



**POTENCIAL ENERGÉTICO DE *Arundo donax* L. E *Phyllostachys aurea* Rivière  
& C. Rivière NA FORMA DE BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS**

**BRUNO SANT'ANNA CHAVES**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**MARÇO DE 2020**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**POTENCIAL ENERGÉTICO DE *Arundo donax* L. E *Phyllostachys aurea* Rivière  
& C. Rivière NA FORMA DE BIOCOMBUSTÍVEIS SÓLIDOS**

**BRUNO SANT'ANNA CHAVES**

**ORIENTADOR: PROF. DR. AILTON TEIXEIRA DO VALE**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**PPGEFL.DM – 340/2020**

**BRASÍLIA – DF**

**MARÇO DE 2020**

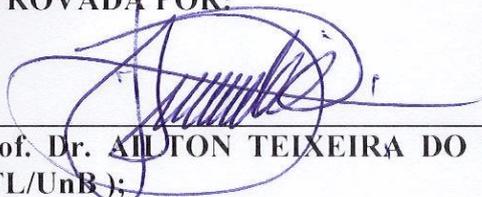
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

“APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE *Arundo donax* L. E *Phyllostachys aurea*  
REVIÈRE & C. REVIÈRE COMO COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS”

**BRUNO SANT’ANNA CHAVES**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

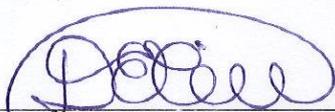
APROVADA POR:



Prof. Dr. AILTON TEIXEIRA DO VALE (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);  
(Orientador)



Prof. Dr. ALEXANDRE FLORIAN DA COSTA (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);  
(Examinador Interno)



Prof. Dr. DIVINO ETERNO TEIXEIRA (Serviço Florestal Brasileiro – SFB);  
(Examinador Externo)

Prof. Dr. CARLOS ROBERTO SETTE JUNIOR (Universidade Federal de Goiás – UFG).  
(Examinador Suplente)

Brasília-DF, 20 de fevereiro de 2020.

## FICHA CATALOGRÁFICA

CC512p	Chaves, Bruno Sant'Anna Potencial Energético de <i>Arundo donax</i> L. e <i>Phyllostachys aurea</i> Rivière & C. Rivière na Forma de Biocombustíveis Sólidos / Bruno Sant'Anna Chaves; orientador Ailton Teixeira do Vale. -- Brasília, 2020. 90 p.
	Dissertação (Mestrado - Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade de Brasília, 2020.
	1. Densidade Energética. 2. Peletização. 3. Torrefação. 4. Pirólise. 5. Briquetagem. I. Vale, Ailton Teixeira do, orient. II. Título.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CHAVES, B. S. Potencial Energético de *Arundo donax* L. e *Phyllostachys aurea* Rivière & C. Rivière na Forma de Biocombustíveis Sólidos, PPGEFL.DM – 340/2020, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Bruno Sant'Anna Chaves.

TÍTULO: Potencial Energético de *Arundo donax* L. e *Phyllostachys aurea* Rivière & C. Rivière na Forma de Biocombustíveis Sólidos.

GRAU: Mestre ANO: 2020

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.



Bruno Sant'Anna Chaves

CNB 3 Lote 12 Apt. 904

72115-035 – Brasília – DF – Brasil.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a meus pais, Liliam e Almir, o amor incondicional e a valente dedicação à minha formação, e agradeço a meus irmãos Daniel e Bárbara o amor conquistado em toda nossa convivência.

Agradeço à minha mulher, Tayná, o amor que escolhemos para toda a vida, e agradeço o apoio e a motivação que me permitiram chegar até aqui.

Agradeço a meus tios Hélio e Ednílton, educadores por vocação, o despertar do gosto pelas ciências e seu constante fomento desde a minha infância.

Agradeço ao meu orientador, professor Ailton, o ensino que me forma na área de energia de biomassa desde os primórdios até agora, e agradeço o direcionamento decisivo em todas as etapas do projeto de mestrado.

Agradeço ao LPF, que me incentivou e me deu apoio material para realizar o projeto, e sobretudo a meus colegas de trabalho, que felizmente considero meus amigos: Lucélia, Luiz Gustavo, Alessandro, Antônio Carlos e Sérgio Almeida. Agradeço especialmente aos colegas seniores que muito me ensinaram: Waldir Quirino, Paulo Fontes e Mário Rabelo; e por último e não menos importantes, a nossos colegas parceiros: Thiago, do IBICT, Patrick, do CIRAD, professor Edgar, da ENM/UnB e Normando, estagiário do LPF.

Agradeço aos membros da banca, professor Alexandre, PhD Divino e professor Carlos Sette, a aceitação do convite e a disponibilidade para aperfeiçoar esse trabalho.

Agradeço aos professores e técnicos do Departamento de Engenharia Florestal a oportunidade que tive de vivenciar o mestrado. Em especial, agradecimentos ao Vanduí, que me apoiou no Laboratório de Tecnologia da Madeira da EFL/UnB.

Agradeço ao CPAB – Centro de Pesquisa e Aplicação de Bambu e Fibras Naturais, na pessoa do professor Jaime, o importante apoio ao projeto.

Agradeço aos servidores do ICMBio Verusca Cavalcante, da APA Planalto Central, e Alexandre, do Parque Nacional de Brasília, as informações dadas para a pesquisa e a orientação dada na visita ao parque.

Agradeço ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio financeiro concedido para adquirir materiais de consumo.

Finalmente agradeço a meus amigos e a meus familiares o incentivo e a paciência com a minha capacitação. Agradeço à Pituxa, que contribuiu com a digitação desse trabalho à sua maneira, quando resolvia se deitar sobre o teclado. E agradeço aos meus outros filhotes adotivos: Aquiles, Figaro, Tina, Tolteco e Inca por carinhosamente roubarem minha atenção em momentos decisivos.

## RESUMO

O estudo caracterizou para uso energético as gramíneas *Arundo donax* L. e *Phyllostachys aurea* Rivière & C. Rivière provenientes de populações invasoras do DF. Foram aplicados seis tratamentos: *in natura*, briquete, péletes, torreficado, carvão e briquete após torrefação. Os produtos foram analisados quanto aos parâmetros: teor de umidade, densidade, densidade do granel, poder calorífico superior e inferior, rendimentos gravimétrico e energético, densidade energética sólida e do granel, e análise química imediata. A torrefação a 220°C impactou significativamente as propriedades energéticas enquanto manteve o rendimento energético inferior acima de 98% para *Arundo donax* e de 99% para *Phyllostachys aurea*. A carbonização resultou em melhores propriedades para *Phyllostachys aurea* em relação a *Arundo donax*, com maior teor de carbono fixo (73,6% vs. 69,1%), menor teor de cinzas (4,2% vs. 9,1%) e maior densidade energética. A briquetagem após torrefação apresentou maior densidade energética do granel em comparação aos demais tratamentos de compactação, enquanto péletes apresentaram densidade energética sólida equivalente à briquetagem após torrefação.

**Palavras-chave:** Briquetagem, Peletização, Torrefação, Pirólise, Densidade Energética

## ABSTRACT

### **Energy Potential of *Arundo donax* L. and *Phyllostachys aurea* Rivière & C. Rivière as Solid Biofuels.**

This study has characterized the grass species *Arundo donax* L. and *Phyllostachys aurea* Rivière & C. Rivière for energy use, both collected from invasive populations in Brazilian's Federal District. There were six treatments: raw, briquette, pellets, torrefied, charcoal and torrefied briquette (briquetting after torrefaction). Treatment products have been evaluated from the following parameters: moisture, specific gravity, bulk density, gross/net calorific value, mass yield, energy yield, energy density, bulk energy density and proximate analysis. Torrefaction at 220°C had significant impact on energy properties while retained net energy yields on values above 98% for *Arundo donax* and 99% for *Phyllostachys aurea*. Charring resulted in better parameters for *Phyllostachys aurea* in comparison with *Arundo donax*, such as higher fixed carbon (73,6% vs. 69,1%), lower ash content (4,2% vs. 9,1%), and higher energy density. Torrefied briquettes had higher bulk energy density among compaction treatments, while pellets had solid energy density equivalent to torrefied briquettes.

**Keywords:** Briquette, Pellets, Torrefaction, Pyrolysis, Energy Density

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>20</b>
2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS ESPÉCIES .....	20
2.2 USOS TECNOLÓGICOS DAS ESPÉCIES .....	22
2.3 TECNOLOGIAS PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DAS ESPÉCIES .....	23
2.3.1 <i>Tecnologias de conversão aplicadas a Arundo donax</i> .....	24
2.3.2 <i>Tecnologias de conversão aplicadas a Phyllostachys aurea</i> .....	25
2.4 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS ENERGÉTICOS DAS ESPÉCIES....	26
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>28</b>
3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS .....	28
3.1.1 <i>Coleta das amostras</i> .....	28
3.1.2 <i>Seleção das amostras para os tratamentos</i> .....	30
3.1.3 <i>Preparo das amostras para densificação</i> .....	30
3.2 PROTOCOLOS DOS TRATAMENTOS .....	32
3.2.1 <i>Torreção</i> .....	32
3.2.2 <i>Carbonização</i> .....	33
3.2.3 <i>Briquetagem</i> .....	36
3.2.4 <i>Peletização</i> .....	37
3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS PRODUTOS .....	38
3.3.1 <i>Densidade do granel</i> .....	39
3.3.2 <i>Densidade sólida e determinação dos teores de umidade</i> .....	40
3.4 CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS PRODUTOS.....	42
3.4.1 <i>Preparação das amostras de caracterização</i> .....	42
3.4.2 <i>Análise imediata</i> .....	42
3.4.3 <i>Poder calorífico superior e inferior</i> .....	43

3.4.4. <i>Densidade Energética</i> .....	45
3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	46
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>48</b>
4.1 TRATAMENTO <i>IN NATURA</i> .....	48
4.2 CARBONIZAÇÃO .....	49
4.2.1 <i>Arundo donax</i> .....	49
4.2.2 <i>Phyllostachys aurea</i> .....	53
4.2.3 <i>Comparação da carbonização entre espécies</i> .....	57
4.3 TORREFAÇÃO .....	60
4.3.1 <i>Arundo donax</i> .....	60
4.3.2 <i>Phyllostachys aurea</i> .....	63
4.3.3 <i>Comparação da torrefação entre espécies</i> .....	65
4.4 BRIQUETAGEM.....	69
4.4.1 <i>Briquetagem da matéria-prima in natura</i> .....	69
4.4.2 <i>Briquetagem da matéria-prima torrificada</i> .....	70
4.5 PELETIZAÇÃO.....	71
4.6 CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS .....	75
4.6.1 <i>Teor de umidade dos tratamentos</i> .....	75
4.6.2 <i>Densidade sólida e densidade do granel</i> .....	77
4.6.3 <i>Poder calorífico superior e poder calorífico inferior</i> .....	78
4.6.4 <i>Densidade energética</i> .....	80
4.6.5 <i>Rendimentos sólidos e energéticos dos tratamentos termoquímicos</i> .....	81
4.6.6 <i>Análise Imediata</i> .....	83
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>85</b>
<b>6 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>87</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Teor de hidrogênio adotado para cada tratamento.....	45
Tabela 2 – Caracterização inicial das propriedades físicas dos tratamentos <i>in natura</i> . .	48
Tabela 3 – Teor de lignina das espécies do estudo e de <i>Eucalyptus</i> sp.....	58
Tabela 4 – Teores de umidade dos tratamentos e respectivos coeficientes de variação	75
Tabela 5 – Valores médios de densidades e teste de médias de Tukey*.....	77
Tabela 6 – Poder calorífico superior e inferior e respectivos coeficientes de variação..	79
Tabela 7 – Valores médios das densidades energéticas e teste de médias de Tukey* ...	80
Tabela 8 – Rendimentos gravimétricos sólidos seco e em umidade de equilíbrio, e rendimentos energéticos superior e inferior com respectivos coeficientes de variação .	82
Tabela 9 – Valores médios de carbono fixo, cinzas e matérias voláteis e teste de médias de Tukey*.....	83

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Tratamentos da esquerda para direita: <i>in natura</i> , briquete, péletes, torreficado, carvão e briquete após torrefação. Na linha superior <i>Arundo donax</i> , e na inferior <i>Phyllostachys aurea</i> .....	28
Figura 02 – Coleta de colmo (A) e desfolhamento (B). .....	29
Figura 03 – Corpos de prova de <i>Phyllostachys aurea</i> com destaque para as três classes de posição axial, topo (T), meio (M) e base (B).....	29
Figura 04 – Moinho de martelos e classificação em peneira do material moído. ....	31
Figura 05 – Sistema de torrefação .....	32
Figura 06 – Interior do reator de torrefação com amostra de <i>Arundo donax</i> sobre o pedestal da balança, e à direita as resistências elétricas acima e abaixo e o termopar de controle de temperatura entre elas. ....	33
Figura 07 – Reator de carbonização, com a abertura para acomodar até 20 litros de biomassa (A), e recipiente com amostra para carbonização, com cilindro metálico ao centro para abrigar o termopar que monitora a temperatura no interior da amostra (B).34	
Figura 08 – Sistema de condensação (A) e o bico de Bunsen para queimar os gases não condensáveis (B) .....	34
Figura 09 – Briquete em produção nos pistões (A) e resfriando em molde após compactação (B). ....	36
Figura 10 – Péletes de <i>Arundo donax</i> sendo recolhidos na saída do equipamento .....	37
Figura 11 – Triedro confeccionado para medição do volume do granel .....	39
Figura 12 – Repetições de briquetes e uma de péletes de <i>Phyllostachys aurea</i> para densidade e umidade.....	41
Figura 13 – corpos de prova rachados no sentido longitudinal, e o teste de densidade pelo método de Arquimedes .....	41
Figura 14 – Ensaio de Matérias voláteis em forno mufla, e o produto resultante composto de carbono fixo e cinzas .....	43

Figura 15 – Amostras para a determinação de Poder Calorífico Superior: péletes prensados a frio.....	44
Figura 16 – Amostra de carvão sendo equilibrada com água destilada borrifada. ....	44
Figura 17 – Chama sustentada durante fase exotérmica da carbonização de <i>Arundo donax</i> . ....	51
Figura 18 – Detalhe em destaque da resina na parte superior do briquete de <i>Arundo donax</i> .....	70
Figura 19 – Aspecto geral de péletes de <i>Arundo donax</i> (A) e <i>Phyllostachys aurea</i> (B)	73

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Perfis de temperatura das carbonizações de <i>Arundo donax</i> e a curva média Ta.....	49
Gráfico 2 – Perfil térmico com derivada da temperatura interna da carbonização de <i>Arundo donax</i> .....	50
Gráfico 3 – Média dos rendimentos gravimétricos para carbonização de <i>Arundo donax</i> .....	52
Gráfico 4 – Perfis de temperatura das carbonizações de <i>Phyllostachys aurea</i> e a curva média Ta .....	53
Gráfico 5 – Perfil térmico com derivada da temperatura interna da carbonização de <i>Phyllostachys aurea</i> .....	54
Gráfico 6 – Média dos rendimentos gravimétricos para carbonização de <i>Phyllostachys aurea</i> .....	56
Gráfico 7 – curvas de temperatura Ta médias para carbonização das duas espécies. ....	57
Gráfico 8 – curvas de derivada da temperatura dTa para carbonização das duas espécies. ....	58
Gráfico 9 – Média dos rendimentos gravimétricos em base seca entre as espécies.....	59
Gráfico 10 – Perfis termogravimétricos das torrefações de <i>Arundo donax</i> e curva média de rendimento gravimétrico RG .....	61
Gráfico 11 – Temperatura do processo e derivada da perda de massa para torrefação de <i>Arundo donax</i> .....	62
Gráfico 12 – Perfis termogravimétricos das torrefações de <i>Phyllostachys aurea</i> e curva média de rendimento gravimétrico RG .....	63
Gráfico 13 - Temperatura do processo e derivada da perda de massa na torrefação de <i>Phyllostachys aurea</i> .....	64
Gráfico 14 – Curvas Tp e RG para os tratamentos de torrefação das duas espécies.....	65
Gráfico 15 – Curvas Tp e dPM de torrefação de <i>Arundo donax</i> e <i>Phyllostachys aurea</i>	66

Gráfico 16 – Rendimentos gravimétricos sólidos em base úmida das torrefações de <i>Arundo donax</i> e <i>Phyllostachys aurea</i> .....	67
Gráfico 17 – Rendimentos gravimétricos sólidos em base seca das torrefações de <i>Arundo donax</i> e <i>Phyllostachys aurea</i> .....	67
Gráfico 18 – Distribuição granulométrica da matéria-prima para briquetagem de <i>Arundo donax</i> e <i>Phyllostachys aurea</i> . .....	69
Gráfico 19 – Distribuição granulométrica para briquetagem de torreficado .....	71
Gráfico 20 – Distribuição granulométrica da matéria-prima de <i>Arundo donax</i> para peletização .....	72
Gráfico 21 – Distribuição granulométrica da matéria-prima de <i>Phyllostachys aurea</i> para peletização .....	73

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

°C – Graus Celsius

$\eta_{Ei}$  – Rendimento energético inferior

$\eta_{Es}$  – Rendimento energético superior

$\eta_{G0}$  – Rendimento gasoso em base seca

$\eta_{Gu}$  – Rendimento gasoso em base úmida

$\eta_{L0}$  – Rendimento líquido em base seca

$\eta_{Lu}$  – Rendimento líquido em base úmida

$\eta_m$  – Rendimento gravimétrico sólido em base seca

$\eta_{mu}$  – Rendimento gravimétrico sólido em umidade de equilíbrio

A – Amperes

AD – *Arundo donax*

ANOVA – Análise de variância

APA – Área de Proteção Ambiental

ARIE – Área de Relevante Interesse Ecológico

Ca – Cálcio

CF – Teor de carbono fixo

Cz – Teor de cinzas

CABI – Centre for Agricultural and Bioscience International

cm – Centímetros

cm<sup>2</sup> – Centímetros quadrados

CV – Coeficiente de variação

DEG – Densidade energética do granel

DESi – Densidade energética sólida inferior

DESS – Densidade energética sólida superior

DF – Distrito Federal

DG – Densidade do granel

dPM – Derivada da curva de perda de massa na torrefação

DSs – Densidade sólida seca

DSu – Densidade sólida em umidade de equilíbrio

dTa – Derivada da temperatura da amostra no tempo

EUA – Estados Unidos da América

F – Coeficiente da Análise de variância (ANOVA)

FLONA – Floresta Nacional

g – Gramas (massa)

GISD – Global Invasive Species Database

GJ – Gigajoules

h – Horas

H – Teor de hidrogênio elementar

ha - Hectares

ha.ano – Hectare-ano

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ISO – Organização Internacional para Padronização

K – Potássio

kg – Quilogramas

kN – Quilonewtons

kW – Quilowatts

LPF – Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro

m – Metros

m<sup>3</sup> – Metros cúbicos

min – Minutos

MJ – Megajoules

mm – Milímetros

MPa – Megapascal

MV – Teor de matérias voláteis

O<sub>2</sub> – Gás oxigênio

P – Fósforo

PA – *Phyllostachys aurea*

PCI – Poder calorífico inferior

PCS – Poder calorífico superior

PEBD – Polietileno de baixa densidade

pH – Escala adimensional de acidez/alcalinidade, que varia de 0 a 14.

RG – Curva de rendimento gravimétrico na torrefação

S – Sul

Ta – Temperatura da amostra

Td – Temperatura definida na torrefação

ton – Toneladas

Tp – Temperatura do processo

TU<sub>bs</sub> – Teor de umidade base seca

TU<sub>bu</sub> – Teor de umidade base úmida

UnB – Universidade de Brasília

W – Oeste

## 1 INTRODUÇÃO

As gramíneas invasoras *Arundo donax* L. e *Phyllostachys aurea* Rivière & C. Rivière são duas espécies de relevante ameaça à biodiversidade em escala global. Inicialmente foram difundidas em todos os continentes (exceto Antártida) por ação humana, mas rapidamente se difundiram como praga por meio da reprodução assexuada pelo subsolo, inclusive ocupando áreas de vegetação nativa e prevalecendo sobre elas. No contexto do Distrito Federal há populações relevantes dessas gramíneas em áreas de conservação de Cerrado, onde a aplicação de herbicidas não é factível, restando apenas a técnica de cortes sucessivos e correta destinação da biomassa para realizar o controle biológico.

As duas gramíneas são espécies de rápida produção de biomassa na forma de colmos lenhosos, produzindo altos valores de massa seca por hectare ano, dispensando tratamentos silviculturais. Assim, apresentam oportunidades para cultura energética e seus produtos; seja pelo uso direto na forma *in natura* ou indireto com produtos oriundos de processos que valorizem a biomassa como carbonização, torrefação, briquetagem e peletização.

O uso energético é uma alternativa para gerar emprego e renda a partir do manejo dessas espécies nas unidades de conservação, ao passo que a pressão sobre espécies nativas produtoras de lenha e carvão vegetal é parcialmente mitigada. Ademais, há potencial para estabelecimento de culturas energéticas de curto ciclo, desde que haja rigoroso controle para evitar a propagação indesejada.

No presente trabalho as espécies em questão serão analisadas quanto aos ganhos em diversas propriedades físicas e energéticas com a aplicação de conversões mecânicas e termoquímicas para valorizar a biomassa *in natura*, por exemplo: densidade aparente e do granel, teor de umidade, poder calorífico, carbono fixo e densidade energética.

