 5, 19-27.

TELMO, C., LOUSADA, J., 2011, Heating values of wood pellets from different species. **Biomass Bioenergy**, 35, 2534-2539.

VILLAMAGNA, A.M., MURPHY, B.R., 2010, Ecological and socio-economic impacts of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): a review. **Freshwater Biol.** 55, 282-298.

CAPÍTULO III

CONCLUSÕES GERAIS

Os resultados obtidos permitem as seguintes conclusões:

- Os resíduos de poda, ou restos de macrófitas retiradas de lagos urbanas podem ser uma alternativa para uso como biomassa de queima direta.
- Os resíduos de gesso que trazem dificuldades para o reaproveitamento de materiais descartados da construção, demolição de obras civis ou resíduos da fabricação de pré-moldados podem ser utilizados na valorização de resíduos da poda de macrófitas.
- A formação de incrustação teve uma solução ambientalmente favorável através da produção de briquetes com adição de resíduos de macrófitas e gesso. O cálcio liberado durante a combustão da biomassa pelo oxalato de cálcio e absorvido pelo gesso durante sua decomposição térmica reduzindo a formação da incrustação.
- A adição de resíduos de gesso, além de reduzir a formação de incrustações, mantém o poder calorífico inferior dos briquetes próximo ao da lenha.

ANEXOS

Type Here Your Title, Arial 16, Centred [Style: CET Title]. To Prepare Your Paper Use Directly this Template and Simply Replace this Text by Your Text

John J. A. Smith^a, Ronald R. Adams^{*b}, <full given name> <other given names initials if appropriate><surname>, if more than one affiliation, then affiliation^a and^b should be used, corresponding author with* (but not in case of single author), left Arial12 [Style: CET Authors]

^aAffiliation and Address , no email, left , Arial 8 [Style: CET Address]

^bAffiliation and Address , no email, left , Arial 8 [Style: CET Address]

adams@domain.ex., email only for corresponding author, left , Arial 8, [Style: CET email]

These instructions comply with the rules set by AIDIC for the publication of the papers in a volume in the series: Chemical Engineering Transactions.

The manuscript title must be in "Title Case", i.e., when writing a name or a title, you should only use capital letters for the principal words. Do not use capital letters for prepositions, articles or conjunctions unless one is the first word.

Title should be followed by the list of authors in the format given above, denoting the corresponding author with an asterisk. In case of single author, the asterisk is not required. Further should be given the author affiliations. Please use just one (main) affiliation, the other can be acknowledged. Below those, the email of the corresponding author should be provided. Note – the words "email" or "e-mail" or "corresponding author" should be omitted. On the line for the corresponding author email please put ONLY the email without any added remarks, marks, and especially without an asterisk.

The manuscript should start, with an abstract of the paper that summarizes the scope, aims, results and conclusions of the work. Do not head the abstract section with any heading (ex: do not indicate the word Abstract). The abstract section is mandatory.

Start the first abstract paragraph 10 pts below the email of the corresponding author. Do not insert references in the abstract. If you need assistance, please do not hesitate to contact the address you may have received for this purpose.

Each manuscript will be published in Chemical Engineering Transactions ONLY if there is a corresponding copyright transfer agreement accompanying the manuscript. This agreement grants to AIDIC only the necessary rights to protect the publication from undue use. Upon receiving the email for final acceptance of your paper, please fill in, sign and email a scan of the copyright transfer form.

5. Format and type fonts

To prepare your **paper use directly** this template and simply replace this text by your text.

These instructions are to be followed strictly, and it is strongly advised to use the styles indicated in this document in between square brackets. Do NOT use formatting or styles in your paper different from the ones mentioned here.

5.1 Format

Margins: inside margin 30 mm, outside margin 25 mm, top margin 30 mm and bottom margin 30 mm. Please make sure that you do not exceed the indicated type area. When you use the current document as a template, please do not modify the page setup.

The number of pages for the manuscript have to fit into 6 PAGES, including references and figures. Please Do NOT insert page numbers. Please Do NOT use the Headers or the Footers. They are reserved for the technical editing of the volume by the CET editors.

5.2 Type font and type size

Prescribed font is Arial, 9 points, with an 11 pts line spacing (1.1 multiple lines), 1 column. [Style: CET Body text]

However, if your text contains complicated mathematical expressions or chemical formulae, you may need to increase the line spacing. Running text should be justified. Do not use bold or italics in the text. They are reserved for headings. The core terminology of Process Integration as e.g. Pinch, Composite Curves should be capitalised. This is a critical requirement for keeping the high standard of the journal.

6. Section headings

The way section titles and other headings are displayed in these instructions, are meant to be followed in your manuscript.

Level 1: Arial, 10, Bold, 12 pt spacing before heading, 6 pt spacing below heading [Style: CET Heading1]

Successive Levels: Arial, 9, Bold, 6 pt spacing before and below heading, [Style: CET headingx].