Neste sentido os objetivos são a caracterização energética de diversos biocombustíveis sólidos que podem ser produzidos a partir das biomassas dessas espécies, comparando os tratamentos para cada espécie bem como comparando entre espécies. O estudo também se propõe a discutir os parâmetros técnicos dos processos de conversão mecânicos e termoquímicos para valorizar as biomassas das duas espécies para uso energético.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS ESPÉCIES

*Arundo donax* L., gramínea perene pertencente à família Poaceae, subfamília Arundinoideae, é conhecida como cana do reino e como *giant reed* em inglês. É uma das espécies invasoras mais ameaçadoras do mundo, listada no *Top 100 Global Invasive Species Database* (GISD, 2018). Ela é ambientada a climas tropicais e subtropicais, possui baixa exigência de nutrientes e é tolerante a diversos tipos de solo – incluindo solos com alta salinidade (GISD, 2018) e solos contaminados com metais (NSANGANWIMANA, 2014; BARBOSA, 2014). Essas são algumas características que demonstram sua alta adaptabilidade para prosperar em vários biomas do planeta.

Um dos maiores riscos da invasão pela cana do reino é a sua alta flamabilidade, propriedade relevante para a propagação de incêndios florestais (CALIFORNIA INVASIVE PLANT COUNCIL, 2011). Ademais, após a ocorrência de incêndio, a espécie é novamente ameaçadora para a biodiversidade uma vez que sua forma reprodutiva assexuada e seu elevado vigor a tornam prevalentes sobre as espécies nativas, estas não conseguindo competir por nutrientes, água e luz (BARBOSA, 2014). Esses elementos tornam a invasão por esta espécie especialmente perigosa para o bioma Cerrado, que é muito suscetível a incêndios naturais e antrópicos na época de estiagem.

CABI (2014) cita alguns problemas ambientais e urbanos causados por *Arundo donax*, dentre os quais a invasão de áreas úmidas que tem agravado enchentes durante estações chuvosas. Ademais, durante alagamentos, muitos indivíduos se desprendem do solo e se depositam em sistemas de drenagem, valas agrícolas e até sob pontes, causando bloqueio do escoamento de água e resultando em risco à essas estruturas.

O bambu *Phyllostachys aurea* Rivière & C. Rivière, pertencente à família Poaceae, subfamília Bambusoideae, é chamada de cana da Índia e de *golden bamboo* em inglês. Também se constitui como uma relevante espécie invasora em escala global. De crescimento extraordinariamente rápido, comprovado por um estudo na Universidade de Kyoto, onde foi observado que novos brotos duraram apenas 34 dias para crescerem de 30 cm a 7 metros de altura, apresentando taxa máxima de 3 metros por semana no auge da fase de crescimento. (SUZUKI, 2001).

A cana da Índia foi incluída como espécie invasora preocupante nos portais *invasive.org* e *cabi.org* por sua capacidade de transformar com rapidez a vegetação nativa em bosques monoespecíficos (USDA-ARS, 2014; CABI, 2016). Esta espécie é invasora relevante tanto em áreas de vegetação nativa quanto em áreas antropizadas nos EUA, além de ser considerada praga na Austrália e estar classificada como prioridade de erradicação na Nova Zelândia (MARYLAND DEPARTMENT OF AGRICULTURE, 2016). Nos EUA, o estado de Nova Iorque banuiu a comercialização da espécie (CABI, 2016). A espécie foi introduzida no Brasil por seu valor ornamental e aplicação em diversos usos, como material de construção, artesanato, contenção de erosão e como vara de pescar (PASTORE et al., 2012).

*Arundo donax* e *Phyllostachys aurea* representam ameaça à biodiversidade do Cerrado no DF, constando como invasoras relevantes no Parque Nacional de Brasília, nas APAs Descoberto e Planalto Central e na ARIE Capetinga e Fazenda Água Limpa da UnB. *Arundo donax* ainda consta como invasora em áreas próximas ao Zoológico de Brasília; Jardim Botânico de Brasília, Reserva Florestal do IBGE, FLONA de Brasília e a Reserva Biológica do Rio Descoberto, também em áreas antropizadas como as margens do Lago Paranoá, o Setor Noroeste, o campus da Universidade de Brasília, dentre outras.

Simões et al. (2013) analisaram a invasão de *Arundo donax* no DF, em diversas dessas áreas citadas, e concluíram que o corte dos colmos por roçadeira, medida usualmente aplicada pelo poder público, colaborou para a dispersão da espécie, e não no efetivo controle. Isso porque foi observado que novos indivíduos rebrotaram tanto de rizomas quanto de colmos cortados e deixados em contato com o solo. Assim, a correta destinação dos colmos é fundamental para o controle da espécie.

A principal técnica sugerida para a erradicação dessas espécies é o manejo integrado envolvendo corte manual e aplicação de herbicidas, como o glifosato, sobre os tocos e brotos (Spencer et al., 2008; Gucker, 2009; Pilu et al., 2012), porém essa medida pode representar riscos de contaminação do solo (Barbosa, 2014) ou de áreas úmidas e com curso d'água (GISD, 2018) não sendo factível para realização dentro de Unidades de Conservação. Nesse caso o manejo por cortes sucessivos é a técnica possível para controle das invasões, não obstante ser uma técnica dispendiosa em função do uso intensivo de mão-de-obra. Portanto justificam-se as tentativas de valorização e

aproveitamento da biomassa dessas gramíneas invasoras, cuja comercialização pode abater parte dos custos do manejo.

## 2.2 USOS TECNOLÓGICOS DAS ESPÉCIES

Muitos são os usos tecnológicos de *Arundo donax* por suas características únicas. A gramínea é aproveitada na fabricação de instrumentos musicais por excepcional propriedade acústica (Perdue, 1958; Kolesik et al., 1998); utilizada como material de construção e para varas de pesca (Pilu et al., 2012); também é utilizada por propriedades medicinais (COSENTINO, 2014). Alguns desses usos são também citados para *Phyllostachys aurea*, evidenciando as diversas possibilidades de aproveitamento artesanal da biomassa dessas espécies. Contudo o artesanato atende apenas mercados de nicho, não possuindo escala para lidar com o volume de biomassa disponível.

O aproveitamento energético da biomassa e dos produtos tratados dessas gramíneas invasoras poderia, além de substituir parcialmente o uso de combustíveis fósseis, mitigar a pressão sobre florestas nativas para produção de lenha e carvão vegetal. As matas nativas são a principal fonte de lenha para cocção doméstica no meio rural, e o Cerrado é um dos principais biomas a fornecer madeira para este fim social (VALE, 2002). Viabilizar a utilização energética dessas gramíneas poderia mitigar a pressão sobre as espécies lenhosas nativas do Cerrado.

As espécies *Arundo donax* e *Phyllostachys aurea* apresentam oportunidade como cultura energética em função de sua alta produtividade com curto ciclo de exploração, praticamente dispensando a necessidade de tratamentos silviculturais. Aragón-Garita et al. (2016) avaliaram a produção de péletes para energia a partir de plantios na Costa Rica para cinco espécies promissoras, dentre as quais *Arundo donax* e *Phyllostachys aurea*. O estudo apresentou dados de produtividade para as duas culturas, sendo 25 ton/ha.ano de massa seca para *Arundo donax* e 27,2 ton/ha.ano de massa seca para *Phyllostachys aurea*. Como comparativo, o gênero florestal mais utilizado para energia no Brasil, *Eucalyptus*, apresentou em 2016 produtividade de 36 m<sup>3</sup>/ha.ano (IBÁ, 2017). Se adotarmos densidade básica de 500 kg/m<sup>3</sup>, que é média para plantios energéticos de eucalipto (Carneiro et al., 2014), a produtividade média resulta em 18

ton/ha.ano de massa seca, com todos os tratos silviculturais que envolvem essa cultura tão tecnificada.

Oliveira et al. (2017), avaliaram o potencial energético de *Arundo donax in natura* a partir de populações invasoras no Distrito Federal, e encontraram: indivíduos com altura média de 3,86 m com diâmetro médio de 2,03 cm, produzindo 66,4 ton/ha de massa seca sem qualquer trato silvicultural (produtividade da população sem análise temporal). Concluíram pelo grande potencial energético da biomassa, com maior poder calorífico superior e teor de carbono fixo nas bases dos colmos mais altos e maiores densidades energéticas nos topos de colmos de menores alturas.

Neto et al. (1997) analisaram a composição química de *Arundo donax* em função de diferentes partes do colmo, resultando em teor de lignina variando de 16% a 22% e extrativos de 14% a 23%. Os autores enfatizam que o teor de extrativos é alto em comparação com outras gramíneas. Kang et al. (2011) analisaram o teor de extrativos de três espécies do gênero *Phyllostachys*, apresentando médias entre 1% e 7% para colmos com idade acima de 50 dias. Quanto ao teor de lignina, Maia et al. (2013) obteve média de 26,0% para *Phyllostachys aurea*, próximo ao teor de lignina do gênero *Eucalyptus*, em média 26,2% (BRITO; BARRICHELO, 1997).

### 2.3 TECNOLOGIAS PARA O APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DAS ESPÉCIES

O aproveitamento para fins energéticos é uma solução tecnológica que possibilita aplicação em grande escala. O aproveitamento energético pode ocorrer de forma direta, na combustão do material *in natura*, ou também de forma indireta por meio de processos de conversão que transformam a biomassa em combustíveis de maior valor agregado.

A aplicação de conversões termoquímicas confere à biomassa melhores propriedades energéticas, com concentração de carbono fixo e consequente aumento do poder calorífico (PANWAR; KOTHARI; TYAGI, 2012). A carbonização ou pirólise lenta é um processo majoritariamente exotérmico, realizado em temperaturas de 280°C a 680°C e à baixa taxa de aquecimento (PANWAR; KOTHARI; TYAGI, 2012). A torrefação é um processo majoritariamente endotérmico, consiste em uma pirólise

branda em temperaturas relativamente baixas (200°C a 300°C) (Chen, Peng e Bi, 2015) e à taxa de aquecimento mais rápida em relação ao processo de carbonização.

A densificação por meio de compactação mecânica é uma das soluções para contornar o problema da baixa densidade física e energética, que são desvantagens inerentes à biomassa em seu uso como combustível. A compactação confere à biomassa maior quantidade de energia por unidade de volume, além de homogeneizar o material quanto à granulometria e teor de umidade, viabilizando a logística e o armazenamento desse produto (QUIRINO et al., 2012). Dentre diversas tecnologias de densificação existentes, a peletização e a briquetagem são duas das mais utilizadas e são as únicas que possuem padrões de qualidade definidos por normas internacionais (TUMULURU et al., 2011).

A biomassa lenhosa pode ser compactada na forma de pellets e briquetes sem a necessidade de aditivos aglutinantes (Lam et al., 2013), apresentando vantagem de menor custo de produção em relação às biomassas que requerem aditivos para compactação. As espécies *Arundo donax* e *Phyllostachys aurea* produzem colmos com o interior oco, apresentando densidade aparente e densidade do granel muito inferiores às das espécies lenhosas em geral, portanto a compactação na forma de pellets e briquetes poderá representar substancial incremento da densidade da biomassa dessas espécies.

### **2.3.1 Tecnologias de conversão aplicadas a *Arundo donax***

Diversas pesquisas avaliaram o uso e potencial de *Arundo donax* para fins energéticos, ressaltando o potencial da espécie como cultura energética (Corno et al., 2014; Pilu et al., 2012) e inclusive no contexto do Distrito Federal (OLIVEIRA, 2014).

Saikia et al. (2015) aplicaram pirólise convencional e pirólise rápida em biomassa de *Arundo donax* a fim de quantificar e qualificar o bioóleo produzido, que corresponde à fração condensável dos gases que se volatilizam da degradação térmica do processo. Também trouxeram análises sobre a qualidade do carvão produzido, concluindo que o carvão será um bom produto energético após algum tratamento de densificação. Ademais, o carvão apresentou excelentes características para uso não energético, como carvão ativado para filtragem de contaminantes, também para

adubação e correção de solo ácido – pois o carvão apresentou pH maior que 10, com cinzas ricas em Ca, K e P.

Correia et al. (2017) aplicaram torrefação em diferentes temperaturas a *Arundo donax*, obtendo diferentes qualidades de produtos. Concluíram que as torrefações estabilizaram o teor de umidade final e, conseqüentemente, a disponibilidade de energia útil, e aumentaram significativamente a friabilidade do material. Porém, a temperaturas acima de 250°C houve significativa perda de massa e elevação do teor de cinzas, sendo um produto menos interessante para uso energético e mais para ser aplicado como corretivo de solo.

Ramsurrun e Surrop (2019) discutiram a aplicação de *Arundo donax* torreficado como produto para cogeração de energia em usinas de carvão mineral, concluindo ser viável substituir o uso do carvão mineral pela biomassa torreficada sem a necessidade de adaptações significativas às usinas existentes, e que a espécie foi escolhida precisamente por sua alta produtividade a baixo custo.

Aragón-Garita et al. (2016) realizaram peletização de *Arundo donax* para uso energético, produzindo péletes com baixo teor de umidade e alto valor de energia útil, além de maior densidade sólida e menor índice de rachaduras, sendo indicativo de maior durabilidade mecânica entre as espécies testadas. O alto teor de cinzas apresentado, porém, desqualificou o produto para os padrões de qualidade mais elevados do mercado europeu, sugerindo misturar com madeira para reduzir o teor de cinzas do produto.

### **2.3.2 Tecnologias de conversão aplicadas a *Phyllostachys aurea***

Para *Phyllostachys aurea* há trabalhos no Brasil que avaliaram a qualidade química e energética do carvão (Maia et al., 2013) e a avaliação da qualidade energética de tratamentos de carbonização e densificação em comparação com o material *in natura* (SETTE JUNIOR et al., 2017).

Bada et al. (2016) avaliaram a produção de *Phyllostachys aurea* torreficado e carvão para uso em co-combustão com o carvão mineral. O estudo concluiu que ambos tratamentos resultaram em menor reatividade da amostra em comparação com o material *in natura*, apresentando maiores temperaturas de ignição. Especialmente para o carvão de *Phyllostachys aurea* a 380°C, as características de reatividade não diferiram do carvão mineral.

Campos (2017) avaliou quatro espécies de bambu encontradas no Paraná para uso como carvão vegetal, e conclui que *Phyllostachys aurea* foi a espécie que mais se aproximou da madeira, por seu baixo teor de cinzas em comparação com outros bambus e maior teor de carbono fixo.

Aragón-Garita et al. (2016) produziram péletes de *Phyllostachys aurea*, de onde foram obtidos os menores teores de cinzas, menor teor de umidade e, conseqüentemente, maior energia útil. Porém os péletes apresentaram o maior número de rachaduras, resultando em menor durabilidade mecânica em comparação com outras espécies do estudo.

## 2.4 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS ENERGÉTICOS DAS ESPÉCIES

Uma das principais variáveis referentes à qualidade energética de um material é a *densidade energética*, obtida pelo produto entre o poder calorífico e a densidade do combustível e definida pela quantidade de energia térmica contida por unidade de volume, informação essencial para avaliar os custos e a viabilidade do armazenamento e do transporte de um combustível.

O aumento da densidade energética é um dos principais alvos da aplicação de conversões termoquímicas e densificação (CHEN; PENG; BI, 2015). Para biomassas em condição *in natura*, a densidade do material apresenta variação bastante superior à variação de poder calorífico. Quirino et al. (2005) avaliaram 112 espécies florestais quanto a poder calorífico superior e densidade básica, e encontraram coeficiente de variação de 4% para o poder calorífico e de 27% para densidade básica. Portanto, a densidade foi o fator mais preponderante para a densidade energética de diferentes espécies.

A forma anatômica das espécies *Arundo donax* e *Phyllostachys aurea* resulta não só em densidades físicas reduzidas, conforme exposto acima, mas também resulta em densidades energéticas bastante inferiores às das espécies lenhosas, quando consideradas em granel. Dessa forma, a aplicação de conversões termoquímicas e densificação podem impactar significativamente a densidade energética dessas espécies.

A análise química imediata fornece os teores de cinza, matérias voláteis e carbono fixo, parâmetros importantes para a caracterização energética de produtos, pois trazem informações relevantes para estimar o perfil de combustão dos combustíveis, bem como estimar outras informações como rendimentos gravimétricos em processos termoquímicos e até o poder calorífico superior.

Em uma combustão, as cinzas representam material inerte e não combustível, que irão restar como resíduo da queima total (GOMES; OLIVEIRA, 1980). A depender de características das cinzas, elas podem representar problemas em caldeiras por necessitar de constantes interrupções para manutenção (CARNEIRO et al., 2013).

As matérias voláteis representam a fração do combustível que se volatiliza durante a combustão e queima rapidamente na forma gasosa. Segundo Gomes e Oliveira (1980) os voláteis são formados principalmente por hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarbonetos leves. Tratamentos termoquímicos como pirólise e torrefação tendem a reduzir o teor de voláteis, por sua eliminação parcial na aplicação do tratamento (CARNEIRO et al., 2013).

O carbono fixo é o principal componente da biomassa para uso energético, sendo o principal contribuinte para o poder calorífico, e sua concentração aumenta com a aplicação de tratamentos termoquímicos como a carbonização (GOMES; OLIVEIRA, 1980). Portanto o incremento do carbono fixo é um dos objetivos de valorização energética propiciados pela aplicação de tratamentos termoquímicos na biomassa.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os produtos dos tratamentos são denominados neste estudo como: *in natura*, torrificado, carvão, péletes, briquete e briquete após torrefação, conforme a Figura 01.



Figura 01 – Tratamentos da esquerda para direita: *in natura*, briquete, péletes, torrificado, carvão e briquete após torrefação. Na linha superior *Arundo donax*, e na inferior *Phyllostachys aurea*.

Fotos: Autor

#### 3.1 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

##### 3.1.1 Coleta das amostras

Os colmos das duas espécies foram coletados em populações invasoras do DF, *Arundo donax* no terminal rodoviário da Asa Sul, coordenadas 15°838'S e 47°930'W, e *Phyllostachys aurea* na Fazenda Água Limpa da Universidade de Brasília, (Figura 02-A), coordenadas 15°946'S e 47°938'W.

Os colmos selecionados foram cortados rente ao solo e desfolhados com facão de 50 cm (Figura 02-B). Posteriormente foram transportados ao Laboratório de Produtos Florestais do Serviço Florestal Brasileiro (LPF) e estocados em galpão de secagem natural por três meses, protegidos do contato com o solo e sob cobertura ao abrigo das chuvas.



Figura 02 – Coleta de colmo (A) e desfolhamento (B).  
Fotos: Autor

No LPF os colmos foram transformados em corpos de prova (Figura 03) de 20 cm de comprimento utilizando serra de fita de bancada, constando um nó no centro do corpo de prova para *Phyllostachys aurea*, e de um a quatro nós para *Arundo donax*. Foram considerados apenas colmos com diâmetro superior a 1,5 cm para *Phyllostachys aurea*, pois os topos de colmo com diâmetro inferior apresentavam abundância de hastes e folhas que dificultaram o desfolhamento com facão.

As folhas foram evitadas no estudo pois elas possuem baixo potencial energético, expresso por maior umidade e baixa relevância em termos de massa seca em comparação com a massa seca do colmo. Os corpos de prova e seus resíduos de confecção foram climatizados em ambiente controlado a  $22^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  e  $63\% \pm 2\%$  de umidade relativa do ar até atingirem estabilização da massa.



Figura 03 – Corpos de prova de *Phyllostachys aurea* com destaque para as três classes de posição axial, topo (T), meio (M) e base (B).

Fotos: Autor

### **3.1.2 Seleção das amostras para os tratamentos**

Parte dos corpos de prova foi destinada a ensaios de caracterização física e energética do material *in natura*, consistindo na medição das densidades sólida aparente e a granel, bem como determinação do teor de umidade, do poder calorífico e dos teores de cinzas, e matérias voláteis.

Tanto as amostras *in natura* para caracterização quanto as amostras destinadas à aplicação dos tratamentos de carbonização, torrefação e briquetagem foram selecionadas aleatoriamente e de forma representativa para as três classes de posição axial (base, meio e topo). Ressalva-se que a posição axial foi utilizada apenas na composição de amostras representativas, não sendo uma variável sujeita a análises neste estudo.

A quantidade de corpos de prova em cada amostra variou de acordo com a capacidade de cada equipamento em realizar uma repetição de cada tratamento. *In natura* e briquetagem de ambas espécies, bem como carbonização e torrefação de *Arundo donax* possuíam 30 corpos de prova por amostra. Carbonização de *Phyllostachys aurea* possuía 24 corpos de prova por amostra, devido à limitação de volume do reator. Torrefação de *Phyllostachys aurea* com 12 corpos de prova, devido à limitação de massa do reator.

As amostras para o tratamento de peletização foram separadas pelo método de quartejamento da serragem, obtida a partir da trituração integral dos resíduos da confecção dos corpos de prova dos demais tratamentos, sendo representativo de todas as posições axiais dos colmos. As amostras de briquetagem após torrefação foram obtidas pela trituração integral das amostras de torrefação.

### **3.1.3 Preparo das amostras para densificação**

As amostras para densificação foram moídas em moinho de martelos de potência 7,5 kW com peneiras definidas em duas aberturas diferentes – 5 mm para briquetagem e briquetagem após torrefação e 2,6 mm para peletização (Figura 04).



Figura 04 – Moinho de martelos e classificação em peneira do material moído.  
Fotos: Autor

A peletização exige partículas menores em virtude de características da matriz do equipamento, que possui aberturas cônicas de 6 mm de diâmetro na saída; sendo recomendação do fabricante o uso de partículas inferiores à metade do diâmetro de abertura da matriz.

Assim, para as amostras de peletização o material retido no moinho de martelos (partículas maiores de 2,6 mm) foi moído em moinho de facas tipo Willey com peneira de 1 mm de abertura. Essa granulometria permitiu a peletização de *Arundo donax*, mas não foi bem-sucedida para *Phyllostachys aurea*. Para esta espécie, foi utilizada granulometria inferior a 2,0 mm e o teor de umidade foi elevado pela adição de água destilada. Só foi possível realizar uma repetição da peletização de *Phyllostachys aurea*.

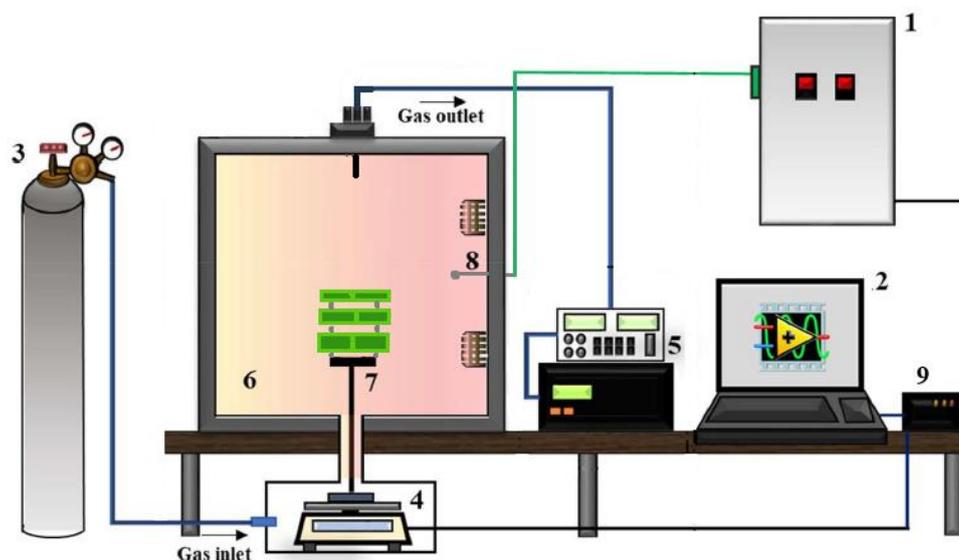
A granulometria da matéria-prima de péletes e briquetes foi mensurada em balança de resolução 0,01 g e capacidade de 2000 g conforme método adaptado da norma ISO 17830 (2016). Utilizou-se peneiras de aberturas: 3,15 mm; 2,8 mm; 2,0 mm; 1,0 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; 0,177 mm e 0,150 mm. Foi utilizada massa de 100 g no ensaio de classificação granulométrica para cada tratamento, exceto para briquetagem após torrefação para as duas espécies, que foi de 80 g, e peletização no caso de *Phyllostachys aurea*, de 13 g. Neste último caso, devido à massa de apenas 13g, a mensuração foi realizada em balança de resolução 0,001 g e capacidade de 160 g.

## 3.2 PROTOCOLOS DOS TRATAMENTOS

### 3.2.1 Torrefação

As torrefações foram realizadas conforme protocolo do LPF, em reator microcontrolado, à taxa de 5°C/min. e patamar de temperatura final de 60 min à temperatura de 220°C, finalizando com resfriamento natural até a temperatura de 60°C, que ocorre em cerca de 3 horas. O protocolo ocorreu em atmosfera oxidante com concentração natural de 21% de O<sub>2</sub>. O produto torreficado foi retirado do reator e acondicionado em embalagem plástica PEBD.

O reator de torrefação é adaptado de Silveira et al. (2017), o qual monitora a temperatura do processo e a massa da amostra em tempo real, por meio de uma balança de precisão de capacidade 1.000g e resolução 0,001 g, conforme esquema da Figura 05. No presente estudo, não foi necessário o uso do gás nitrogênio e do sistema de analisadores de gás (itens 3 e 5 da Figura 06). O sistema permite a construção de gráficos de análise termogravimétrica. As amostras foram empilhadas sobre o pedestal da balança com espaçadores de aço inox, a fim de melhor distribuir o ar quente entre os corpos de prova, conforme a Figura 06.



\* 1.Painel de Controle, 2.Computador, 3.Gás Nitrogênio, 4.Balança de precisão, 5.Analisadores de gás, 6.Forno de Torrefação, 7.Pedestal da balança com amostras empilhadas, 8.Fonte de calor por resistências elétricas e termopar de controle ao meio, 9.Conversor Analógico/Digital. Fonte: Silveira et al. (2017).

Figura 05 – Sistema de torrefação



Figura 06 – Interior do reator de torrefação com amostra de *Arundo donax* sobre o pedestal da balança, e à direita as resistências elétricas acima e abaixo e o termopar de controle de temperatura entre elas.

Foto: Autor

### 3.2.2 Carbonização

As carbonizações foram realizadas conforme protocolo do LPF, em reator microcontrolado, à taxa de 3,5°C/min e patamar de 180 min de duração a 450°C, finalizando com resfriamento natural até temperatura ambiente, o que ocorria em média 36 horas após o final do patamar. As amostras de carvão foram acondicionadas em embalagens plásticas.

O reator (Figura 07-A) tem capacidade de 20 litros de amostra, e possui termopares para monitorar as temperaturas do processo em dois pontos, o primeiro na fronteira entre a amostra e a fonte de calor e o segundo no centro da amostra (Figura 07-B). Esse monitoramento permite a construção de gráficos para análise do perfil térmico do processo.



Figura 07 – Reator de carbonização, com a abertura para acomodar até 20 litros de biomassa (A), e recipiente com amostra para carbonização, com cilindro metálico ao centro para abrigar o termopar que monitora a temperatura no interior da amostra (B).

Fotos: Autor

A recuperação de gases condensáveis em um recipiente conectado a um sistema de refrigeração no escapamento do reator (Figura 08-A) permite a recuperação do produto líquido, denominado licor pirolenhoso ou alcatrão vegetal, que poderá ser submetido a análises de caracterização que não estão no escopo deste estudo. Por ora, apenas a massa do licor pirolenhoso foi registrada, para cálculos de rendimento gravimétrico dos produtos. O gás que não é condensado passa por um bico de Bunsen, onde é possível sua queima (Figura 08-B).

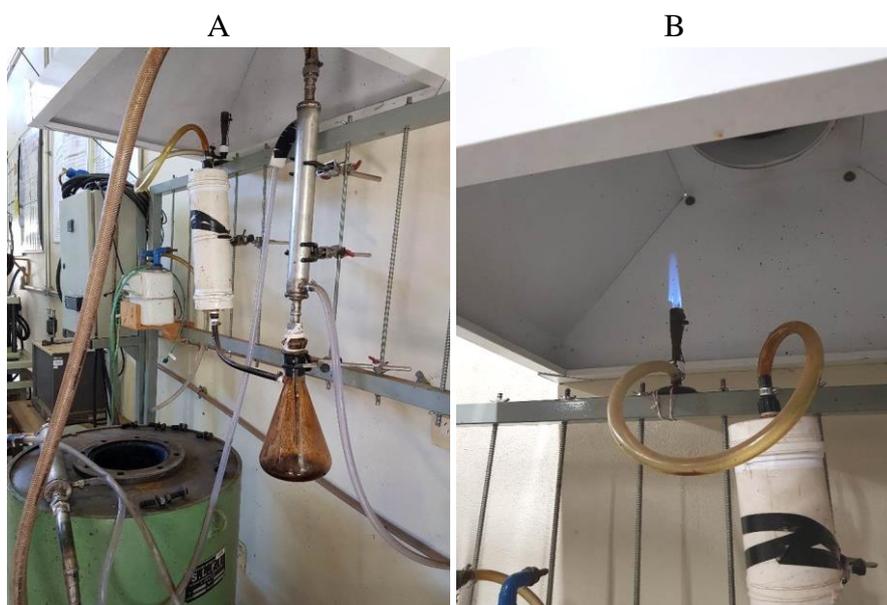


Figura 08 – Sistema de condensação (A) e o bico de Bunsen para queimar os gases não condensáveis (B)

Fotos: Autor

Para os tratamentos termoquímicos aplicados neste estudo – torrefação e carbonização – foram determinados rendimentos gravimétricos dos produtos sólidos nas condições seca e em umidade de equilíbrio conforme as Equações 1 e 2:

$$\eta_m (\%) = 100 \frac{m_{T0}}{m_{i0}} \quad (1)$$

Onde ( $\eta_m$ ) é rendimento gravimétrico sólido seco, e as massas secas a 0% de umidade do material tratado ( $m_{T0}$ ) e da biomassa inicial ( $m_{i0}$ ).

$$\eta_{mu} (\%) = 100 \frac{m_{Tu}}{m_{iu}} \quad (2)$$

Onde ( $\eta_{mu}$ ) é rendimento gravimétrico sólido em umidade de equilíbrio, e as massas em umidade de equilíbrio do material tratado ( $m_{Tu}$ ) e da biomassa inicial ( $m_{iu}$ ).

O rendimento gravimétrico seco ( $\eta_m$ ) considera apenas as massas livres de umidade, e é a medida usualmente adotada nos estudos para comparar diferentes tratamentos ao eliminar a variável umidade da análise. O rendimento gravimétrico em umidade de equilíbrio ( $\eta_{mu}$ ), representa uma medida de rendimento de massa mais próxima da realidade de produção, onde a umidade de equilíbrio é incluída tanto para o produto quanto para a matéria-prima. Ademais, essa propriedade será utilizada no cálculo do rendimento energético inferior, que será discutido em seção adiante.

Por outro lado, é necessário cautela na análise do rendimento gravimétrico em umidade de equilíbrio, pois é um fator sujeito a condições climáticas e ao método de acondicionamento das amostras. Assim, trata-se de uma medida de rendimento em que a comparação com rendimentos obtidos em diferentes tratamentos é mais complexa do que no caso do rendimento gravimétrico seco.

No caso da carbonização, os rendimentos líquidos foram calculados em base seca ( $\eta_{L0}$ ) e em base úmida ( $\eta_{Lu}$ ) conforme Equações 3 e 4 respectivamente, onde no primeiro caso a umidade presente inicialmente na biomassa foi descontada da massa do licor pirolenhoso e da biomassa, e no segundo caso a umidade inicial da biomassa não é descontada dos dois termos:

$$\eta_{L0} (\%) = 100 \frac{m_{L0}}{m_{i0}} \quad (3)$$

Onde ( $m_{L0}$ ) é a massa do líquido livre da umidade inicial da biomassa e ( $m_{i0}$ ) massa da biomassa inicial a 0% de umidade.

$$\eta_{Lu} (\%) = 100 \frac{m_{Lu}}{m_{iu}} \quad (4)$$

Onde ( $m_{Lu}$ ) é a massa do líquido incluindo a umidade inicial da biomassa e ( $m_{iu}$ ) massa da biomassa inicial em umidade de equilíbrio.

Por fim, o rendimento gasoso da carbonização foi estimado por diferença entre 100% e os rendimentos gravimétricos sólido e líquido, conforme Equações 5 e 6:

$$\eta_{GO} (\%) = 100 - \eta_m - \eta_{LO} \quad (5)$$

Onde ( $\eta_{GO}$ ) representa base seca

$$\eta_{Gu} (\%) = 100 - \eta_{mu} - \eta_{Lu} \quad (6)$$

Onde ( $\eta_{Gu}$ ) representa base úmida

### 3.2.3 Briquetagem

As briquetagens foram realizadas conforme protocolo do LPF em equipamento laboratorial com alimentação por batelada, controles de pressão e temperatura no pistão de compactação, e controle dos tempos de compactação e de resfriamento (Figura 09-A). O protocolo de compactação foi o mesmo para briquetagem e briquetagem de torreficado, e consistiu em 25 g de amostra submetidos à pressão de 8 MPa e a 130°C por 5 minutos. O resfriamento foi de 10 minutos em molde de aço (Figura 09-B), assistido por ventilador à temperatura ambiente (25-28 °C).

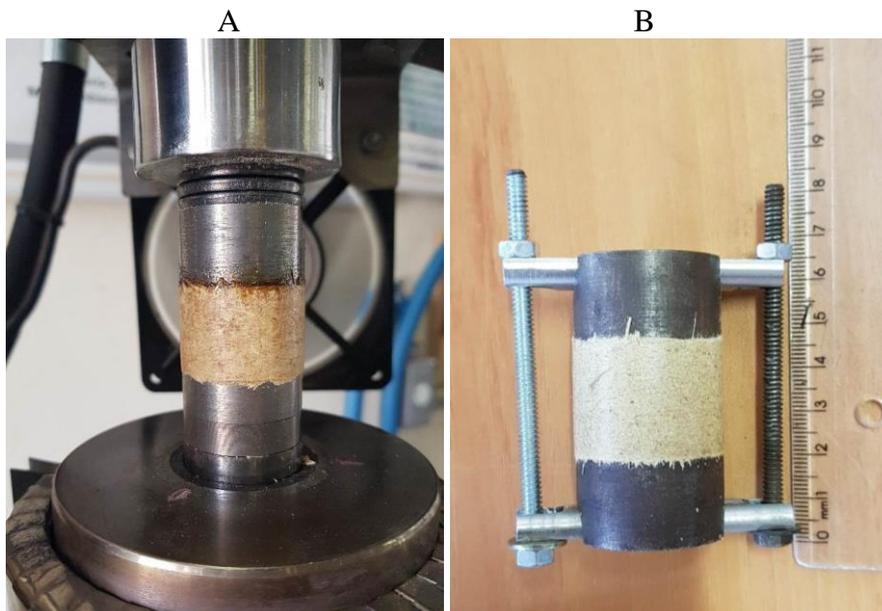


Figura 09 – Briquete em produção nos pistões (A) e resfriando em molde após compactação (B).  
Fotos: Autor

### 3.2.4 Peletização

A peletização (Figura 10) ocorreu em equipamento industrial de pequeno porte pertencente ao Laboratório de Tecnologia da Madeira do Departamento de Engenharia Florestal da UnB. As especificações do equipamento são potência do motor principal de 7,5 kW, alimentação contínua de até 150 kg/h e matriz com abertura cônica de 6 mm de diâmetro na saída. Como se trata de equipamento industrial, não é possível controlar a temperatura e a pressão no processo, restando apenas o controle dos parâmetros iniciais como: granulometria e teor de umidade do material, e a velocidade de alimentação do processo.



Figura 10 – Péletes de *Arundo donax* sendo recolhidos na saída do equipamento.  
Foto: Autor

Neste estudo a taxa de alimentação da peletização foi em média 75 kg/h, correspondendo à 50% da produtividade máxima do equipamento. Essa taxa foi constantemente ajustada durante o processo, variando até 20% em torno da média.

Por se tratar de um equipamento industrial de pequeno porte, ele é desenhado para operar em processo contínuo, sem interrupções que possam comprometer a

estabilidade de temperatura e pressão sobre a matriz. Na realidade laboratorial a disponibilidade de material é limitada, o que enseja interrupções, além do fato que se consome significativa quantidade de biomassa no início do processo até que a matriz atinja temperatura e pressão ideais para peletização. Para minimizar essa perda de material realizou-se pré-aquecimento da matriz em estufa a 150°C, para depois montá-la no equipamento a tempo de iniciar os testes com ela já aquecida.

Para ambos tratamentos de compactação, a granulometria foi mensurada a partir da mistura de parte de cada uma das três repetições, separadas por quartejamento e homogeneizadas por agitação dentro de sacos plásticos. A exceção do tratamento de *Phyllostachys aurea*, que foi realizado a partir de uma única repetição.

O teor de umidade das partículas do ensaio granulométrico foi mensurado em termo balança de resolução 0,001 g e capacidade de 160 g a 85°C até estabilização de massa a 0,2% de variação, protocolo do LPF validado para serragem de diferentes espécies lenhosas. O teor de umidade dos produtos péletes e briquete foi estabelecido em protocolo de secagem em estufa a 105°C por 24 h, com mensuração da massa após resfriamento em dessecador, e uso de balança de resolução 0,001 g e capacidade 160 g.

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS PRODUTOS

Uma parte da amostra de cada repetição dos produtos dos tratamentos foi separada para formar as repetições das amostras de caracterização física e outra parte para as amostras de caracterização energética. Em ambos os casos a seleção foi aleatória, porém respeitando a representatividade das classes axiais do colmo – base meio e topo – igualmente representados na composição de cada repetição. Conforme dito acima, as classes axiais serviram apenas à representatividade da amostra, não sendo variável de análise neste estudo.

As amostras de caracterização física foram utilizadas para determinação dos teores de umidade de equilíbrio e das três densidades analisadas– densidade sólida aparente em umidade de equilíbrio (DSu), densidade sólida aparente seca a 0% de umidade (DSs) e do granel em umidade de equilíbrio (DG).

### 3.3.1 Densidade do granel

A densidade do granel (DG) foi mensurada conforme a norma ISO 17828 (2015), expressa pela Equação 7, em condição de umidade de produção para os tratamentos torrefação, carbonização, peletização, briquetagem e briquetagem após torrefação, e no caso do tratamento *in natura* foi adotada a condição de umidade de equilíbrio da sala de climatização do LPF (22°C ± 2°C e 63% ± 2% de umidade relativa do ar).

$$DG = \frac{mg}{Vg} \quad (7)$$

Onde mg é a massa do granel em umidade de equilíbrio, e Vg volume do granel em umidade de equilíbrio.

A determinação do volume do granel foi realizada com auxílio de uma régua metálica medindo o comprimento, a largura e a altura de uma pilha de colmos das espécies, conforme Figura 11, e a massa foi medida com balança de resolução 0,01 g e capacidade de 2000 g.

Exceção foi o tratamento peletização, onde o volume do granel dos péletes foi mensurado em cilindro metálico de diâmetro conhecido, e a altura foi medida com a régua metálica.



Figura 11 – Triedro confeccionado para medição do volume do granel  
Foto: Autor

### 3.3.2 Densidade sólida e determinação dos teores de umidade

A densidade sólida foi mensurada em duas condições de umidade para cada tratamento: a primeira em umidade de equilíbrio após produção (DSu), Equação 8 e a segunda em condição seca a 0% de umidade em estufa ventilada a 105°C (DSs), Equação 9. A condição de umidade de produção foi obtida com o acondicionamento das amostras em embalagem plástica imediatamente após seu resfriamento natural ao final da aplicação do tratamento. Apenas *in natura* teve a condição úmida medida após equilíbrio na sala de climatização do LPF.

$$DSu = \frac{m_i}{V_i} \quad (8)$$

Densidade sólida em umidade de equilíbrio, onde ( $m_i$ ) é massa inicial e ( $V_i$ ) volume inicial, ambos na condição de umidade de equilíbrio.

$$DSs = \frac{m_o}{V_o} \quad (9)$$

Densidade sólida seca, onde ( $m_o$ ) é a massa seca e ( $V_o$ ) volume seco

O teor de umidade, mensurado conforme a norma ISO 18134-1 (2015), pode ser expresso em duas formas, base seca ou base úmida, a depender do denominador utilizado – a massa seca ou a massa com umidade, conforme as Equações 10 e 11 respectivamente:

$$TU_{bs} = \frac{m_i - m_o}{m_o} \times 100 \quad (10)$$

$$TU_{bu} = \frac{m_i - m_o}{m_i} \times 100 \quad (11)$$

Onde  $m_o$  é massa seca a 0% de umidade e  $m_i$  é massa inicial.

As amostras de densidade sólida consistiram em seis corpos de prova para cada repetição para os tratamentos *in natura*, torrefação e carbonização. Foram 20 corpos de prova por repetição para peletização, e cinco corpos de prova por repetição nos tratamentos de briquetagem e briquetagem após torrefação (Figura 12) – exceto para briquete de torrificado de *Arundo donax*, onde a quantidade disponível permitiu 4 corpos de prova por repetição.



Figura 12 – Repetições de briquetes e uma de péletes de *Phyllostachys aurea* para densidade e umidade  
Fotos: Autor

Os tratamentos de densificação produziram corpos de prova cilíndricos e regulares que permitiram a mensuração do volume com paquímetro digital, de resolução 0,01 mm e curso 150 mm, atendendo à norma ISO 18847 (2016) em seu Anexo “A”. As massas foram obtidas em balança de resolução 0,001 g e capacidade de 2000 g. O teor de umidade e a densidade sólida seca foram obtidos após secagem em estufa ventilada a 105°C por 24 h, e resfriamento dos corpos de prova em dessecador com sílica gel por 20 minutos.

Para os tratamentos *in natura* e termoquímicos, a determinação do volume foi pelo método de deslocamento de água destilada (princípio de Arquimedes) e, para tanto, foi necessário cortar os corpos de provas ao meio em sentido longitudinal (Figura 13), para possibilitar que os espaços entrenós fossem preenchidos pela água. A metodologia do LPF se baseia na norma ISO 18847 (2016), sem o uso de um detergente formulado especificamente para o teste.