Do NOT begin a new section directly at the bottom of the page, but transfer the heading to the top of the next page.

7. (Foot)notes

Please do not use footnotes.

8. Measurement units, numbers

Please use the SI set of units as much as possible. Wherever the application domain uses a different set of units widely, please minimize the use of non-standard units or non-standard symbols for those units. As examples, the use of “a” for year (annum) is depreciated and the use of “y” is encouraged instead. Similarly, “h” should be used for hours instead of “hr” and “t” instead of “ton” or “tonne”. It is important to take care of the case in which the measurement units are typed. E.g. “Km” does not mean “kilometres”, but “Kelvin-meters”.

When providing numerical values followed by measurement units, please leave a regular space or non-breaking space between each value and the measurement unit.

This also includes percentages and degrees Celsius (e.g. 42 % or 35 %, 234 °C, 504 K). This rule also applies to the unit for litre, which is recommended to be capital “L”. The authors are encouraged to render the numbers specifying the dot as a decimal separator and the comma as a thousands separator. Please use the British style for numbers – i.e. 1,000,000 and not 1000000 or 1 000 000.

9. Equations

Write equations instead of copy and paste an image. Make sure that placing and numbering of equations is consistent throughout your manuscript. References to the equations should be as Eq(1).

$$(\rho_L - \rho_G) \cdot g \cdot V_B = \pi r^2 \frac{\rho_L U_0^2}{2} \cdot f \quad (1)$$

Inside the equations please use font Arial, size 9 pt as for the main text. If this is impossible, then please use at smallest 8 pt font size. Leave some extra spacing above and below the equation inside the equation paragraph (recommended 6 pt before and 6 pt after), left align the equation and put the number of the equation flush-right. You may use a Right Tab on the right margin. It is strongly recommended to use a 1-row table without grid lines, as shown in the example, as this guarantees correct vertical alignment (middle).

10. Figures and tables

10.1 General

Figures and tables should be originals or sharp prints; they must be well readable without enlarging with the zoom. Illustrations will be in colour in the electronic version and black and white in case of printed version. The authors must make sure that the figures are legible and understandable in greyscale mode. Avoid referencing your text to coloured items in the figures. All these means will be lost after the printing and will create misunderstanding to the reader.

Figures and tables should preferably be placed either at the top or at the bottom of the page. Please do not render tables as pictures, not use small font size in the tables. Please do not use too small font sizes in the pictures. These methods reduce the legibility severely, resulting in poor reader experience.

All figures and tables should have captions with labels “Figure” and “Table”. Please make sure that the label words start with capital letters. The cross-references to the figures and the tables should use only label and number, labels also starting with capital letters.

Inside figures and tables please use font Arial, size 9 pt as for the main text. If this is impossible, then please use Landscape tables. In figures please avoid using picture frames. Both figures and their captions should be placed flush-left.

10.2 Tables

Set table number and title flush left above table. Horizontal lines should be placed above and below table headings and at the bottom of the table. Vertical lines should be avoided. Title should use Arial 9 (the same font size as the main text), italic, with 12 pt before and 4 pts below the paragraph, left justified at the top of the table.

Tables have to be included into the text. If a table is too long to fit one page, the table number and heading should be repeated on the next page before the table is continued. Alternatively the table may be spread over two consecutive pages (first an even numbered, then an odd-numbered page) turned by 90°, without repeating the heading. Please do not use bold font in tables.

Table 1: Table title (Style: CET-table-title)

Heading1	Heading	Heading
	2	3

Table size can be edited

10.3 Figure captions

[Style: CET Caption]

Figure 1: Captions should be placed below each illustration, font Arial, Italic, 9 pts, with 12 pt before and 12 pts below the paragraph. Figures and figure captions should be placed flush-left; two narrow figures may be placed side-by-side.

Please make sure that the captions are on the same page with the relevant figures and tables. Please reference figures in the text by writing: e.g. Figure 1. (do not use Fig.). The caption should start with a capital letter. Please keep the caption short – taking preferably 1 line, maximum 2.

10.4 References in the text

In order to give our readers a sense of continuity, we encourage you to identify CET articles of similar research in your papers. Please, do a literature check of the papers published in CET in recent years (2013 - 2014) at www.aidic.it/cet.

Using a list of lumped references is not helpful to the readers. If you need to use more references at least a short assessment/justification should be provided – individually. This can be done by mentioning 1 or 2 phrases per reference to show how it is different from the others and why it deserves mentioning.

Citation in the text to a literature source, is given by the surname of the author(s) followed by the year of publication, e.g. "Smith (1984) has reported ..., which was recently confirmed (Jackson and Sharp, 1986)." For references with more than two authors, text citations should be shortened to the first author followed by "et al." However, in the list of References the names and initials of all authors should be mentioned. Just "et al." is neither ethical nor politically correct. Using multiple references in a sequence is not very helpful for a reader. If you need to use more references at least a short assessment/justification should be provided.