Figura 13 – corpos de prova rachados no sentido longitudinal, e o teste de densidade pelo método de Arquimedes

Fotos: Autor

## 3.4 CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DOS PRODUTOS

### 3.4.1 Preparação das amostras de caracterização

Uma parte da amostra de cada repetição dos produtos *in natura*, torreficado e carvão foi separada para formar as repetições das amostras de caracterização energética, como explicado anteriormente. Para os tratamentos: peletização, briquetagem e briquetagem após torrefação, foram estipulados os valores médios obtidos para os tratamentos *in natura* e torrefação. Isso se justifica pois são tratamentos que ocorrem em temperaturas relativamente baixas em relação aos tratamentos termoquímicos, não havendo alteração química substancial no produto em relação à sua matéria-prima, apenas alterações substanciais na densidade e na umidade.

As amostras para caracterização dos produtos *in natura* e torreficado foram trituradas em moinho de martelos com peneira de abertura 5 mm, e posteriormente moídas em moinho de facas com abertura 1mm para preparo granulométrico da caracterização energética: análise imediata, poder calorífico superior e densidade energética. As amostras de carvão foram moídas manualmente com marreta, estando as amostras protegidas em sacos plásticos, e posteriormente maceradas em uma bandeja utilizando um pistilo até obtenção de partículas menores, que por sua vez foram moídas em desintegrador de bancada com lâminas de aço tipo martelo, até ser obtido algo em torno de 50 g de partículas inferiores a 1 mm por repetição.

Para análise de poder calorífico superior (PCS) do carvão, foram excluídas as frações acima de 0,841 mm e inferior a 0,150 mm, por protocolo do LPF para aumentar a precisão e a segurança do ensaio. Essas frações não foram eliminadas da análise imediata.

### 3.4.2 Análise imediata

A análise imediata consiste na determinação dos teores de cinzas, de matérias voláteis e de carbono fixo. O teor de cinzas (Cz) foi mensurado em base seca conforme a norma ISO 18122 (2015) em equipamento termogravimétrico automático com balança analítica de resolução 0,002 g e capacidade 200 g, que queimou as amostras a 550°C em atmosfera de oxigênio a 99,5% de pureza até estabilização final da massa da amostra. O

teor de matérias voláteis (MV) foi mensurado em base seca conforme a norma ISO 18123 (2015) por meio de ensaio manual em forno-mufla a 900°C por 7 minutos (Figura 14). O teor de carbono fixo (CF) foi calculado em base seca por diferença da soma dos teores de cinzas e matérias voláteis, conforme Equação 12:

$$CF \% = 100\% - Cz \% - MV \% \quad (12)$$



Figura 14 – Ensaio de Matérias voláteis em forno mufla, e o produto resultante composto de carbono fixo e cinzas.

Foto: Autor

### 3.4.3 Poder calorífico superior e inferior

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado em calorímetro isoperibol automático, conforme metodologia do LPF baseada nas normas ISO 17225-1 Anexo D (2014) e ISO 18125 (2017). Os tratamentos *in natura* e torrefação foram queimados na forma de pellet prensado a frio em prensa de bancada à 19,6 kN/cm<sup>2</sup> a partir do material moído em partículas inferiores a 1 mm (Figura 15).

As amostras de carvão vegetal foram queimadas na forma de material moído, com granulometria inferior a 0,841 mm e superior a 0,15 mm. Após determinação da massa seca, as amostras foram pulverizadas com água destilada para reduzir a velocidade da queima e preservar a segurança do operador (Figura 16).

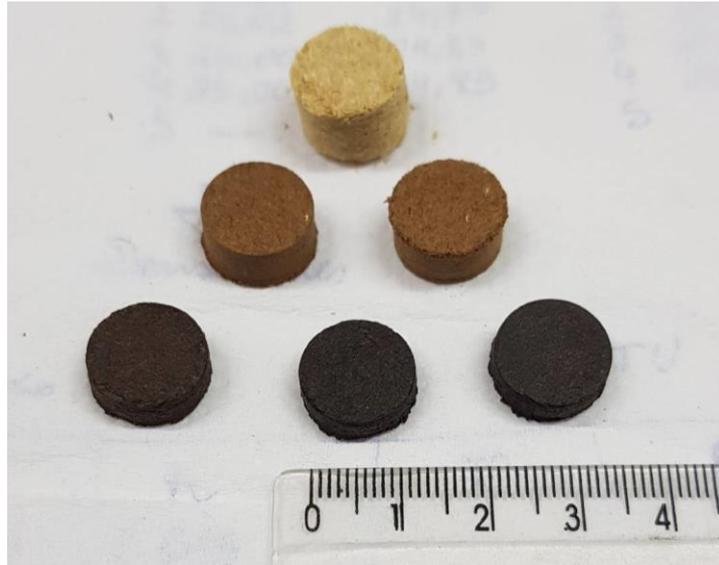


Figura 15 – Amostras para a determinação de Poder Calorífico Superior: péletes prensados a frio.  
Foto: Autor

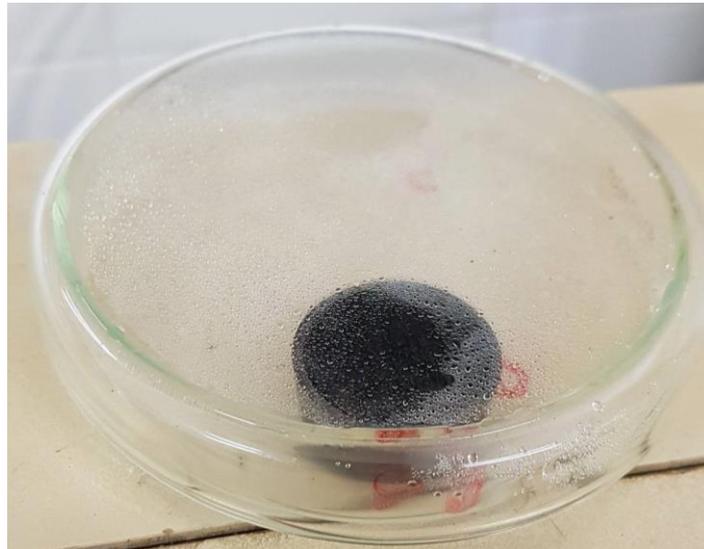


Figura 16 – Amostra de carvão sendo equilibrada com água destilada borrifada.  
Foto: Autor

O poder calorífico inferior representa a quantidade de energia útil por unidade de massa do material, e foi calculado conforme a Equação 13, que se baseia no PCS e desconta as perdas de energia devidas à umidade e à evaporação de água de constituição, que é formada durante a queima dos átomos de hidrogênio que compõem quimicamente o material.

$$PCI = PCS \cdot \frac{(1 - TU_{bu})}{100} - 2,447 \cdot \frac{TU_{bu}}{100} - 2,447 \cdot \frac{9,01 H}{100} \cdot \frac{1 - TU_{bu}}{100} \quad (13)$$

Onde PCS está expresso em MJ/kg,  $TU_{bu}$  teor de umidade base úmida e H teor de hidrogênio percentual em base seca.

Fonte: Loo e Koppejan (2002)

Os teores de hidrogênio dos diferentes tratamentos foram obtidos da literatura, onde existe pouca variação dentro da mesma espécie. Porém, no caso dos materiais termicamente tratados, como é o caso do torrificado e do carvão, ocorre significativa alteração no teor de hidrogênio. Assim, para esses casos, o teor de hidrogênio foi estimado conforme comportamentos observados em outros estudos que realizaram torrefações ou carbonizações com perfil térmico semelhante, e com espécies do mesmo gênero quando disponíveis. A Tabela 1 apresenta os valores de teor de hidrogênio adotados neste estudo para o cálculo do PCI, e as referências para cada valor.

Tabela 1 – Teor de hidrogênio adotado para cada tratamento.

Espécie	Tratamento	H %	Fonte
<i>Arundo donax</i>	In natura, péletes, briquete	5,52	Nichol e Westover (2012)
	Torrificado, briquete após torrefação	5,16	Rousset et al. (2011) estimado*
	Carbonizado	2,47	Saikia et al. (2015)
<i>Phyllostachys aurea</i>	In natura, péletes, briquete	6,46	Bada et al. (2016)
	Torrificado, briquete após torrefação	6,40	Bada et al. (2016)
	Carbonizado	2,72	Hernández-Mena et al. (2014)

H – Teor de hidrogênio base seca

\* Estimado por redução de 6,6% em H observada por tratamento a 220°C no mesmo reator, com espécie de gramínea de outro gênero (*Bambusa*).

#### 3.4.4. Densidade Energética

A densidade energética foi o principal parâmetro de comparação dos tratamentos neste estudo. Para a determinação das densidades energéticas foram considerados o PCS, o PCI e as três densidades citadas acima (DSu, DSs, DG). A densidade energética foi expressa de três formas – densidade energética sólida superior (DESS), Equação 14, e sólida inferior (DESi), Equação 15, e densidade energética do granel (DEG), Equação 16 – conforme produto das duas grandezas (densidade e poder calorífico) em igual condição de umidade:

$$DES_s = PCS \times DS_s \quad (14)$$

Em condição seca a 0% de umidade

$$DES_i = PCI \times DS_u \quad (15)$$

Em condição de umidade de equilíbrio;

$$DEG = PCI \times DG \quad (16)$$

Em condição de umidade de equilíbrio.

O rendimento energético ( $\eta_E$ ) é uma grandeza que combina o rendimento gravimétrico do processo, no caso torrefação e carbonização, com o efeito do tratamento sobre o poder calorífico. É uma razão que demonstra a quantidade de energia disponível após o processo em relação à energia disponível antes do tratamento. Pode ser calculado como rendimento energético superior, onde a umidade não é levada em consideração, conforme Equação 17. Ou, se considerarmos o efeito da umidade no rendimento gravimétrico e nas perdas de energia calorífica, temos o rendimento energético inferior, conforme Equação 18.

$$\eta_{Es} = \eta_m \frac{PCS_T}{PCS_{in}} \quad (17)$$

Onde  $PCS_T$  é do material tratado e  $PCS_{in}$  é do material *in natura*.

$$\eta_{Ei} = \eta_{mu} \frac{PCI_T}{PCI_{in}} \quad (18)$$

Onde  $PCI_T$  é do material tratado e  $PCI_{in}$  é do material *in natura*.

### 3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O delineamento experimental é inteiramente casualizado, consistindo em seis tratamentos para cada espécie (*in natura*, torrefação, carbonização, peletização, briquetagem e briquetagem de torreficado), num total de 12 tratamentos, e três repetições por tratamento exceto na peletização de *Phyllostachys aurea* onde só foi possível realizar uma repetição, totalizando 34 amostras.

As médias para cada tratamento dos seguintes parâmetros: densidade, densidade energética e análise imediata, foram submetidas à análise de variância (ANOVA) e teste Tukey de comparação de médias ao nível de significância de 5%.

As médias dos rendimentos gravimétricos são apresentadas em gráficos de colunas com barras de desvio padrão. Por fim, as médias dos demais parâmetros – teor de umidade, poder calorífico, rendimento sólido e rendimento energético – são apresentadas em tabelas com os respectivos coeficientes de variação (CV).

A caracterização da única repetição dos péletes de *Phyllostachys aurea* não foi incluída nas análises estatísticas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 TRATAMENTO *IN NATURA*

A Tabela 2 apresenta os dados da caracterização inicial das propriedades físicas do material *in natura*, que subsidiarão a discussão dos demais tratamentos.

Tabela 2 – Caracterização inicial das propriedades físicas dos tratamentos *in natura*.

Espécie	TUbs %	CV %	DSu g/cm <sup>3</sup>	CV %	DG g/cm <sup>3</sup>	CV %
<i>Arundo donax</i>	10,43	5	0,70	14	0,20	6
<i>Phyllostachys aurea</i>	12,35	3	0,85	7	0,23	4

TUbs – teor de umidade base seca; DSu – densidade sólida à umidade de equilíbrio; DG – densidade do granel em umidade de equilíbrio; CV – coeficiente de variação.

O teor de umidade de *Arundo donax* após climatização foi semelhante ao teor de 12,5% encontrado por Aragón-Garita et al. (2016) após a realização de secagem do material moído. No entanto, isso não se verificou para a espécie *Phyllostachys aurea*, que no referido estudo apresentou teor de umidade de 7,6% após o mesmo tratamento. Possivelmente o controle ambiental da sala de climatização do LPF explica a menor diferença observada neste estudo.

Quanto a densidade sólida seca a 0% de umidade, as espécies se classificam em classes diferentes de densidade: *Arundo donax* como média densidade, e *Phyllostachys aurea* como alta densidade, adotando o critério de Melo et al. (1992). Porém a forma anatômica das espécies, com espaços vazios nos entrenós, resulta em baixa densidade do granel, o que as classificam no extrato inferior das classes de densidade de biocombustíveis sólidos da norma ISO 17225-1 (2014).

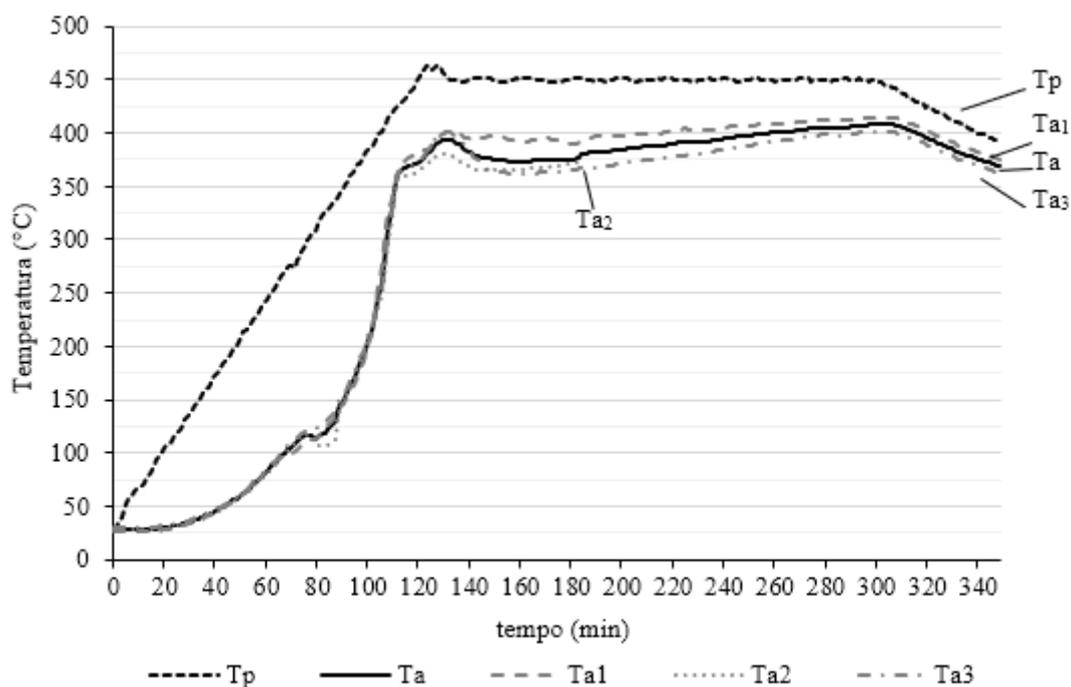
## 4.2 CARBONIZAÇÃO

### 4.2.1 *Arundo donax*

As três carbonizações de *Arundo donax* estão plotadas no Gráfico 1, onde pode-se verificar que houve semelhança no perfil térmico em todos os processos. A linha pontilhada  $T_p$  representa a temperatura na fronteira da amostra com a fonte de calor, no caso as resistências elétricas, e em todos os casos a convergência da temperatura é total com aquela programada no perfil térmico –  $3,5^\circ\text{C}/\text{min}$  e patamar de 180 min a  $450^\circ\text{C}$ .

As curvas abaixo de  $T_p$ , denominadas  $T_{a1}$ ,  $T_{a2}$  e  $T_{a3}$  representam a temperatura no centro da amostra, no ponto equidistante das resistências elétricas, para cada repetição do ensaio; e a curva  $T_a$  representa a média dessas três. Sendo  $T_p$  e  $T_a$  temperaturas de fronteira, a amostra está submetida ao gradiente de temperaturas entre as duas curvas,  $T_p$  e  $T_a$ .

Na repetição 2, o ensaio teve uma interrupção no registro de  $T_{a2}$  aos 180 minutos, mas isso não afetou o ensaio, que prosseguiu normalmente.



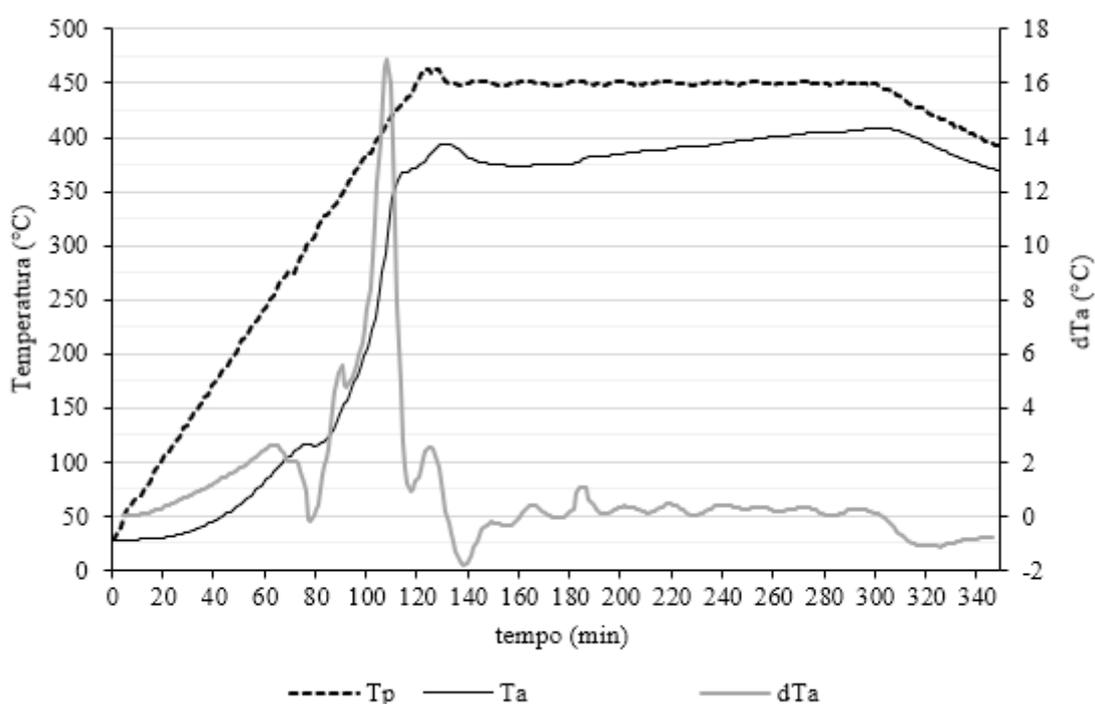
$T_p$  – Temperatura do Processo;  $T_a$  – Temperatura média da amostra;  $T_{a_n}$  – Temperatura da amostra n

Gráfico 1 – Perfis de temperatura das carbonizações de *Arundo donax* e a curva média  $T_a$

Observa-se que o perfil térmico foi semelhante nos três processos, especialmente até os 110 minutos, onde as três curvas se sobrepõem. Após os 110 minutos o processo

está na fase posterior ao auge das reações termoquímicas de degradação, e é a fase em que a temperatura do processo se estabiliza. Nesse momento podem ocorrer condensações de parte dos gases dentro do reator, fazendo oscilar para baixo a temperatura da amostra.

O Gráfico 2 apresenta a derivada da temperatura média da amostra ( $dT_a$ ) no tempo, evidenciando o pico de taxa de aumento da temperatura que permite identificar o tempo e a faixa de temperatura em que ocorreu o auge das reações exotérmicas.



Tp – Temperatura do Processo; Ta – Temperatura média da amostra;  $dT_a$  – Derivada de Ta no tempo

Gráfico 2 – Perfil térmico com derivada da temperatura interna da carbonização de *Arundo donax*

Observa-se que o pico máximo de temperatura ocorreu aos 108 minutos, quando as amostras estavam submetidas ao gradiente de temperatura de 250°C – 400°C (área entre as curvas Tp e Ta). Isso corrobora os achados em Correia et al. (2017), que encontrou um pico de degradação do material a partir de 250°C para a mesma espécie, evidenciando um menor rendimento gravimétrico a partir dessa temperatura. No referido estudo, amostras de 5 g de *Arundo donax* foram termicamente tratadas, o que é uma escala bastante inferior à do presente estudo, que foi em torno de 550 g.

A presença substancial de umidade no reator atrasa o início das reações exotérmicas de degradação em relação a ensaios com amostras secas ou com menor teor de umidade inicial. De fato, observa-se a partir de 62 minutos uma queda na taxa de

incremento da temperatura, com um ponto de mínimo aos 77 minutos, onde a derivada vai a zero, antes de voltar a subir em rápida taxa de incremento. Essa faixa entre 62 e 77 minutos correspondente a temperaturas entre 100°C e 115°C no interior da amostra, isto é, precisamente a fase de remoção da água livre e de adesão da amostra.

O pico de temperatura observado coincide também com os picos de degradação térmica das hemiceluloses a 250°C e o início de degradação da celulose a partir de 300°C observados por Yang et al. (2007). A degradação térmica de ambos constituintes da biomassa vegetal ocorre por reações exotérmicas que impactam a temperatura da amostra, evidenciando picos de dTa.

No caso desse estudo não foi possível separar os picos referentes à degradação de cada componente molecular específico, uma vez que a amostra está submetida a amplo gradiente de temperatura – enquanto a temperatura no meio da amostra estava em 250°C, a temperatura na fronteira já estava em 400°C, assim o efeito na temperatura causado por essas reações se misturam. Para analisar os picos de degradação de cada componente é necessário realizar ensaio de Análise Termogravimétrica em Micro TGA, o que não estava disponível para este estudo.

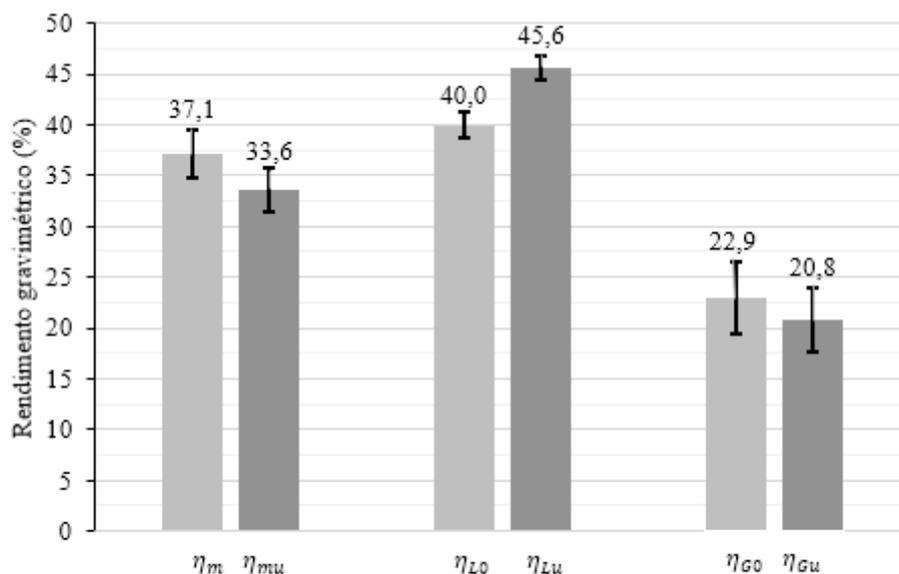
No presente estudo observa-se também que durante o pico em dTa, entre 98 e 110 minutos, a produção de gás atingiu o auge, sendo possível sustentar uma chama que queimou os gases combustíveis (Figura 17). Isso corresponde ao pico da degradação térmica do material citado acima, onde há maior taxa de volatilização da biomassa na forma de gases condensáveis e não condensáveis.



Figura 17 – Chama sustentada durante fase exotérmica da carbonização de *Arundo donax*.

Foto: Autor

O Gráfico 3 apresenta a média dos rendimentos gravimétricos dos produtos sólido, líquido e gasoso na carbonização de *Arundo donax*. Os rendimentos em base seca e base úmida são apresentados lado a lado para comparação. As barras incluem a margem de desvio padrão entre as três repetições.



$\eta_m$  – Rendimento sólido seco;  $\eta_{mu}$  – Rendimento sólido úmido;  $\eta_{L0}$  – Rendimento líquido seco;  $\eta_{Lu}$  – Rendimento líquido úmido;  $\eta_{G0}$  – Rendimento gasoso seco;  $\eta_{Gu}$  – Rendimento gasoso úmido

\* Barras nas colunas são desvio padrão da média

Gráfico 3 – Média dos rendimentos gravimétricos para carbonização de *Arundo donax*

Observa-se que o rendimento em carvão foi inferior na base úmida, pois o denominador inclui a massa inicial com umidade incluída. A presença dessa umidade no produto líquido resulta em maior rendimento deste em base úmida. O rendimento gasoso se torna praticamente igual nas duas condições, isto é, a umidade afeta basicamente o rendimento dos produtos sólido e líquido.

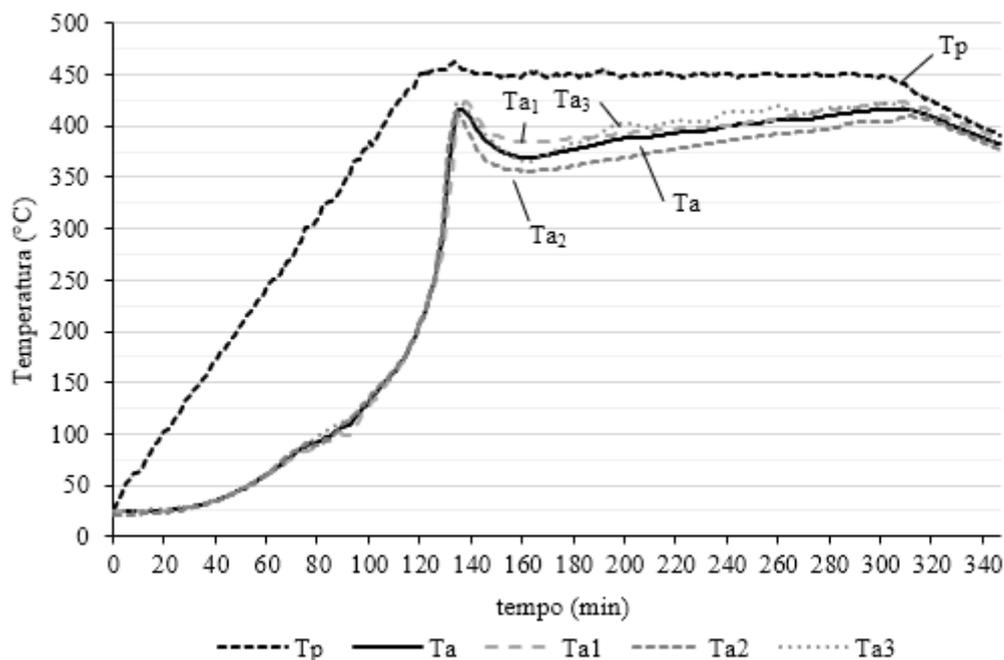
O rendimento sólido em base seca ( $\eta_m$ ) encontrado foi ligeiramente inferior ao obtido por Saikia et al. (2015), onde foi mensurado 43% de rendimento para temperatura de 450°C. A diferença de rendimento pode ter ocorrido por diferenças de protocolo de carbonização. Em primeiro lugar o referido estudo aplicou patamar de 30 minutos em 450°C, enquanto no presente estudo o patamar foi sustentado por 180 min, permitindo mais tempo para degradação do material. Em segundo lugar, o referido estudo aplicou atmosfera completamente inerte durante todo o protocolo de carbonização, com fluxo constante de gás Nitrogênio, enquanto no presente estudo a atmosfera foi parcialmente oxidante, onde a vedação do reator antes do ensaio sustentou

a concentração inicial de 21% de O<sub>2</sub> no reator, o que pode ter acarretado em maior degradação por reações de oxidação.

Em outro estudo, Correia et al. (2017) realizou uma carbonização de baixa temperatura (350°C) sem aplicação de gás inerte no processo, garantindo atmosfera parcialmente oxidante pela vedação da amostra de forma semelhante ao aplicado neste estudo, e o rendimento gravimétrico sólido encontrado foi de 40,2 %, também abaixo daquele obtido em temperatura mais alta por Saikia et al. (2015). Assim, considerando que este estudo utilizou condição de atmosfera mais próxima a de Correia et al. (2017), porém à temperatura de patamar mais alta, espera-se menor rendimento sólido  $\eta_m$  conforme foi obtido.

#### 4.2.2 *Phyllostachys aurea*

Os três perfis de temperatura de carbonização de *Phyllostachys aurea* foram plotados no Gráfico 4 que, assim como no caso de *Arundo donax*, evidencia a convergência de todos os tratamentos com a curva de temperatura média Ta, especialmente até os 140 minutos, onde as curvas se sobrepõem. A temperatura da fronteira Tp também convergiu com o perfil térmico programado.

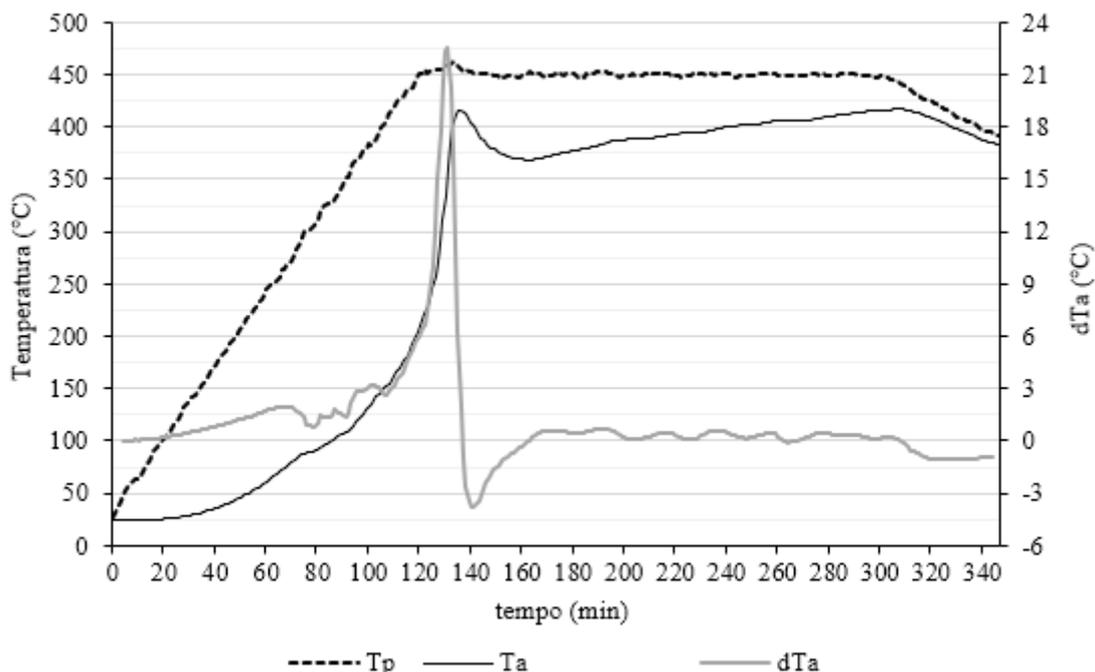


Tp – Temperatura do Processo; Ta – Temperatura média da amostra; Ta<sub>n</sub> – Temperatura da amostra n

Gráfico 4 – Perfis de temperatura das carbonizações de *Phyllostachys aurea* e a curva média Ta

Observa-se o pico de temperatura no interior da amostra aos 140 minutos, e após esse período a temperatura interna cai e se estabiliza, marcando o fim do auge das reações exotérmicas de degradação.

O Gráfico 5 demonstra o comportamento da derivada da temperatura interna  $dTa$  no tempo, evidenciando o pico de elevação térmica aos 130 minutos.



Tp – Temperatura do Processo; Ta – Temperatura média da amostra;  $dTa$  – Derivada de Ta no tempo

Gráfico 5 – Perfil térmico com derivada da temperatura interna da carbonização de *Phyllostachys aurea*

Aos 130 minutos, aproximadamente, a amostra está submetida ao gradiente de temperatura  $325^{\circ}\text{C} - 450^{\circ}\text{C}$ , acima daquele encontrado para as carbonizações de *Arundo donax*. Diferenças na composição química de cada espécie poderiam explicar a diferença na faixa de temperatura onde ocorreram os picos de degradação. Outro fator seria a água referente ao teor de umidade inicial que, se presente em maior quantidade, atrasaria o aquecimento da amostra em comparação com outro material mais seco.

Observa-se também que entre 70 e 105 minutos a derivada apresenta redução na taxa de incremento, correspondente às temperaturas de secagem das amostras. Esse patamar de estabilidade foi mais duradouro que nas carbonizações de *Arundo donax*, que duraram 15 minutos, e pode ser explicado pela quantidade maior de água presente nas amostras de *Phyllostachys aurea*. Com cerca de 20 minutos a mais na fase de secagem, a temperatura na fronteira Tp está  $70^{\circ}\text{C}$  mais alta que em *Arundo donax*, considerando a taxa de aquecimento de  $3,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Isso coloca as duas espécies em

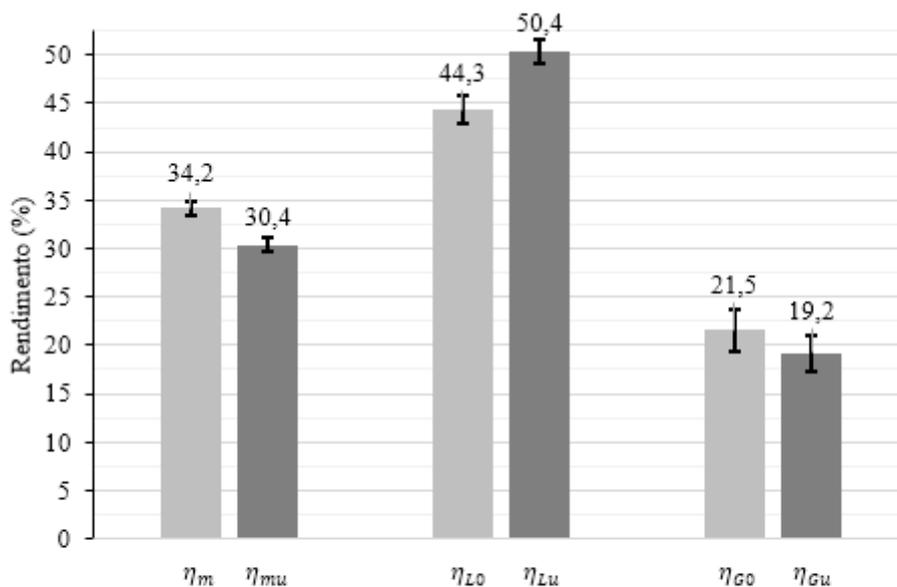
condições diferentes quando do início das reações de degradação dos componentes moleculares da biomassa, evidenciando que de fato a maior umidade em *Phyllostachys aurea* pode ter afetado o tempo do pico de temperatura.

A faixa de temperatura onde ocorreu o pico da derivada é ligeiramente superior àquela do estudo de Bada et al. (2016), que identificaram o pico de degradação máxima para biomassa de *Phyllostachys aurea* na temperatura de 309°C, trabalhando com amostras moídas de 50mg e classificadas abaixo de 0,2mm. Nessa condição granulométrica e na escala micro, a degradação térmica é facilitada pela superfície de contato com a atmosfera aquecida ser substancialmente maior do que nos corpos de prova em escala macro, conseqüentemente os picos de degradação são identificados a temperaturas menores que na escala macro.

Assim como ocorreu para *Arundo donax*, não foi possível separar os efeitos na temperatura decorrentes dos picos de degradação das hemiceluloses e da celulose, sendo o grande gradiente de temperatura na amostra responsável pela ocorrência combinada desses efeitos.

Durante o pico da derivada da temperatura, entre 120 min e 135 min, foi possível sustentar a chama acesa ininterruptamente no bico de Bunsen; igualmente à carbonização de *Arundo donax*, conforme a Figura 17. Isso corresponde à fase de maior degradação térmica da biomassa, resultando em maior taxa de volatilização da amostra na forma de gases condensáveis e não condensáveis.

O Gráfico 6 evidencia as diferenças entre os rendimentos em base seca e base úmida, onde percebe-se menor desvio padrão em relação às frações de rendimento sólido e líquido em comparação às observadas para *Arundo donax*. A diferença entre as médias de rendimento sólido e líquido superou as barras de desvio padrão. A menor variação para o rendimento entre as repetições de *Phyllostachys aurea* sugere que a espécie apresentou maior homogeneidade entre as repetições na aplicação do tratamento de carbonização.



$\eta_m$  – Rendimento sólido seco;  $\eta_{mu}$  – Rendimento sólido úmido;  $\eta_{Lo}$  – Rendimento líquido seco;  $\eta_{Lu}$  – Rendimento líquido úmido;  $\eta_{Go}$  – Rendimento gasoso seco;  $\eta_{Gu}$  – Rendimento gasoso úmido

\* Barras nas colunas são desvio padrão da média

Gráfico 6 – Média dos rendimentos gravimétricos para carbonização de *Phyllostachys aurea*

O rendimento gravimétrico em base seca ( $\eta_m$ ) obtido no presente estudo foi próximo a  $32,7 \pm 1,5\%$ , obtido por Sette Junior et al. (2017) para a mesma espécie e mesma temperatura de carbonização ( $450^\circ\text{C}$ ), apesar de ter utilizado protocolo com durações de tempo diferentes para o aquecimento e para o patamar, sendo o primeiro mais longo (taxa  $1,67^\circ\text{C}/\text{min}$ ) e o segundo mais curto (30 min).

A literatura sobre pirólise aponta que maiores taxas de aquecimento promovem menor rendimento sólido, e que patamares mais longos também resultam em menor rendimento sólido (BALLAT et al., 2009). Porém, no estudo de Sette et al. (2017) os rendimentos sólidos foram ligeiramente menores que o rendimento aqui obtido, ainda que dentro da margem de incerteza. Isso pode ser explicado por diferenças na condição inicial da biomassa, que consistiu em corpos de prova de 5 cm, e não 20 cm como neste estudo, resultando em maior superfície de contato da biomassa com a atmosfera aquecida, e também pelo fato de que a biomassa foi posta à carbonização a 0% de umidade, ambos fatores que podem ter resultado em maior reatividade das amostras e maior degradação.

### 4.2.3 Comparação da carbonização entre espécies

No Gráfico 7 são apresentadas as curvas Ta para ambos tratamentos, e no Gráfico 8 suas respectivas derivadas. Td representa a temperatura definida no protocolo de carbonização.

O Gráfico 7 evidencia que a temperatura no interior da amostra aumenta antes na carbonização de *Arundo donax*, com diferença de até 20 minutos entre as curvas na fase de incremento térmico mais acentuado.

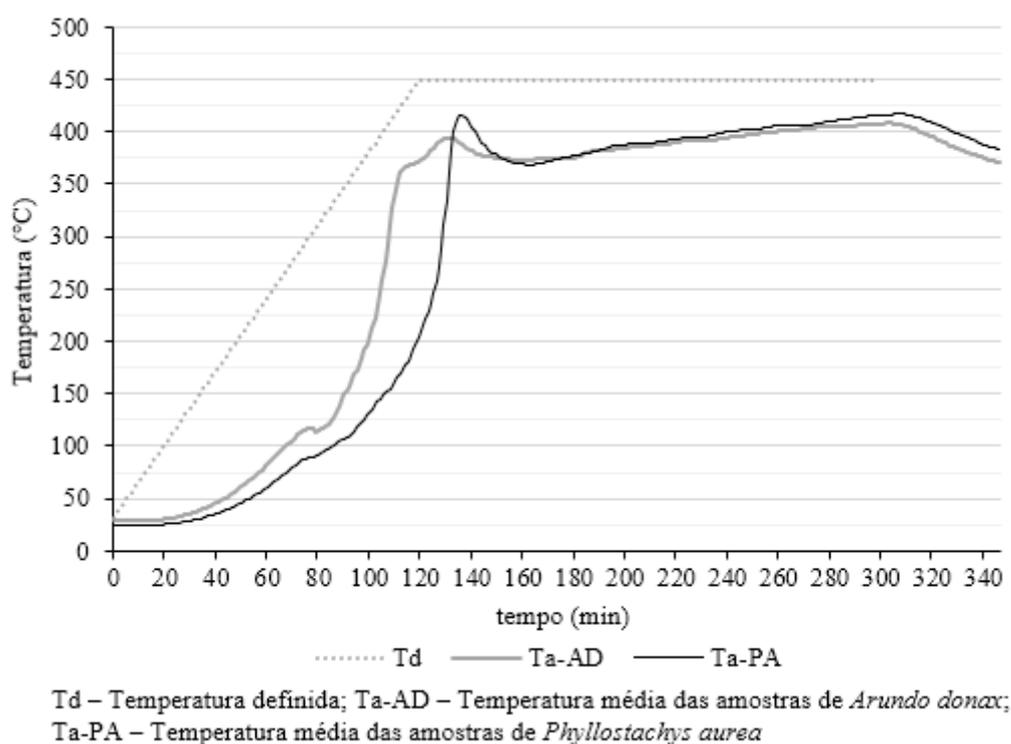
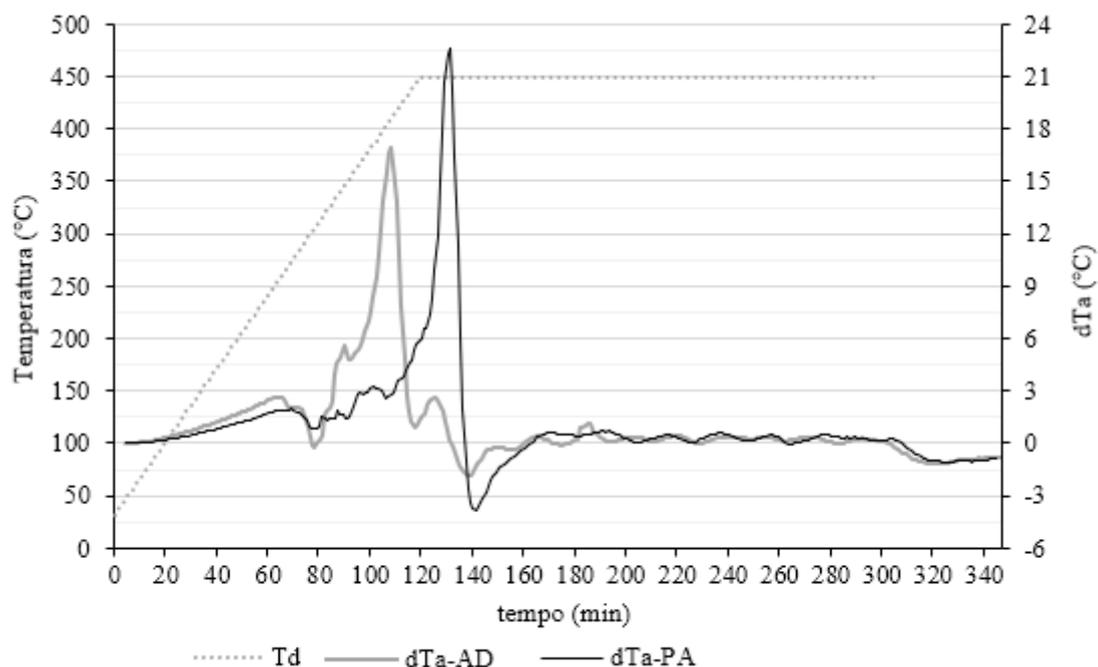


Gráfico 7 – curvas de temperatura Ta médias para carbonização das duas espécies.