Two or more references by the same author published in the same year are differentiated by the letters a, b, c, etc. immediately after the year. The references should be listed in alphabetical order in the list of References.

11. Conclusions

It is mandatory to have conclusions in the manuscript. This ensures completeness of the presentation as well as provides the readers with an idea about the significance of the achievements in the presented work. The conclusions should point out the significance of the presented work. It is advised that the contained quantitative reasoning where appropriate, comparing the obtained results to previous work or appropriate benchmarks. Please do not make another abstract.

Acknowledgments

In case of Acknowledgments, please add this paragraph after Conclusions and do not number it.
[Style: CET Acknowledgements]

Reference

Do not number the References paragraph [Style: CET Reference]

References are prepared according to the Harvard style (name/year system). Please be sure that your references strictly follow the rules here below reported. Otherwise your paper will not be accepted for publication into the volume.

The articles in press should be used only if they have been accepted and have already allocated their DOI:

When referencing conference proceedings page numbers should be provided, when proceedings are not available the lecture identification – e.g. a lecture number or a poster number.

When you are referencing websites an author or authoring institution should be provided. The date of the last access should be provided as well.

The hyperlinks (blue colour and underlining) should be removed from email addresses and web references.

You do not need to repeat http:// as modern browsers. However the date of the last access should be always provided.

For books, thesis, report etc. - please provide both the place and country where the book was published.

Please make sure that all entries in the list of references are cited in the text and that all citations in the text have entries in the references list.

[Style: CET Reference-text]

Bonzel H.P., Bradshaw A.M., Ertl G., Eds., 1989, Physics and Chemistry of Alkali Metal Adsorption. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands

Hertel T., Over H., Bludau H., Gierer M., Ertl G., 1994a, The invention of a new solid surface, Surf. Sci. 301, 10-25.

Hertel T., Over H., Bludau H., Ertl G., 1994b, Phys. Rev. B 50, 8126. Kern K., 1994, The Chemical Physics of Solid Surfaces, vol. 7: Phase Transitions and Adsorbate Restructuring at Metal Surfaces, Eds. King D.A., Woodruff D.P., Elsevier, Amsterdam, the Netherlands.

Silva, D, M. Redução da incrustação em fornos industriais através da produção de briquetes com 60 resíduos de biomassa de macrófitas aéreas associadas a resíduo de gesso.

Kjurkchiev N., Andreev A., 1990, Two-sided method for computation of all multiple roots of an algebraic polynomial, Serdica 15, 302-330 (in Russian).

Rico-Ramirez V., Napoles-Rivera F., Gonzalez-Alatorre G., Diwekar U., 2010, Stochastic optimal control for the treatment of a pathogenic disease, Chemical Engineering Transactions, 21, 217-222, DOI: 10.3303/CET11226001

WWF (World Wide Fund for Nature), 2002, Living planet report <www.wwf.de> accessed 20.01.2011.

COMPROVANTE DO ACEITE DO ABSTRACT DO TRABALHO SUBMETIDO

On Nov 9, 2016, at 8:51AM, ICheaP13 <icheap13@aidic.it> wrote:

We have already received the request from Dr. Leonie Sarubbo and fixed the issue

Abstract reference # 13

"INDUSTRIAL REUSE OF WATER FROM CHEMICAL WASHING OF RESIDUAL FRYING OIL "

has been accepted.

Thank you.

Best regards

COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO TRABALHO COMPLETO

www.aidic.it/icheap13/

ICheaP13 Milano, 28-31 May 2017

VENUE KEY DATES CONTACTS COMMITTEES

promoted & organized by AIDIC

HOME About the ICheaP Series Topics Publication Policy Full papers Submission updated December 1st 2016

jointly organized with EFF2017: Engineering Future Food.

International Conference
ICheaP13
Milano 28-31 May 2017

Manuscript Submission

file 17santana.docx.docx has been uploaded. We confirm the receipt. No further confirmation via email will follow. Thank you!



<http://www.aidic.it/icheap13>

Re: Notification of abstract acceptance

TO THE CORRESPONDING AUTHOR
Valdemir Santos<valdemir.alexandre@hotmail.com>

PROMOTED AND ORGANIZED BY



The Italian Association of Chemical Engineering

VENUE

Hotel MICHELANGELO
Piazza Luigi di Savoia, 6,
Milano, Italy

SCIENTIFIC COMMITTEE

CO-CHAIRMEN
SANTOS, VALDE MIR

On behalf of the ICheapP13 ISC we are pleased to inform you that the abstract

(Reference # 14)

"UTILIZATION OF PLASTER WASTE FOR REDUCING THE FOULING CAUSED BY DIRECT BURNING OF VEGETABLE BIOMASS"

by: Silva D., Santos L., Santos V., Sarubbo L.