Essa diferença no tempo também é evidenciada pela distância entre os picos de incremento da temperatura no Gráfico 8. Isso pode ser explicado por diferenças químicas entre as biomassas, além da diferença de teor de umidade inicial, que pode afetar o início das reações conforme explicado anteriormente. O teor de umidade mensurado para *Phyllostachys aurea* foi superior ao de *Arundo donax*. Ademais, devido à densidade do granel ligeiramente menor de *Arundo donax* e ao volume fixo do reator de carbonização, a massa inicial dos ensaios de *Phyllostachys aurea* foi superior à massa inicial dos ensaios de *Arundo donax*, implicando em maior quantidade de água no início da carbonização e, portanto, maior tempo para o início dos processos de degradação térmica.



Td – Temperatura definida; dTa-AD – Derivada da temperatura média das amostras de *Arundo donax*; dTa-PA – Derivada temperatura média das amostras de *Phyllostachys aurea*

Gráfico 8 – curvas de derivada da temperatura dTa para carbonização das duas espécies.

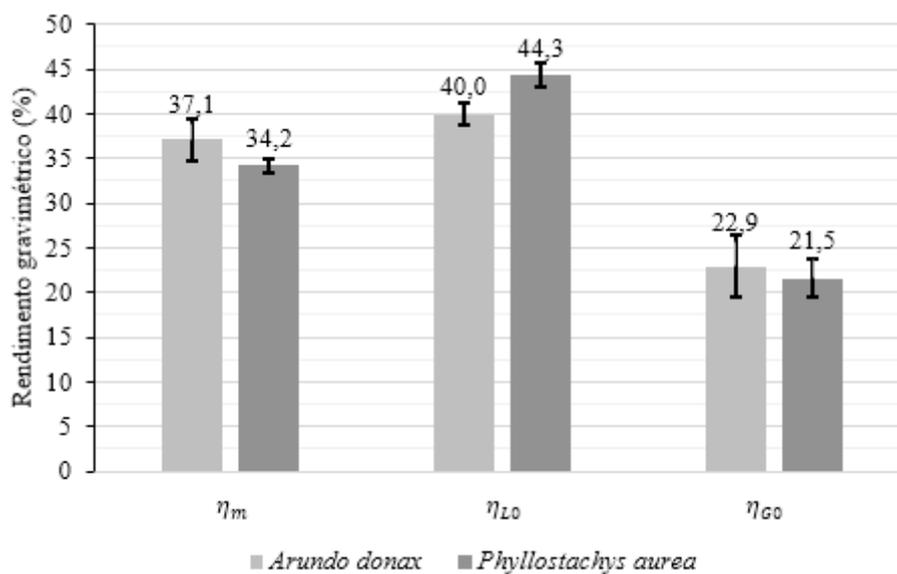
A Tabela 3 mostra que o teor de lignina é maior em *Phyllostachys aurea* na literatura, sendo um componente estrutural das células vegetais com maior resistência à degradação térmica, o que pode ser mais um fator para explicar a antecipação do pico de temperatura em *Arundo donax*. O teor de lignina de *Phyllostachys aurea* se aproxima das médias de 10 espécies de madeira do gênero *Eucalyptus*, tradicionalmente utilizado para produção de carvão vegetal.

Tabela 3 – Teor de lignina das espécies do estudo e de *Eucalyptus* sp.

Amostra	Lignina (%)	Fonte
<i>Arundo donax</i>	16 – 22	Neto et al. (1997)
<i>Phyllostachys aurea</i>	26,0	Maia et al. (2013)
<i>Eucalyptus</i> sp.*	26,2	Brito e Barrichelo (1977)

\* Dez espécies do gênero foram analisadas

No Gráfico 9 consta a comparação dos rendimentos em base seca, descontando o efeito da umidade inicial da biomassa. Observa-se que enquanto não há diferença significativa nos rendimentos gasosos, o rendimento em líquido foi maior para *Phyllostachys aurea*, diferença que supera as margens de desvio padrão.



\* Barras nas colunas são desvio padrão

Gráfico 9 – Média dos rendimentos gravimétricos em base seca entre as espécies

O rendimento sólido foi 2,9% superior em diferença absoluta para *Arundo donax*, apesar do teor de lignina ser significativamente menor, o que pode ser explicado pelo maior teor de cinzas dessa espécie. Como as cinzas são substâncias inorgânicas que geralmente não se degradam na pirólise, o seu teor é aumentado com a aplicação de processos termoquímicos.

O teor de cinzas de *Arundo donax* foi mensurado a 9,98% da massa seca no carvão de 450°C em Saikia et al. (2015) e 5,2% para o carvão de *Phyllostachys aurea* em Sette Junior et al. (2017). Considerando essa diferença de quase 5% do teor de cinzas nos carvões das duas espécies, há um possível fator para explicar o rendimento sólido maior observado no carvão de *Arundo donax*.

### 4.3 TORREFAÇÃO

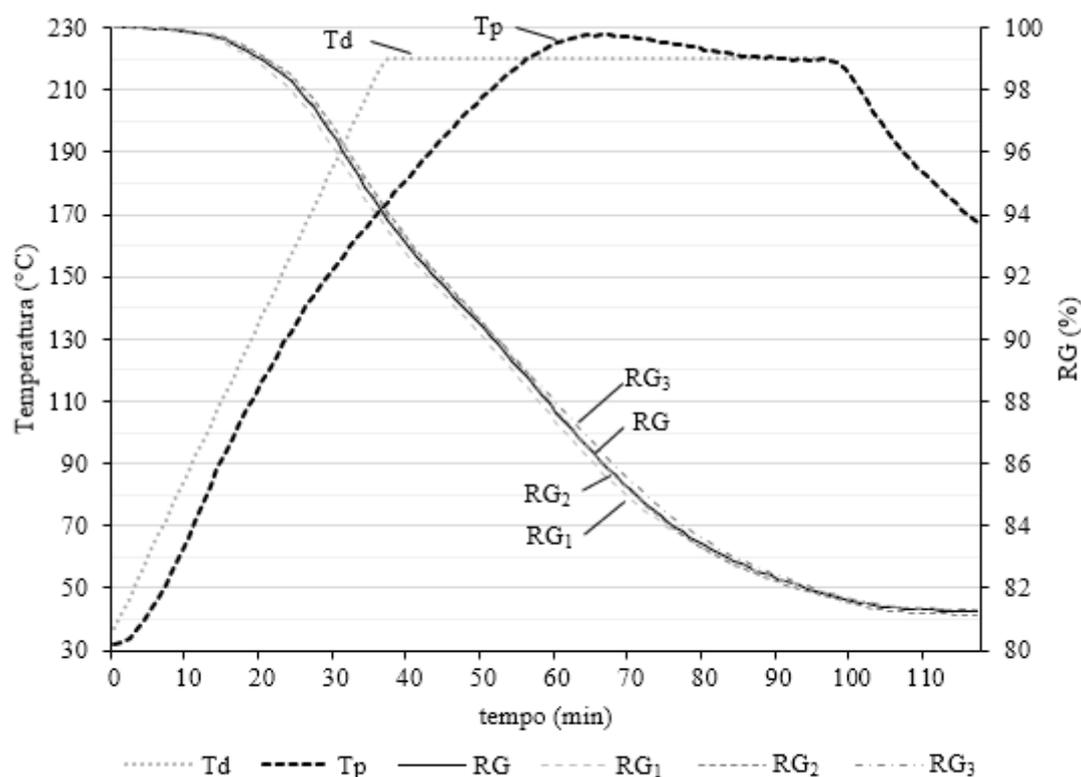
O presente estudo utilizou atmosfera de 21% de O<sub>2</sub> nas torrefações. A atmosfera não foi transformada em inerte ou parcialmente inerte em virtude da simulação de um cenário com menor custo de produção. Ademais, a realização de ensaios preliminares constatou que o protocolo adotado não causou combustão nas amostras, tampouco excesso de degradação térmica que comprometesse o rendimento em massa do produto.

#### 4.3.1 *Arundo donax*

No protocolo de torrefação adotado a taxa de aquecimento foi superior àquela definida na carbonização (5°C/min contra 3,5°C/min). Também é possível ver pelo Gráfico 10 que a temperatura de processo T<sub>p</sub> não converge com a temperatura definida T<sub>d</sub>, isso é, houve um atraso de aquecimento do processo em relação ao que foi programado, diferentemente das carbonizações, onde a convergência foi quase total.

Diferentemente do reator de carbonização, onde o termopar que registra T<sub>p</sub> se localiza fora do recipiente das amostras, no reator de torrefação o termopar de controle que registra T<sub>p</sub> está próximo e compartilha a mesma atmosfera da amostra, estando sujeito a variações de temperatura decorrentes de reações químicas provenientes da amostra.

Desta forma, a temperatura T<sub>p</sub> sofre a influência do arrefecimento causado pela umidade da biomassa, o que pode aumentar o atraso em relação ao perfil de temperatura programado T<sub>d</sub>. De fato, observa-se no Gráfico 10 que o atraso aumenta a partir de 140°C, faixa de temperatura onde a biomassa ainda está evaporando água de adesão e extrativos, não sofrendo degradação dos componentes estruturais. Somente com 20 minutos de atraso o processo atinge a temperatura do patamar, 220°C.



Td – Temperatura definida; Tp – média das temperaturas do processo; RG – média do rendimento gravimétrico; RG<sub>n</sub> – rendimento gravimétrico da amostra n

Gráfico 10 – Perfis termogravimétricos das torrefações de *Arundo donax* e curva média de rendimento gravimétrico RG

A maior distância entre as curvas Td e Tp se dá aos 40 minutos, onde o perfil programado já está a 220°C, mas o processo ainda se encontra em 175°C, diferença de 45°C. Nessa faixa de temperatura ainda não há degradação das moléculas estruturais da biomassa lignocelulósica, então presume-se que a umidade ainda presente no sistema seja o principal fator para explicar as diferenças de temperatura Tp e Td.

Quanto às curvas de perda de massa, observou-se uma grande convergência das três repetições em torno da curva média de rendimento gravimétrico (RG). Para os três casos o rendimento final foi ligeiramente superior a 81% base úmida, resultando em média de 81,3% e coeficiente de variação de apenas 0,1%.

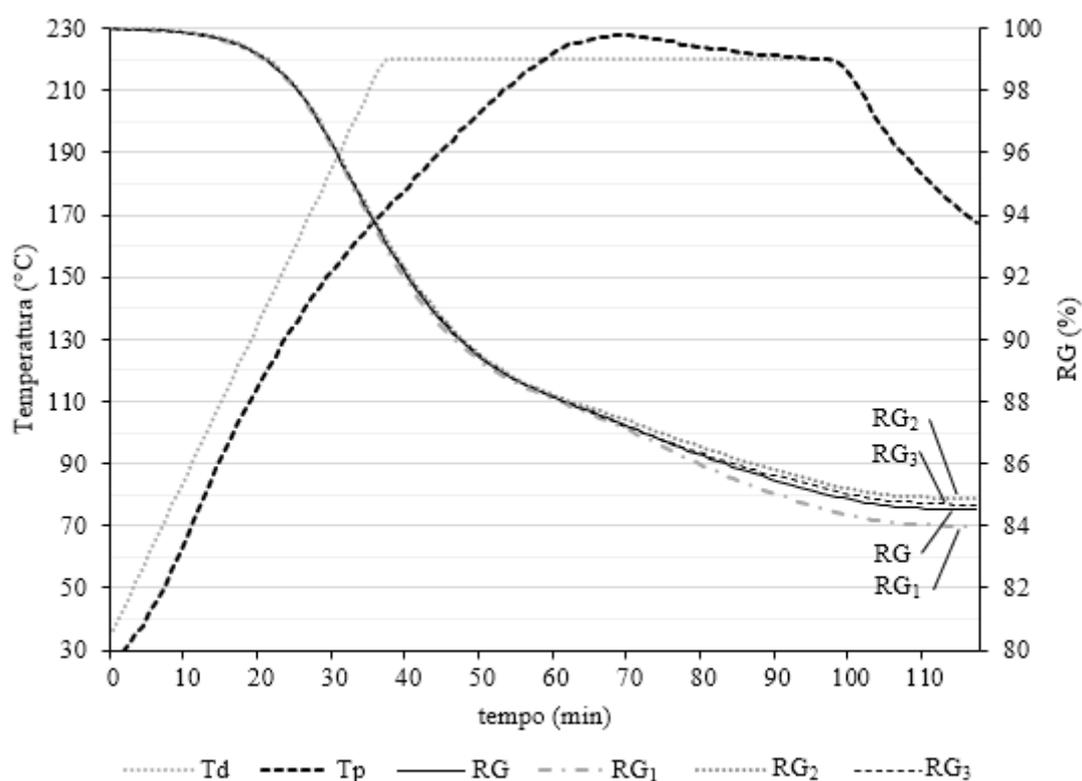
O gráfico 11 apresenta a curva Tp e a curva de derivada da perda de massa (dPM), onde perda de massa é expressa como o oposto de rendimento gravimétrico. Assim, dPM evidencia os picos de maior degradação da massa da amostra em relação à massa inicial (taxa percentual em base úmida).



250°C conforme Yang et al. (2007). Observou-se que esse segundo pico não resultou em qualquer ponto de inflexão na temperatura do processo  $T_p$ , isto é, as reações de degradação que ocorreram nessa temperatura não se traduziram em um pico de incremento em  $T_p$ , sendo o processo de torrefação de *Arundo donax* a 220°C eminentemente endotérmico, como esperado.

#### 4.3.2 *Phyllostachys aurea*

Observa-se na torrefação de *Phyllostachys aurea*, no Gráfico 12, um comportamento da temperatura de processo semelhante à torrefação de *Arundo donax*, consistindo no arrefecimento da temperatura  $T_p$  nas faixas relativas à evaporação de água de adesão e extrativos da biomassa. Também foi observada a distância máxima entre as curvas  $T_d$  e  $T_p$ , de cerca de 45°C, aos 40 minutos. De forma semelhante a *Arundo donax*,  $T_p$  atinge a temperatura programada de 220°C com 21 minutos de atraso, apenas 1 minuto a mais. Assim, infere-se que o efeito da umidade na temperatura de processo foi semelhante nos dois tratamentos.



$T_d$  – Temperatura definida;  $T_p$  – média das temperaturas do processo;  $RG$  – média do rendimento gravimétrico;  $RG_n$  – rendimento gravimétrico da amostra n

Gráfico 12 – Perfis termogravimétricos das torrefações de *Phyllostachys aurea* e curva média de rendimento gravimétrico  $RG$

Em relação à curva RG, observaram-se as primeiras diferenças em relação à *Arundo donax*, pois os rendimentos gravimétricos foram maiores, todos acima de 84%. Porém, a convergência com a curva média RG foi menos evidente entre as curvas das repetições. De fato, o coeficiente de variação do rendimento gravimétrico foi maior em relação a *Arundo donax*, sendo 0,6% para média de 84,5% em base úmida. Ainda assim, o coeficiente de variação foi muito baixo para um processo que envolve material de origem biológica, que geralmente apresenta grande variação natural para diversos parâmetros.

O Gráfico 13 apresenta as curvas de Tp e da derivada da perda de massa. Para *Phyllostachys aurea* observou-se um comportamento distinto daquele observado para a curva de dPM de *Arundo donax*, pois houve apenas um pico mais evidente, que ocorreu na faixa de temperatura de 160°C.

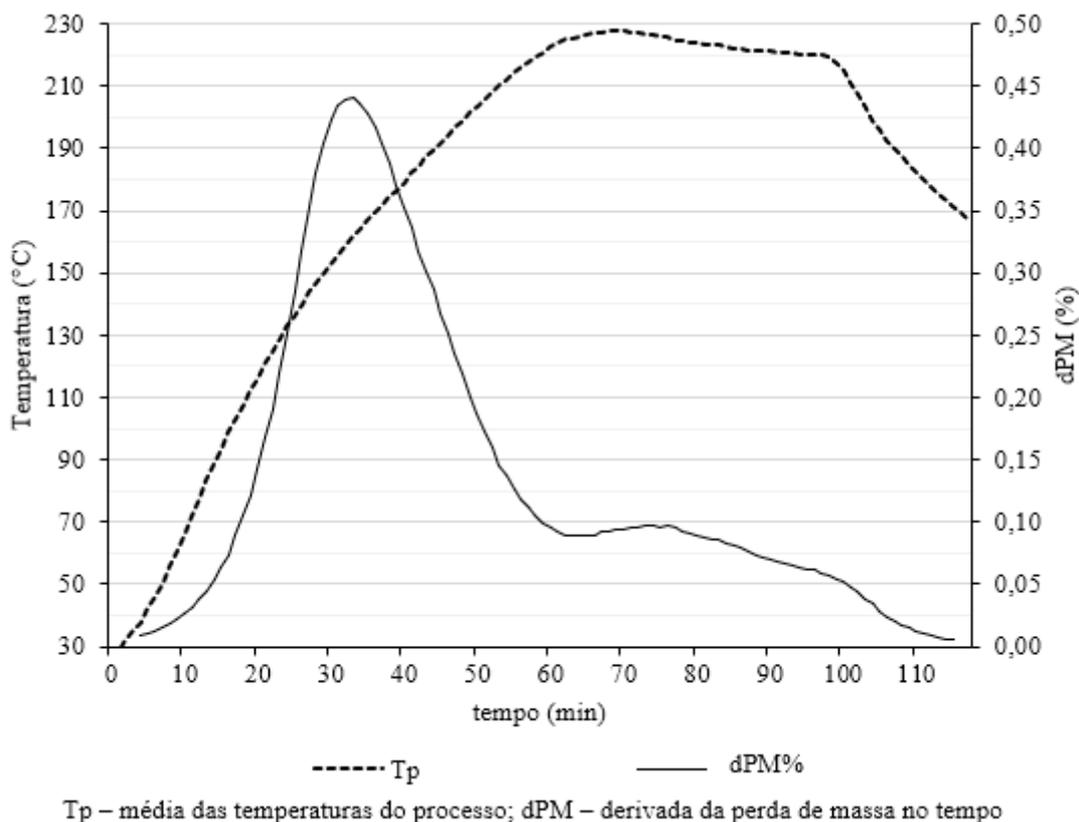


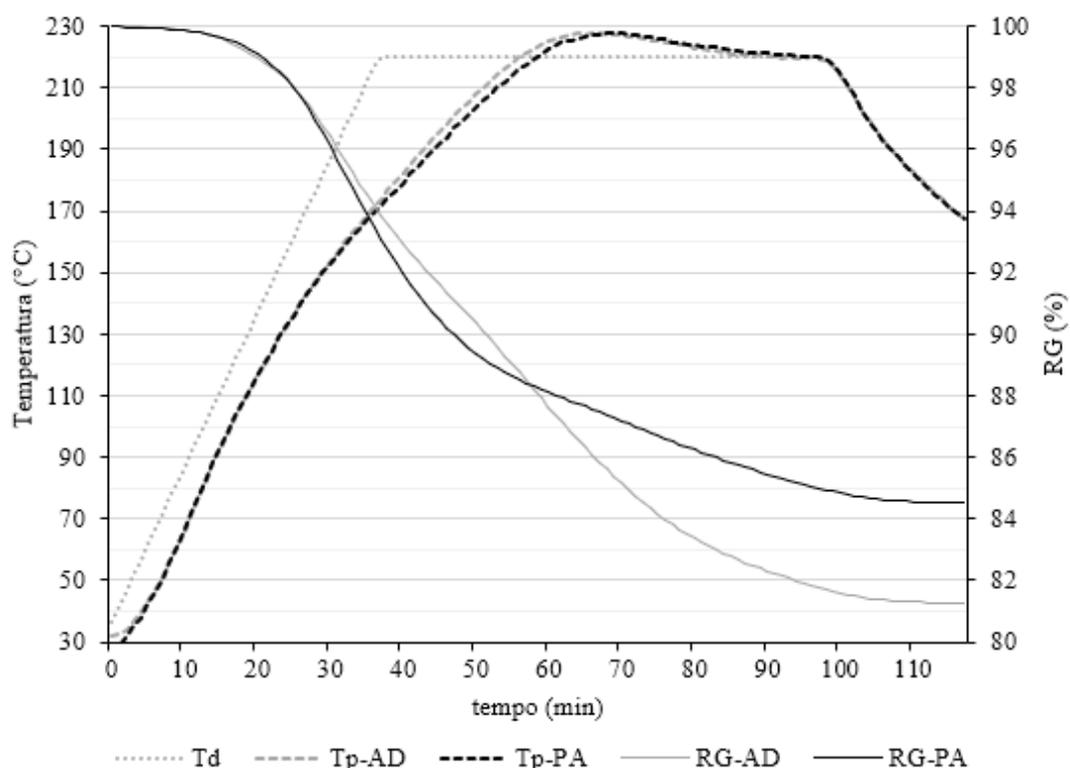
Gráfico 13 - Temperatura do processo e derivada da perda de massa na torrefação de *Phyllostachys aurea*

Houve um segundo pico com apenas 22% da intensidade do primeiro aos 75 minutos, onde a temperatura do processo está em 225°C. Esse pico corresponde a faixa de temperatura onde se inicia a degradação térmica dos componentes estruturais da biomassa lignocelulósica, especialmente as hemiceluloses, cujo pico de degradação

ocorre a 250°C conforme discutido anteriormente. A intensidade do segundo pico foi menor em relação à torrefação de *Arundo donax*, o que explica o menor rendimento em massa deste último, e sugere uma maior estabilidade térmica para a biomassa de *Phyllostachys aurea*.