has successfully passed the first evaluation step

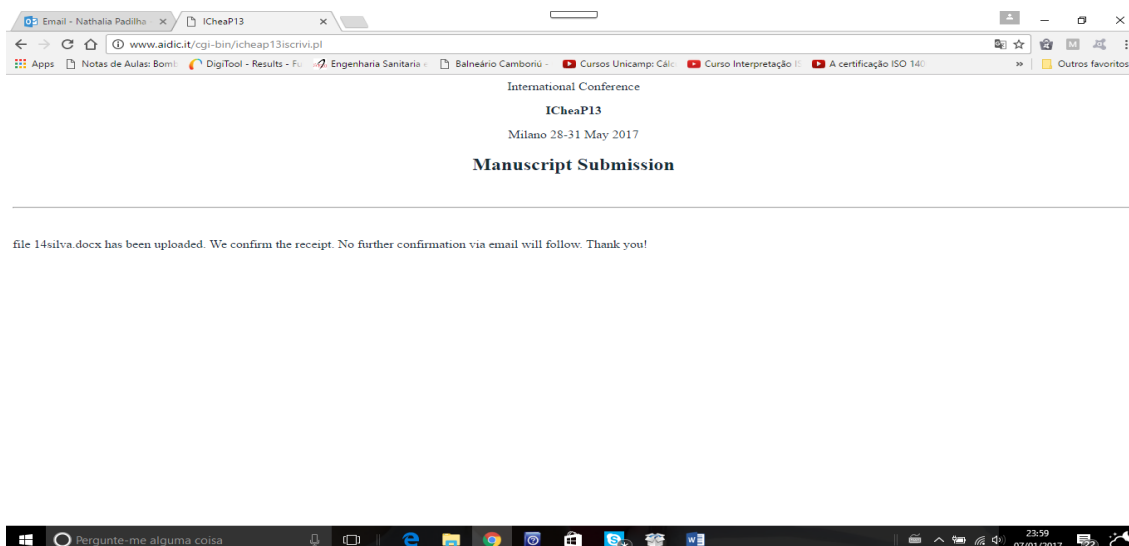
You are herewith invited to submit the full paper for final evaluation at

www.aidic.it/icheap13/fullpaper.htm

Please upload the paper as early as possible and no later than January 9th, 2017

Full papers will be evaluated by at least two reviewers for the technical content - according to the publication policy <http://www.aidic.it/icheap13/CETpublication.htm>

COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO TRABALHO COMPLETO



TRABALHO COMPLETO



Utilization of Plaster Waste for Reducing the Fouling Caused by Direct Burning of Vegetable Biomass

Devanchirles M. A. da Silva^a, Nathália Maria P. da Rocha e Silva^{b,c}, Leonardo B. dos Santos^{a,b}, Leonie A. Sarubbo^{a,b}, Valdemir A. dos Santos^{a,b}

^aCentre of Science and Technology, Catholic University of Pernambuco, Rua do Príncipe, n. 526, Boa Vista, Cep: 50050-900, Recife-Pernambuco, Brazil

^bAdvanced Institute of Technology and Innovation – IATI, Rua Carlos Porto Carreiro, n. 70, Boa Vista, CEP: 50070-090, Recife, Pernambuco, Brazil

^cNortheast Biothechnology Network,,Federal Rural University of Pernambuco, Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, CEP: 52171-900, Recife, Pernambuco, Brazil

valdemir.alexandre@hotmail.com

The formation of fouling in the walls of the combustion chambers has been a limiting factor for the use of solid biomass as fuel for direct burning in non-rudimentary furnaces. Despite its high lignin content, with high Calorific Power, the biomass composed of residues of floating species of the *Eichhornia crassipes* species has been subject to restrictions of use. To contribute with the technology of adaptation of solid biomass use in furnaces of superior technology the present work carried out studies on the addition of gypsum residues to briquettes of macrophytes residues. The proposed technique was based on the formation of a liquid mass rich in calcium oxide formed during the thermal decomposition of gypsum waste. Similar to the hydrated gypsum residue, calcium oxalate contained in the pruning residues of macrophytes releases CaO molecules, which are maintained in the partially liquefied mass of gypsum waste added to the briquettes of macrophyte residues. Experiments were carried out to quantify and qualify the influence of gypsum content on the composition of macrophyte briquettes, using a treatment-type design. Measurements of the ICP (Inductively Coupled Plasma) of the briquettes were performed using a Parr® calorimeter. Box plot graphs recorded ICP results of briquettes and fouling formation based on the content of hydrated gypsum. The ICP of briquettes containing 4.0% gypsum residues showed a mean value similar to that of wood (3290 kcal/kg), presenting advantages of reducing the number of deforestation and not being a food material.

1. 0 Introduction

Solid biomass is an abundant resource that can be produced in agriculture, forestry and aquatic systems. This biomass is mainly composed of cellulose, hemicellulose, lignin and smaller amounts of other extractable components such as pectins,

glycoprotein proteins, fatty compounds (cutin, suberin and waxes), oxalates, tannins and resins, as well as minerals such as silica, calcium carbonate and water (Tanger et al., 2013). Agricultural products, including plant and animal substances, forest residues, industrial wastes and the biodegradable part of industrial and urban wastes are its main sources (Ozcan et al., 2014).

The use of solid waste as a source of energy can be accomplished by direct burning (Rakatoarisoal et al., 2015) or by the production of a biogas (Cotana et al., 2015). In direct burning it is usually used its compacting or agglomeration (briquettes), providing a series of advantages. Among these advantages, when compared to the use of this biomass in the natural state, are the facilities of storage, handling and increase of density, with consequent improvement of calorific power. This form of briquetting for solid biomass allows the same to be used in different types of burners (Rezania et al., 2016).

Aquatic macrophytes are an important community in shallow-water ecosystems, possessing a high rate of primary production, participating in nutrient recycling and providing food for herbivores and detritivores. Floodplain lakes of the Brazilian region are rich in aquatic macrophytes, including the abundant free-floating water hyacinth *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms (Pontederiaceae) (Villamagna and Murphy, 2010).

The biomass of the floating macrophytes of the species *Eichhornia crassipes* has a higher lignin content, which has a calorific value of 5,995 kcal/kg and a lower cellulose content, with a calorific value of 3,797 kcal/kg. This composition allows the classification of the biomass as an excellent biofuel due to the High Calorific Power (HCP) value attributed to lignins. However, other factors should be considered, such as ash and silica (Tavares and Santos, 2013). These macrophytes are herbaceous plants, having non-woody stems, which becomes a limiting factor for direct combustion. They also have high ashes content, which makes their use in boilers limited, because it can cause damage due to formation of fouling originated during the thermal decomposition process of the calcium oxalate. Generally, a high ash content results in problems such as slag production (D'agua et al., 2015). The thermal decomposition of the calcium oxalate present in the macrophyte residues leads to the formation of calcium carbonate, which in turn decomposes into CaO and CO₂. Since CaO is a fouling substance, these macrophytes are indicated as direct burning biofuels only for rudimentary furnaces.

In this work, gypsum residues were mixed in the composition of briquettes to reduce the risk of fouling during the direct burning of macrophytes of the species *Eichhornia crassipes*, which would allow their use as fuel for any type of thermal equipment.

12. Material and Methods

12.1 Macrophytes

The individuals of *E. crassipes* (Crema et al., 2012) were collected in natural freshwater habitats in Recife city, Pernambuco State, Brazil, where the species is abundant (Figure 1).



Figure 1: Free-floating water hyacinth *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms (Pontederiaceae)

12.2 Preparation of The Residues of Macrophytes

Macrophyte pruning residues were obtained from a constructed wetland (Rakatoarisoal et al., 2015) for the treatment of oily water. The residues were left to dry under the sun for about 2 days. Then they were ground and kept in an oven at 50°C until constant weight. From these residues briquettes were made, without and with the addition of residues of hydrated gypsum, to monitor the calorific power and the masses of the fouling left in the walls of the chambers where these briquettes were burned, as will be described next.

12.3 Thermal Decomposition of Hydrated Plaster

In a reaction medium containing gypsum ore ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) or hydrated gypsum residue, which has the same molecular constitution, when temperatures reach 60 to 160 °C, around the atmospheric pressure, a thermal dehydration reaction begins (Paulik et al., 1992). This loss of ε water molecules, where ε can vary from 0.0 to 0.5, may give rise to a semi-hydrate called gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$), depending on the reaction time. When the medium reaches a temperature around 200 °C, this material loses almost all its water of hydration and a calcium sulfate is obtained with little or no hydration capacity ($\text{CaSO}_4 \cdot \varepsilon\text{H}_2\text{O}$), receiving the denomination of soluble Anhydrite or III, of instable character. The value of ε is in the range of 0.06 to 0.11 mol of water per mol of Anhydrite. When it reaches about 400°C, the Anhydrite III becomes Anhydrite II ($\varepsilon \cong 0$). The latter form is of slow hydration and since the transformation process from phase III to phase II is exothermic, the transformation is very rapid and non-reversible to rehydrate half of the anhydrite and at 800°C the product is considered to be of difficult rehydration. During the decomposition of the hydrated gypsum residue, or gypsum ore, the formation of a pseudo-liquid state is observed, which is why gypsum furnaces have a bulkhead to prevent material leakage (Melo, 2012). The formation of this liquefied state of the gypsum mass can be used to agglutinate CaO or MgO molecules, avoiding the formation of fouling (CaO or MgO) in the final reaction step, which can migrate to the walls of the combustion chamber that delimit the reaction medium.