### 4.3.3 Comparação da torrefação entre espécies

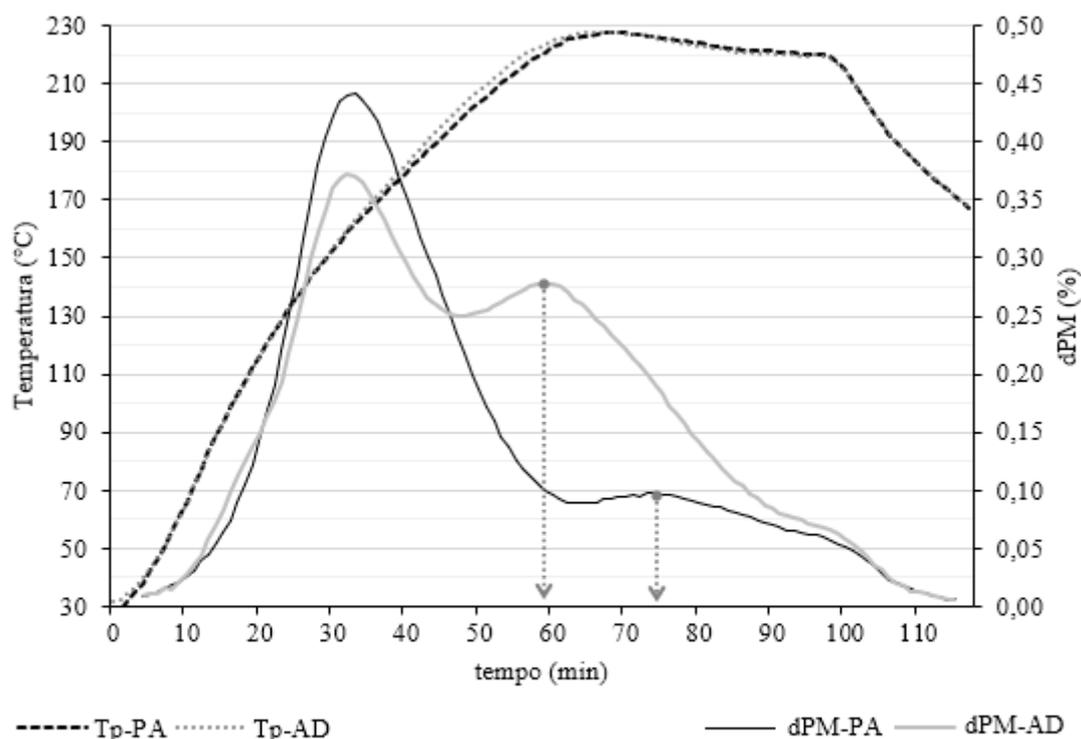
Diferentemente do que foi observado na carbonização, onde o efeito da umidade foi significativamente maior para *Phyllostachys aurea*, na torrefação os efeitos da umidade foram semelhantes, conforme se verifica nas curvas de temperatura do processo (Tp) no Gráfico 14. Possivelmente isso se deve ao fato de que na torrefação as massas iniciais das amostras eram equivalentes para todos os tratamentos, em torno de 550 g, diferentemente do processo de carbonização, que iniciou com maiores massa da amostra e massa de água para *Phyllostachys aurea*.



Td – Temperatura definida; Tp-AD – média das temperaturas de processo de *Arundo donax*; Tp-PA – média das temperaturas de processo de *Phyllostachys aurea*; RG-AD – média dos rendimentos gravimétricos de *Arundo donax*; RG-PA – média dos rendimentos gravimétricos de *Phyllostachys aurea*

Gráfico 14 – Curvas Tp e RG para os tratamentos de torrefação das duas espécies

Em relação ao rendimento gravimétrico, observou-se que *Arundo donax* teve perda de massa menor até 58 minutos, quando houve uma inversão, onde as curvas se cruzam e *Arundo donax* passa a perder massa de forma mais intensa. Isso se deveu ao fato de que o segundo pico de degradação de *Arundo donax* foi 2,75 vezes mais intenso, e ocorreu 15 minutos antes quando comparado a *Phyllostachys aurea*, como identificado pelas setas no Gráfico 15.

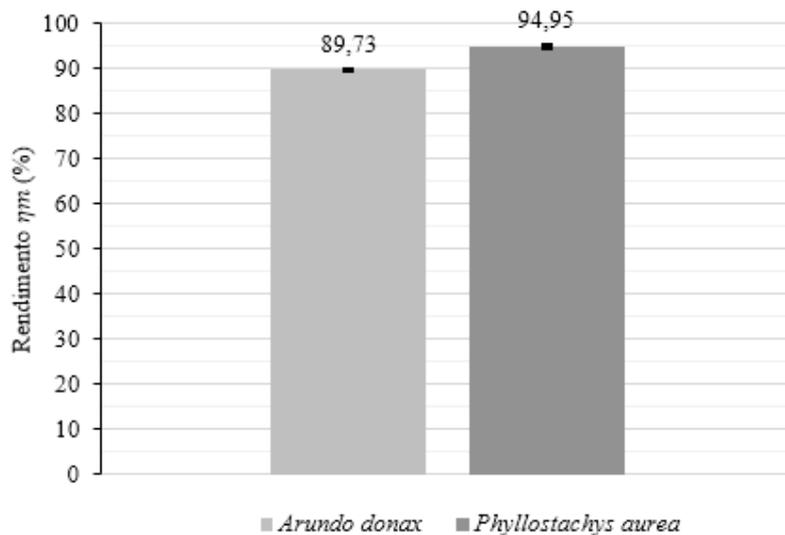


Tp-AD – média das temperaturas de processo de *Arundo donax*; Tp-PA – média das temperaturas de processo de *Phyllostachys aurea*; dPM-AD – derivada da perda de massa de *Arundo donax*; dPM-PA – derivada da perda de massa de *Phyllostachys aurea*

Gráfico 15 – Curvas Tp e dPM de torrefação de *Arundo donax* e *Phyllostachys aurea*

Desta forma, no patamar de 220°C observou-se a degradação dos componentes estruturais da biomassa lignocelulósica em maior intensidade na torrefação de *Arundo donax*, resultando também em menor rendimento em massa ao final do processo.

O rendimento gravimétrico sólido de *Arundo donax* e *Phyllostachys aurea* são apresentados no Gráfico 16 em base úmida, onde foi considerada a massa inicial do ensaio com seu teor de umidade inerente, e como massa final do material torreficado foi definida a massa de equilíbrio após condicionamento em embalagens plásticas, cujo teor de umidade será apresentado em seção adiante.

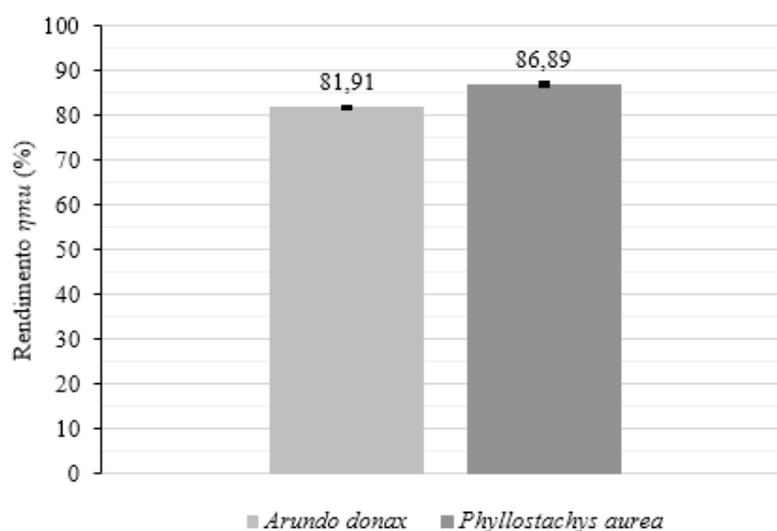


\* Barras nas colunas são desvio padrão ( $\leq 0,5$ )

Gráfico 16 – Rendimentos gravimétricos sólidos em base úmida das torrefações de *Arundo donax* e *Phyllostachys aurea*

O rendimento gravimétrico sólido base úmida ( $\eta_{mu}$ ) é um parâmetro sujeito às condições de umidade de equilíbrio observadas nesse processo específico, sendo um conceito útil para estabelecer uma previsão da massa real que se obterá no produto ao aplicar protocolo semelhante. Ademais,  $\eta_{mu}$  será utilizado para o cálculo do rendimento energético inferior.

No Gráfico 17 o rendimento gravimétrico sólido de *Arundo donax* e *Phyllostachys aurea* são apresentados em base seca, calculado mediante a exclusão do teor de umidade obtido para ensaios de caracterização das amostras *in natura*.



\* Barras nas colunas são desvio padrão ( $\leq 0,5$ )

Gráfico 17 – Rendimentos gravimétricos sólidos em base seca das torrefações de *Arundo donax* e *Phyllostachys aurea*

Observa-se que o rendimento sólido de *Phyllostachys aurea* foi aproximadamente 5% maior que *Arundo donax* em base seca, confirmando a diferença observada no segundo pico de degradação no Gráfico 15. De fato, *Arundo donax* foi mais suscetível à degradação térmica dos componentes estruturais, provavelmente por possui menor teor de lignina, que é o componente menos suscetível à degradação térmica em comparação com as hemiceluloses e celulose. Portanto era esperado menor rendimento sólido para *Arundo donax* na torrefação, tratamento que degrada principalmente hemiceluloses.

Os rendimentos sólidos encontrados estão de acordo com Correia et al. (2017), que encontraram para *Arundo donax* 88,5% de rendimento para torrefação de 60 min a 200°C e 70% de rendimento para torrefação de 60 min a 250°C, todas em base úmida a 9,7% de umidade da biomassa inicial. O valor em base úmida encontrado neste estudo se situa entre aqueles encontrados no referido estudo, o que era esperado em função da temperatura escolhida ter sido intermediária entre os dois tratamentos.

O rendimento em base seca de *Arundo donax* difere daqueles encontrados por Ramsurrun e Surrop (2019), que foi 81%, para torrefação de 60 min a 225°C. Nesse estudo, porém, várias diferenças de protocolo podem explicar o menor rendimento, como uso da amostra moída em pó, aumentando a superfície de contato, e utilizando massa inicial seca, o que acelera a ocorrência da degradação em relação a materiais úmidos.

Quanto a *Phyllostachys aurea*, nenhum tratamento semelhante foi encontrado na literatura. Bada et al. (2016) realizaram torrefação a 250°C desta espécie, mas não apresentaram rendimento gravimétrico. Rousset et al. (2011) realizaram torrefação de protocolo semelhante para outra espécie de bambu (*Bambusa vulgaris*) a 220°C, e obtiveram rendimento gravimétrico de 91%, próximo ao valor aqui obtido.

## 4.4 BRIQUETAGEM

### 4.4.1 Briquetagem da matéria-prima *in natura*

O Gráfico 18 mostra a distribuição granulométrica da matéria-prima *in natura* triturada de *Arundo donax* e *Phyllostachys aurea* utilizada para a briquetagem. A classificação foi realizada com o teor de umidade base seca de 7,7% para a primeira espécie e de 8,7% para a segunda, ambos dentro da margem exigida pela ISO 17830 (2016). Observou-se que a distribuição granulométrica foi semelhante entre as duas matérias-primas, com *Phyllostachys aurea* tendo mais frações de partículas maiores (maiores que 2 mm) e *Arundo donax* mais frações medianas, entre 1 mm e 2 mm.

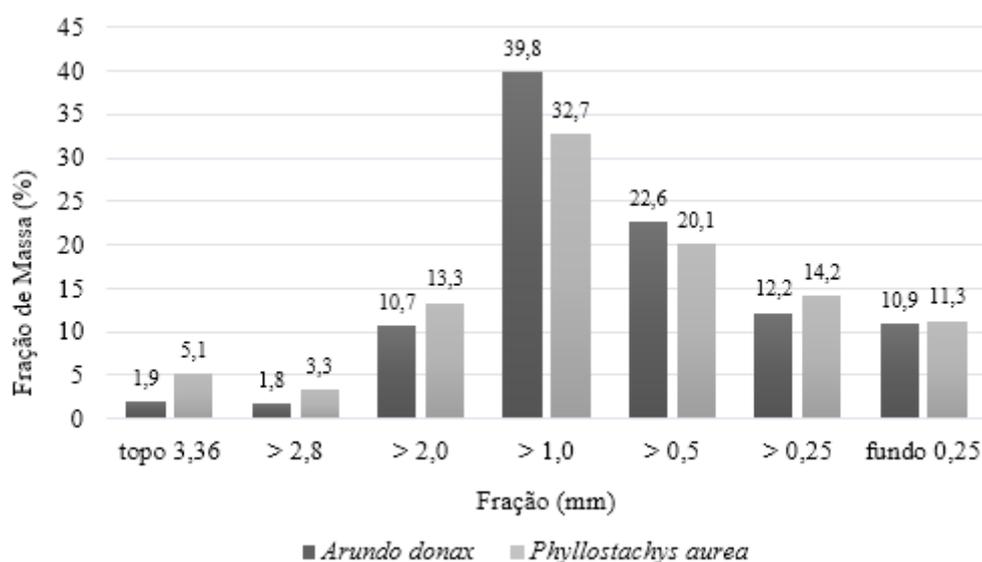


Gráfico 18 – Distribuição granulométrica da matéria-prima para briquetagem de *Arundo donax* e *Phyllostachys aurea*.

Observou-se durante o processo de briquetagem de *Arundo donax* a produção de uma substância de consistência resinosa originária da própria biomassa, condensada no topo do briquete conforme a Figura 18. O fato corrobora o alto teor de extrativos apresentado por Neto et al. (1997). Essa substância apresentou bastante aderência às partes metálicas, o que acarretou necessidade constante de pausas para limpeza.

Em testes preliminares com temperaturas mais baixas, em torno de 90°C no pistão, a biomassa não liberou a resina, mesmo quando utilizou-se pressão mais alta de compactação, em torno de 10 MPa.



Figura 18 – Detalhe em destaque da resina na parte superior do briquete de *Arundo donax*  
Foto: Autor

Isso sugere que a liberação dessa resina seria mais sensível à temperatura e ao tempo de compactação do que à pressão. Porém o briquete produzido abaixo de 100°C apresentou menor resistência mecânica, o que indica a necessidade de mais pesquisas para encontrar um protocolo ótimo.

#### 4.4.2 Briquetagem da matéria-prima torrificada

O Gráfico 19 apresenta a distribuição granulométrica do material torrificado que serviu de matéria-prima para briquetagem de *Arundo donax* e *Phyllostachys aurea*, com teores de umidade em base seca de 4,2% para a primeira espécie e 4,1% para a segunda. Verificou-se, em relação ao material *in natura*, maior distribuição granulométrica com partículas menores. *Phyllostachys aurea* apresentou maiores proporções nas frações maiores que 1 mm, enquanto *Arundo donax* nas frações menores que 1 mm.

A distribuição de partículas mais finas em relação ao material *in natura*, apesar do mesmo protocolo de moagem, evidenciou o aumento de friabilidade que se obteve com a torrefação. Maior friabilidade implica maior eficiência na moagem e processamento, com menor gasto de tempo e energia.

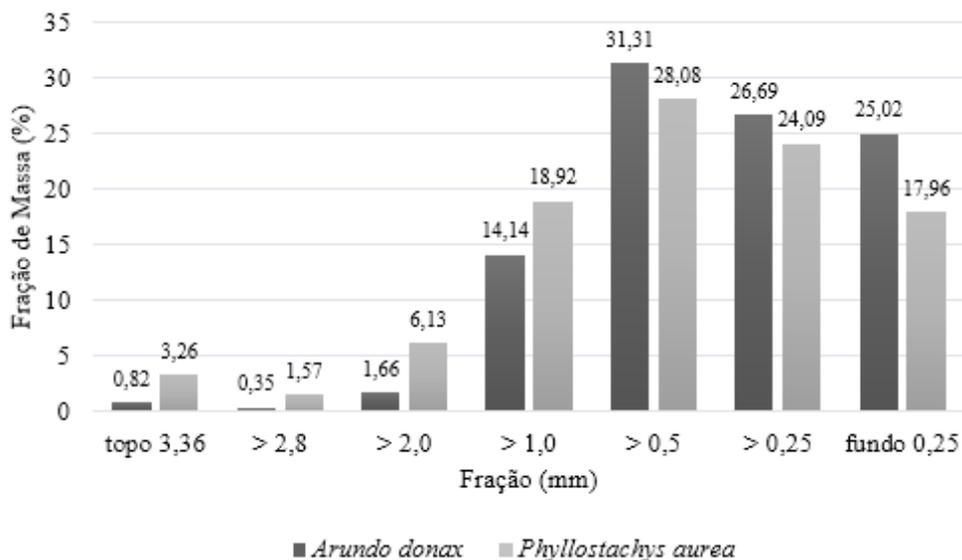


Gráfico 19 – Distribuição granulométrica para briquetagem de torreficado

Os briquetes produzidos com material torreficado apresentaram-se com aspecto rígido, apesar do baixo teor de umidade da matéria prima, recomendado entre 8% e 12% por Gonçalves (2010). Ademais, a torrefação a 220°C eliminou substancialmente a resina produzida na briquetagem de *Arundo donax in natura*, facilitando a aplicação do tratamento.

Uma vantagem observada para a briquetagem de torreficado de ambas espécies foi a possibilidade de se compactar um material termicamente tratado sem a necessidade de se utilizar um aglutinante, como é necessário para compactar carvão. Além de ser mais homogêneo, menos higroscópico e, conseqüentemente, com mais energia útil por unidade de massa e de volume em comparação com o briquete da biomassa *in natura*.

#### 4.5 PELETIZAÇÃO

Por se tratar de um equipamento industrial de pequeno porte, o protocolo de peletização permitiu apenas o controle da granulometria, teor de umidade e da taxa de alimentação do processo. A taxa de alimentação variou até 20% em torno da média, 75 kg/h. Como a temperatura da matriz tende a aumentar no tempo de operação, causando aumento da pressão, o motor principal é forçado a operar com maior corrente elétrica, sendo necessária a redução da taxa de alimentação para reduzir o atrito na matriz e, conseqüentemente, a corrente exigida pelo motor.

Em situação oposta, a operação do motor em baixa corrente decorre de baixa pressão sobre a matriz, assim, a taxa de alimentação foi aumentada. Deste modo se justifica a oscilação de cerca de 20% em torno da média, pois os ajustes ocorreram para manter o motor operando em faixa segura de corrente, entre 10A e 20A, conforme recomendado pelo fabricante.

Conforme relatado em Materiais e Métodos, as peletizações de *Arundo donax* e *Phyllostachys aurea* ocorreram em protocolos bastante distintos em relação ao preparo da matéria-prima *in natura*. Em primeiro lugar, a peletização de *Arundo donax* realizou-se com extrema facilidade, não necessitando de muito preparo além dos cuidados com a distribuição granulométrica, que consta no Gráfico 20. Não foi necessário ajustar o teor de umidade, que no caso foi de 6,91% em base seca, considerado um baixo teor frente às recomendações existentes para briquetagem (GONÇALVES, 2010).

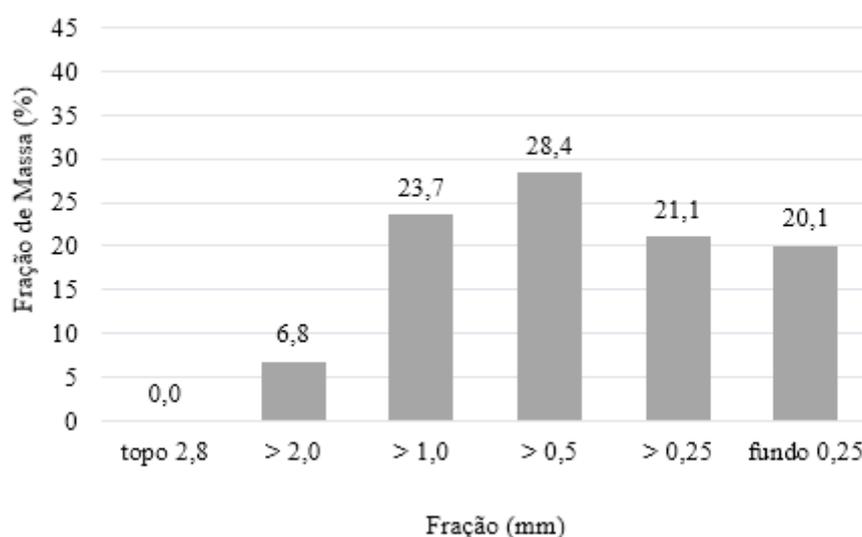


Gráfico 20 – Distribuição granulométrica da matéria-prima de *Arundo donax* para peletização

Já para *Phyllostachys aurea* foi necessário o uso de uma granulometria muito mais fina, evidenciada no Gráfico 21, e com teor de umidade ajustado para 38,5% base seca, muito acima do que se tem de recomendação para briquetagem no referido autor. Porém os resultados foram bastante significativos, sendo o tratamento que resultou na maior densidade sólida neste estudo, conforme será discutido em seção adiante.