12.4 Thermal Decomposition of Calcium Oxalate

Calcium oxalate monohydrate, responsible for fouling on the walls of the combustion chambers, is thermally decomposed according to these three steps (Rak et al., 1995):

Step 1: $\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaC}_2\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O}$ (96.8 °C and 186.4 °C)

Step 2: $\text{CaC}_2\text{O}_4 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}$ (380.4 °C and 491.9 °C)

Step 3: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (579.9 °C and 734.9 °C)

The laboratory experiments allow to identify the temperatures corresponding to the beginning and end of each thermal event, besides the maximum temperature represented by the Derivative Thermogravimetric (*DTG*) peak. Based on the *Thermogravimetric Analysis* (TGA) data, it is possible to recognize the decomposition bands and even calculate the mass variations due to losses of water, CO and CO₂.

2.5 Production and Burning of Briquettes

According to D'Agual et al. (2015), the macrophyte biomass is viable for the manufacture of briquettes and for its later use as solid fuel. These authors observed that for the formation of briquettes no heating and binders were necessary because this biomass had a sufficient moisture content in relation to other materials. Thus, the high yield of green matter, its periodicity and abundance outperform other biomasses used commercially, proving to be a viable alternative energy for Ibero-American countries.

To prepare the briquettes, the residue of the macrophytes were dried to a moisture content of 13% on a wet basis, determined using a thermobalance (Figure 2). The biomass was weighed and the briquettes were made with 100% macrophyte residues with 2.0, 4.0, 6.0 and 8.0% of gypsum residues. These percentages were calculated as a function of an average value of 1.51% of the calcium content commonly found in floating macrophytes of the *Eichhornia crassipes* species, according to Tabuti et al. (1998). The strategy to verify the ICP values of the briquettes with about 4 times more gypsum than the one corresponding to the calcium present in the macrophytes biomass was to observe the reduction of the quality of the biofuel with the percentage of gypsum added to the briquettes.



Figure 2: Determination of the moisture of briquettes produced from residues of macrophytes and residues of hydrated gypsum

2.6 Experimental Planning

The experiment was carried out in accordance with an experimental design of a single factor, for which the content of gypsum residues was chosen in the preparation of briquettes. The response variable was the PCI of the briquette as a function of gypsum content. A Parr® calorimeter was used to obtain average values of macrophyte residue and gypsum residue briquettes. This apparatus was sealed with high temperatures and no heat transfer. The ignition occurs by an internal wire in the calorimeter that through electric current burns the sample, in the pump there is a known quantity of water, from the heat produced by the combustion of the sample that heats the water.



Figure 3: Experiments of briquettes burning with the aid of a blowtorch for visual identification of fouling levels as a function of the content of gypsum waste

13. Results and Discussion

Box plot graphical methods were used as a statistical tool to describe the results obtained (Carter et al., 2009). The graph of Figure 4 illustrates the influence of the hydrated gypsum content on the calorific value of the pruning residue briquettes of macrophytes of the *Eichhornia crassipes* species. A decrease in the calorific value is observed in the graph with the increase of the gypsum content in the composition of the briquettes. It is also observed that a maximum percentage of 4.0% m / m can be used as a dosage of residue of gypsum hydrate, as this percentage reduced scale formation and kept the Lower Calorific Power close to the wood. In the dosages of 2.0%, 6.0% and 8.0% of the residue of gypsum hydrate there was no formation of incrustation however there was a reduction of the Lower Calorific Power.. In this case, the briquettes of macrophytes can be used as solid fuel with a calorific value similar to that of wood, as determined by Telmo and Lousada (2011), of the order of 3290 kcal/kg.

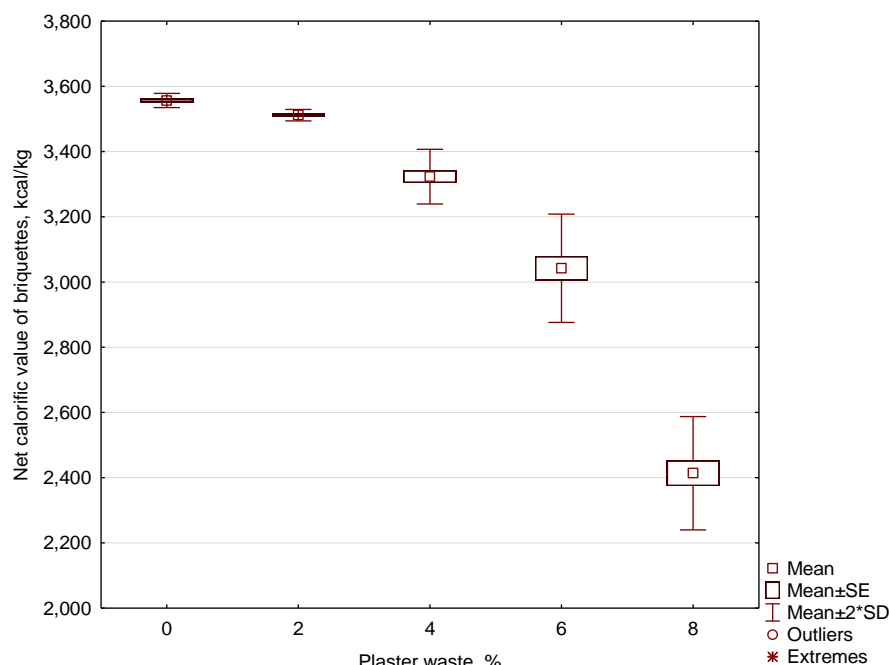


Figure 4: Heat energy of the pruning waste macrophytes (*Eichhornis crassipes*) briquettes as a function of the content of hydrated gypsum residues

Residues resulting from fouling left in the crucibles where the briquettes were burned, with different percentages of hydrated gypsum, had their fouling contents evaluated and placed on a box plot graph (Figure 5). In this figure the data used in the had their values normalized as a function of the visual difficulties to differentiate the amount of mass retained in each fouling.

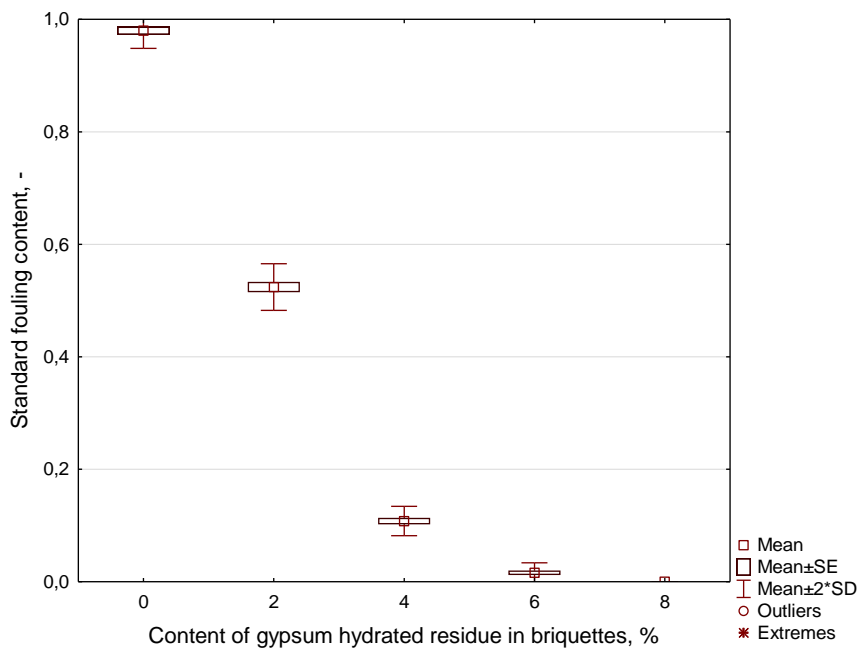


Figure 5: Fouling content produced by the briquettes as a function of the percentage of hydrated gypsum

14. Conclusion

The floating macrophytes of the *Eichhornia crassipes* species have long been known to be true pests in lakes and rivers for reducing survival conditions of aquatic fauna. This work presented an attractive alternative for the use of pruning residues of these macrophytes, associated with residues of hydrated gypsum, as solid biofuel of high ICP and reduction of incrustations, reducing the maintenance time of furnaces used for their combustion.

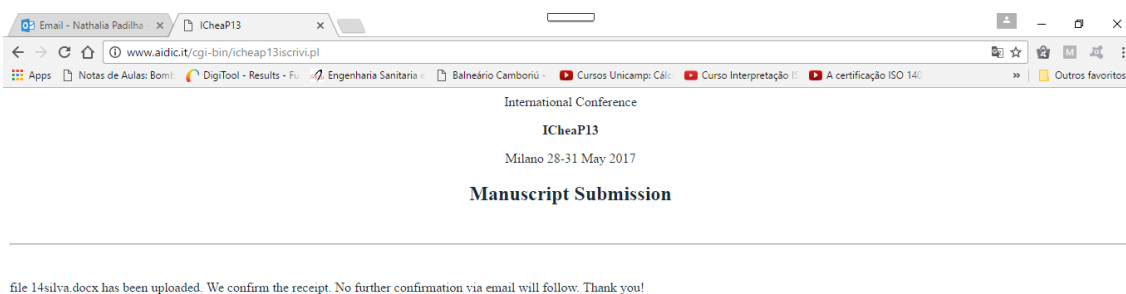
Acknowledgments

This study was funded by the Foundation for the Support of Science and Technology of the State of Pernambuco (FACEPE), the Research and Development Program from National Agency of Electrical Energy (ANEEL) and Thermoelectric Candeias Energia (Global Group), the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq), and the Coordination for the Improvement of Higher Level Education Personnel (CAPES). The authors are grateful to the laboratories of the Centre for Sciences and Technology of the Universidade Católica de Pernambuco, Brazil.

References

- Carter, N.J., Schwertman, N.C., Kiser, T.L., 2009, A comparison of two boxplot methods for detecting univariate outliers which adjust for sample size and asymmetry. *Statistical Methodology*, 6, 604–621.
- Cotana, F., Cavalagio, G., Petrozzi, A., Coccia, V., 2015, Lignocellulosic biomass feeding in biogas pathway: state of the art and plant layouts. V.31. p. 31-39. *Energy Procedia*, 81, 1231–1237.]

- Crema, L.C., Biudes, J.F.V., Camargo, A.F.M., 2012, Effect of Urucu oil (Brazilian Amazon) on the biomass of the aquatic macrophyte *Eichhornia crassipes* (Mart.) Solms (Potentillaceae). *Acta Limnologica Brasiliensia*. 23, 406-411.
- D'agual, J.A. C.B., Pereira, R.G., Marinho, F.J.V., 2015, Preparacion y Carcterización Física del Biocombustible Sólido del Lirio Acuático (*Eichhornia crassipes*). *Información Tecnológica*, 26, 53-62.
- Melo, D.C., 2012, Processo de calcinação de Gipsita/resíduos em um forno piloto rotativo contínuo para produção de gesso beta reciclável. Thesis. Federal University of Pernambuco, Recife, Brazil, 109 pp.
- Ozcan, M., Oztürk, S., Oguz, Y., 2015, Potential evaluation of biomass-based energy sources for Turkey. *Eng. Sci. Technol.* 18, 178-184.
- Paulik, F., Paulik, J., Arnold, M., 1992, Thermal Decomposition of Gypsum. *Thermochimica Acta*, 200,195-204.
- Rak, J., Skurski, P., Gutowski, M., Błażejowski, J., 1995, Thermodynamics of the thermal decomposition of calcium oxalate monohydrate examined theoretically. *J. Thermal Anal.*, 43, 239-246.
- Rakatoarisoal, T.F., Waeber, P.O., Richter, T., Mantilla-Contreras, J., 2015, Water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), any opportunities for the Alaotra wetlands and livelihoods. *Madagascar Conservation & Development*, 10, 128-137.
- Rezania, S., Din, M.F.M., Kamaruddin, S.F., Taib, S.M., Singh, L., Yong, E.L., Dahalan, F.A., 2016, Evaluation of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) as a potential raw material source for briquette production. *Energy*, 111, 768-773.
- Tabuti, J.R.S., Oryem-Origa, H., Mutumba, G.M., Kashambuzi, J.K., 1998, Partitioning of soluble calcium in the water hyacinth (*Eichhornia crassipes* (Martius) Solms) in Lake Victoria, Uganda. *Plant Biology*, 111, 4.
- Tanger, P., [Field](#), J.L., Jahn, C.E., DeFoort, M.W., [Leach](#), J.E., 2013, Biomass for thermochemical conversion: Targets and challenges. *Front. Plant Sci.* 4. 1-20.
- Tavares, S.R.L., Santos, T.E., 2013, Uso de diferentes fontes de biomassa vegetal para a produção de biocombustíveis sólidos. *Holos*, 5, 19-27.
- Telmo, C., Lousada, J., 2011, Heating values of wood pellets from different species. *Biomass Bioenergy*, 35, 2534-2539.
- Villamagna, A.M., Murphy, B.R., 2010, Ecological and socio-economic impacts of invasive water hyacinth (*Eichhornia crassipes*): a review. *Freshwater Biol.* 55, 282-298.



<http://www.aidic.it/icheap13>

Re: Notification of abstract acceptance

TO THE CORRESPONDING AUTHOR

Valdemir Santos<valdemir.alexandre@hotmail.com>

PROMOTED AND ORGANIZED BY



The Italian Association of Chemical Engineering

VENUE

Hotel MICHELANGELO
Piazza Luigi di Savoia, 6,
Milano, Italy

SCIENTIFIC COMMITTEE

CO-CHAIRMEN
SILVANO MEDICI

On behalf of the IChEAP13 ISC we are pleased to inform you that the abstract

(Reference # 14)

"UTILIZATION OF PLASTER WASTE FOR REDUCING THE FOULING CAUSED BY DIRECT BURNING OF VEGETABLE BIOMASS"

by: Silva D., Santos L., Santos V., Sarubbo L.

has successfully passed the first evaluation step

You are herewith invited to submit the full paper for final evaluation at

www.aidic.it/icheap13/fullpaper.htm

Please upload the paper as early as possible and no later than January 9th, 2017

Full papers will be evaluated by at least two reviewers for the technical content - according to the publication policy <http://www.aidic.it/icheap13/CETpublication.htm>

On Nov 9, 2016, at 8:51AM, ICheaP13 <icheap13@aidic.it> wrote:

We have already received the request from Dr. Leonie Sarubbo and fixed the issue

Abstract reference # 13

"INDUSTRIAL REUSE OF WATER FROM CHEMICAL WASHING OF RESIDUAL FRYING OIL "

has been accepted.

Thank you.

Best regards