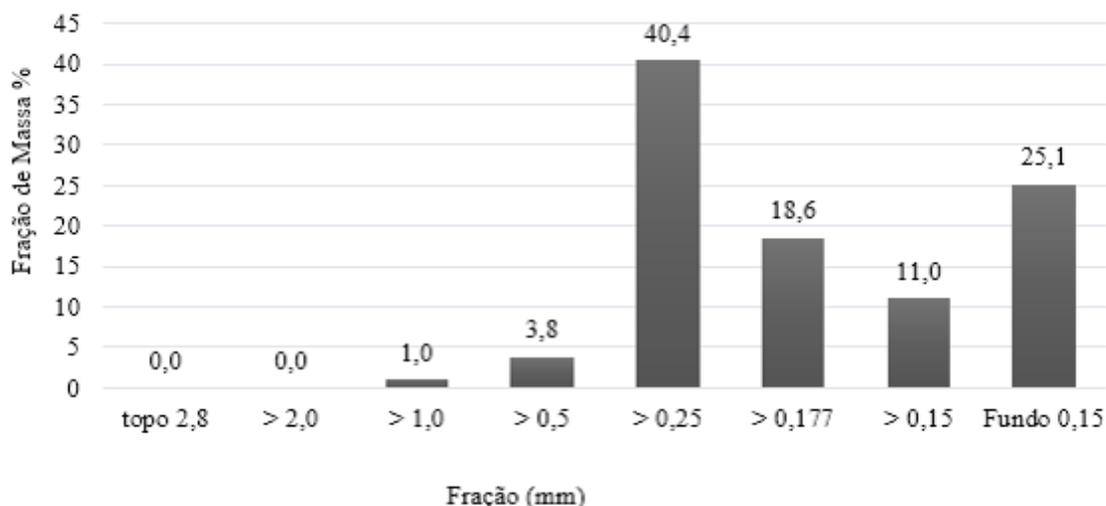


Gráfico 21 – Distribuição granulométrica da matéria-prima de *Phyllostachys aurea* para peletização

O processo de peletização gerou muitos finos em ambos os casos, porém foi produzida uma proporção substancial de péletes com alta densidade sólida e com aspecto vitrificado na superfície lateral, conforme se observa na Figura 19. Os péletes com aspecto vitrificado são aqueles com maior resistência mecânica, nos quais se verifica maior dificuldade de quebra com as mãos. De modo geral *Arundo donax* apresentou menor proporção de péletes vitrificados.



Figura 19 – Aspecto geral de péletes de *Arundo donax* (A) e *Phyllostachys aurea* (B)  
Fotos: Autor

Aragón-Garita et al. (2016) realizaram estudo de peletização com *Arundo donax* e *Phyllostachys aurea*, além de outras três espécies. Os autores utilizaram distribuições granulométricas e de umidade diversas às adotadas neste estudo, onde mais de 1/3 das partículas de *Arundo donax* eram maiores que 4,0 mm, com 12,5% de umidade, e mais

de 1/3 das partículas de *Phyllostachys aurea* eram maiores que 2,0 mm, com 7,6% de umidade. Como resultado os autores conseguiram densidade média de 1,29 g/cm<sup>3</sup> e 1,17 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente para *Arundo donax* e *Phyllostachys aurea*. Observaram que os péletes de *Phyllostachys aurea* apresentaram maior número de fissuras e menor resistência mecânica em relação às demais espécies.

Para ambas espécies foi observada grande geração de finos na peletização, o que é negativo para o rendimento do produto. Possivelmente é um problema resultante das limitações do processo, conforme dito anteriormente, onde o equipamento é desenvolvido para operar em modo contínuo. Apesar das limitações, os resultados apresentaram a viabilidade técnica de produzir péletes de qualidade a partir da biomassa das duas espécies.

## 4.6 CARACTERIZAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS E ENERGÉTICAS

### 4.6.1 Teor de umidade dos tratamentos

O teor de umidade determinado para os tratamentos em base úmida e base seca são apresentados na Tabela 3.

Tabela 4 – Teores de umidade dos tratamentos e respectivos coeficientes de variação

Espécie	Tratamento	TU <sub>bs</sub> %	CV %	TU <sub>bu</sub> %	CV %
<i>Arundo donax</i>	<i>In natura</i>	10,43	5	9,45	4
	Torrificado	0,81	55	0,80	55
	Carvão	0,00	0	0,00	0
	Péletes	2,18	17	2,13	17
	Briquete	9,19	4	8,41	4
	Briquete de torrificado	3,71	3	3,58	3
<i>Phyllostachys aurea</i>	<i>In natura</i>	12,35	3	10,99	3
	Torrificado	2,81	15	2,73	15
	Carvão	0,00	0	0,00	0
	Péletes*	4,34	-	4,16	-
	Briquete	8,42	1	7,8	1
	Briquete de torrificado	3,65	2	3,53	2

TUbs – teor de umidade base seca; TUbu – teor de umidade base úmida; CV – coeficiente de variação.

\*Péletes de *Phyllostachys aurea* em repetição única.

A determinação dos teores de umidade é fundamental para subsidiar as análises de rendimento gravimétrico dos processos termoquímicos, estimar o poder calorífico inferior, que representa a energia útil disponível por unidade de massa do produto, bem como calcular a densidade energética útil do granel, que representa a quantidade de energia útil por volume de material.

Observou-se que os processos termoquímicos reduziram significativamente o teor de umidade, conforme esperado, pois a biomassa termicamente tratada foi menos higroscópica que na condição *in natura*. A torrefação reduziu a umidade em 92% para *Arundo donax* e 77% para *Phyllostachys aurea* em base seca, enquanto a carbonização reduziu em 100% para as duas espécies. Observou-se alto coeficiente de variação na umidade de *Arundo donax* torreficado, o que se deveu aos valores de umidade das repetições estarem muito baixos, perto do limiar de detecção da balança de precisão, tornando significativo o erro instrumental.

Os processos de densificação também reduziram significativamente o teor de umidade em relação ao material *in natura*, especialmente a peletização. A briquetagem reduziu a umidade em 12% para *Arundo donax* e 32% para *Phyllostachys aurea* em base seca, enquanto a peletização reduziu em 79% para *Arundo donax*. É interessante notar a diferença de impacto entre os dois tratamentos na umidade do produto, com a peletização apresentando redução percentual muito superior à briquetagem.

Provavelmente a temperatura da peletização ocorreu em temperatura média acima dos 130°C da briquetagem, mas outros fatores também podem explicar o maior impacto da peletização na umidade: (1) superfície de contato, que foi muito superior nos péletes em relação aos briquetes, facilitando a secagem durante o atrito, e (2) granulometria da matéria-prima, que foi significativamente mais fina na peletização, o que também facilitou a secagem.

Observou-se também que a briquetagem tornou o teor de umidade mais homogêneo entre as duas espécies, com menor diferença absoluta e relativa em relação ao material *in natura*.

Nos tratamentos de briquetagem de torreficado, observou-se que o produto apresentou teor de umidade superior ao da matéria prima, aumentando de 0,81% para 3,71% em *Arundo donax* e de 2,81% para 3,65% em *Phyllostachys aurea*. Provavelmente o tempo de resfriamento após a briquetagem permitiu esse ganho de umidade, o que teria ocorrido com o material torreficado caso fosse exposto ao ar livre após a torrefação. Como este foi retirado do reator diretamente para a embalagem plástica, manteve-se em um teor de umidade reduzido.

#### 4.6.2 Densidade sólida e densidade do granel

A Tabela 5 apresenta as médias de densidade do granel, densidade sólida seca e densidade sólida em umidade de equilíbrio, com os grupos homogêneos do teste de médias de Tukey.

Tabela 5 – Valores médios de densidades e teste de médias de Tukey\*

Tratamento	DG g/cm <sup>3</sup>	DSs g/cm <sup>3</sup>	DSu g/cm <sup>3</sup>
<i>P. aurea</i> briquete	0,94 a	1,14 b	1,21 b
<i>A. donax</i> briquete torreficado	0,94 a	1,17 b	1,23 ab
<i>A. donax</i> briquete	0,92 a	1,05 c	1,19 b
<i>P. aurea</i> briquete torreficado	0,91 a	1,13 b	1,19 b
<i>A. donax</i> péletes	0,67 b	1,27 a	1,28 a
<i>P. aurea in natura</i>	0,23 c	0,81 d	0,85 c
<i>A. donax in natura</i>	0,20 cd	0,63 f	0,70 e
<i>P. aurea</i> torreficado	0,20 cd	0,75 e	0,76 d
<i>A. donax</i> torreficado	0,18 d	0,60 f	0,60 f
<i>P. aurea</i> carvão	0,11 e	0,45 g	0,45 g
<i>A. donax</i> carvão	0,08 e	0,35 h	0,35 h

DG – Densidade do granel; DSs – Densidade sólida seca a 0% de umidade; DSu – Densidade sólida em umidade de equilíbrio.

\* a 0,05 de significância. Letras iguais na mesma coluna não se diferem estatisticamente.

A densificação possibilitou a obtenção de combustíveis sólidos de maiores densidades. Quando se observa a densidade do granel destaca-se a briquetagem e briquetagem após torrefação, ao passo que a peletização resultou no maior valor de densidade sólida seca, enquanto na densidade sólida úmida não diferiu estatisticamente do briquete torreficado de *Arundo donax*.

Os briquetes são armazenados em granel de forma empilhada e ordenada, enquanto os péletes foram armazenados em posição aleatória dentro de recipientes. A organização dos briquetes resultou em menor volume vazio entre os corpos de prova em comparação com os péletes, resultando em maior densidade do granel.

Também é possível ver o efeito dos tratamentos termoquímicos nas densidades, que em geral reduzem o valor em relação a *in natura*. A severidade da degradação térmica nos processos termoquímicos, resultando em maior ou menor grau de perda de massa em função da temperatura do tratamento, impacta as densidades sólida e do granel dos produtos.

Observou-se que a alta degradação da massa na carbonização resultou em grande redução das densidades em relação à condição *in natura*, redução de cerca de 50 %. No caso da torrefação, por outro lado, alguns tratamentos não diferiram significativamente da média *in natura*, caso da densidade a granel de *Phyllostachys aurea in natura* e torreficado, e da densidade sólida seca de *Arundo donax in natura* e torreficado.

Os péletes de *Phyllostachys aurea* não entraram na análise estatística, mas a única repetição apresentou densidade do granel de 0,78 g/cm<sup>3</sup>, densidade sólida em umidade de equilíbrio de 1,30 g/cm<sup>3</sup> e densidade sólida seca de 1,28 g/cm<sup>3</sup>, sendo valores maiores que as médias dos péletes de *Arundo donax*, e corroborando o aspecto mais rígido e vitrificado observado na Figura 19. Assim, se torna um tratamento promissor para futuras análises, pois maiores densidades dos péletes de *Phyllostachys aurea* divergem dos achados de Aragón-Garita et al. (2016) para essas espécies.

#### **4.6.3 Poder calorífico superior e poder calorífico inferior**

Os resultados de poder calorífico superior (PCS) obtidos no calorímetro isoperibol, e de poder calorífico inferior (PCI) calculados são apresentados na Tabela 6.

Verificou-se o grande impacto dos tratamentos termoquímicos no PCS, chegando a incrementos de 7% e 54% para *Arundo donax* torreficado e carvão, respectivamente; e 3% e 53% para *Phyllostachys aurea* torreficado e carvão, respectivamente. Observou-se, ao se levar em conta as reduções no teor de umidade e no teor de hidrogênio nos produtos torreficado e carvão, ganhos mais expressivos para o PCI: 20% e 81% para *Arundo donax* torreficado e carvão; e 14% e 85% para *Phyllostachys aurea* torreficado e carvão. Os tratamentos de densificação produziram combustíveis com umidades inferiores àquelas do material de origem para as duas espécies, resultando em ganhos de energia útil no PCI.

Tabela 6 – Poder calorífico superior e inferior e respectivos coeficientes de variação

Espécie	Tratamento	PCS	CV	PCI	CV
		MJ/kg	%	MJ/kg	%
<i>Arundo donax</i>	<i>In natura</i>	18,85	0,4	15,71	0,7
	Torrificado	20,21	0,5	18,90	0,6
	Carvão	28,95	2,4	28,41	2,5
	Péletes	-	-	17,21	0,1
	Briquete	-	-	15,94	0,5
	Briquete de torreficação	-	-	18,30	0,1
<i>Phyllostachys aurea</i>	<i>In natura</i>	19,95	0,3	16,22	0,3
	Torrificado	20,50	0,2	18,50	0,1
	Carvão	30,54	1,3	29,94	1,3
	Briquete	-	-	16,90	0,1
	Briquete de torreficação	-	-	18,33	0,1

PCS – Poder calorífico superior; PCI – poder calorífico inferior; CV – Coeficiente de variação

Os tratamentos de densificação ocorrem a temperaturas em torno de 100°C e com baixo tempo de residência, resultando em poucas ou praticamente nulas alterações termoquímicas na matéria-prima. Assim, foram utilizados no cálculo do PCI dos produtos compactados o valor de PCS obtido das médias para a matéria prima da densificação: *in natura* no caso de peletização e briquetagem, e torreficado no caso de briquetagem após torreficação.

Os tratamentos termoquímicos resultaram em substantiva queda na densidade, observadas em função do maior impacto do tratamento na massa em relação ao volume da biomassa, porém há um substancial ganho de energia observado, especialmente de energia útil, expressa no PCI.

A amostra dos péletes de *Phyllostachys aurea* apresentaram PCI calculado em 17,65 MJ/kg, valor maior, em termos absolutos, que o PCI de péletes de *Arundo donax*, mesmo com o teor de umidade menor para este último. Futuras estudos podem avaliar estatisticamente o poder calorífico dos péletes de *Phyllostachys aurea*.

#### 4.6.4 Densidade energética

A Tabela 7 apresenta as médias de densidade energética calculadas em função da densidade e poder calorífico da matéria-prima, e os grupos homogêneos do teste de médias de Tukey.

Tabela 7 – Valores médios das densidades energéticas e teste de médias de Tukey\*

Tratamentos	DEG		DESS		DESi	
	GJ/m <sup>3</sup>		GJ/m <sup>3</sup>		GJ/m <sup>3</sup>	
<i>A. donax</i> briquete torreficado	17,11	a	23,71	a	22,41	a
<i>P. aurea</i> briquete torreficado	16,68	a	23,24	ab	21,76	a
<i>P. aurea</i> briquete	15,81	b	22,67	b	20,46	b
<i>A. donax</i> briquete	14,69	c	19,87	c	18,93	c
<i>A. donax</i> péletes	11,49	d	23,97	a	22,07	a
<i>P. aurea</i> torreficado	3,71	e	15,42	d	14,14	d
<i>P. aurea</i> in natura	3,66	e	16,26	d	13,79	d
<i>A. donax</i> torreficado	3,32	e	12,07	f	11,29	e
<i>A. donax</i> in natura	3,16	e	11,90	f	10,96	ef
<i>P. aurea</i> carvão	3,12	e	13,75	e	13,48	d
<i>A. donax</i> carvão	2,37	f	10,18	g	9,99	f

DEG – Densidade energética do granel; DESS – Densidade energética sólida superior; DESi – Densidade energética sólida inferior.

\* a 0,05 de significância. Letras iguais na mesma coluna não se diferem estatisticamente.

A densidade energética do granel expressou o alto potencial energético estocado por unidade de volume nos produtos compactados, que apresentaram substantiva diferença para os produtos que mantiveram a forma anatômica dos colmos, com seus espaços vazios nos entrenós. As densidades energéticas de briquetes de *Arundo donax* *Phyllostachys aurea* foram, respectivamente, 440% e 356% superiores à densidade energética do material *in natura*. Tal incremento foi devido à combinação de tratamento termoquímico e de densificação, onde ganhos de energia útil pela transformação termoquímica se somaram à eliminação de espaços vazios pela densificação.

Quanto às densidades energéticas sólidas, é interessante notar que a densidade energética sólida inferior do carvão de *Phyllostachys aurea* não apresentou diferença significativa quando comparado ao material torreficado e ao material *in natura*, mas quando se retoma apenas a densidade sólida em umidade de equilíbrio (DSu) na Tabela 5, a diferença foi significativa entre os três. Conclui-se que os ganhos com energia útil no material sólido carvão (descontados espaços vazios) praticamente compensam o efeito de redução na densidade sólida em relação aos produtos *in natura* e torreficado.

Para o carvão e o material *in natura* de *Arundo donax* não houve diferença significativa na densidade energética sólida inferior, enquanto *Arundo donax* torreficado foi significativamente superior nesse parâmetro. Saikia et al. (2015) sugerem usos não energéticos para carvão de *Arundo donax* devido às baixas densidades bem como a abundância de minerais alcalinos nas cinzas, tornando-o um produto adequado como carvão ativado ou como corretivo de solos ácidos.

Ainda no âmbito das densidades energéticas sólidas, surpreendeu o fato dos péletes de *Arundo donax* serem estatisticamente iguais aos briquetes após torrefação. De fato, os péletes produzidos apresentaram um teor de umidade muito baixo, abaixo daqueles relatados por Aragón-Garita et al. (2016). Assim, se obteve com a peletização densidades energéticas sólidas semelhante aos tratamentos de densificação que combinaram a torrefação, que é um processo que traz incrementos de poder calorífico superior.

Péletes de *Phyllostachys aurea* apresentaram densidade energética do granel de 13,8 GJ/m<sup>3</sup>, densidade energética sólida superior de 25,5 GJ/m<sup>3</sup>, e inferior de 22,9 GJ/m<sup>3</sup>, sendo todos os valores superiores às médias dos péletes de *Arundo donax*, portanto, um tratamento promissor para futuras análises.

#### **4.6.5 Rendimentos sólidos e energéticos dos tratamentos termoquímicos**

A Tabela 8 mostra os rendimentos em energia após a aplicação dos tratamentos termoquímicos. Geralmente o rendimento energético é expresso na literatura apenas na forma superior, desconsiderando a umidade ao utilizar rendimento em base seca e razão de poder calorífico superior. Neste estudo será discutido também o rendimento energético inferior.

Tabela 8 – Rendimentos gravimétricos sólidos seco e em umidade de equilíbrio, e rendimentos energéticos superior e inferior com respectivos coeficientes de variação

Espécie	Tratamento	$\eta_m$	$\eta_{Es}$	CV %	$\eta_{mu}$	$\eta_{Ei}$	CV %
<i>Arundo donax</i>	Torrificado	89,73	<b>96,2</b>	0,3	81,91	<b>98,4</b>	0,6
	Carvão	37,12	<b>57</b>	4	33,61	<b>61</b>	4
<i>Phyllostachys aurea</i>	Torrificado	94,95	<b>97,6</b>	0,4	86,89	<b>99,1</b>	0,5
	Carvão	34,15	<b>52</b>	2	30,40	<b>56</b>	2

$\eta_m$  - Rendimento gravimétrico sólido seco;  $\eta_{Es}$  - rendimento energético superior;  $\eta_{mu}$  - rendimento gravimétrico sólido em umidade de equilíbrio;  $\eta_{Ei}$  - rendimento energético inferior. CV – coeficiente de variação.

Correia et al. (2017) encontraram rendimentos energéticos para torrefação de *Arundo donax* de 97,3% para 200°C e 83,1% para 250°C. Como o tratamento desse estudo foi em temperatura intermediária entre os tratamentos adotados no referido estudo, é esperado rendimento energético também intermediário, o que foi confirmado (96,2%). Já Ramsurrun e Surrop (2019) encontraram rendimento energético abaixo dos valores deste estudo, de 88,8% a 225°C. Mas conforme foi mencionado, no referido estudo foi feita a torrefação sobre material seco e moído, o que facilitou maior degradação.

Oginni e Singh (2019) encontraram rendimento energético de 47% em carbonização de *Arundo donax* realizada a 500°C e com taxa de 7°C/min. Como a taxa adotada foi o dobro da deste estudo, além da temperatura mais alta, a degradação do produto sólido seria maior em relação ao deste estudo. De fato, os autores obtiveram rendimento sólido significativamente menor que o encontrado neste estudo (30,1% contra 37,1), sendo o fator que mais afetou o rendimento energético obtido.

Rousset et al. (2011) realizaram protocolo de torrefação semelhante para *Bambusa vulgaris* e obtiveram rendimento energético de 96,1%, próximo ao valor obtido para *Phyllostachys aurea* torreficado (97,6%). Já para o carvão de *Phyllostachys aurea*, Sette Junior et al. (2017) obtiveram rendimento gravimétrico de 32,7%, permitindo calcular o rendimento energético em 50,3%, valor dentro de (52±2)% obtido nesse estudo.

Os rendimentos energéticos inferiores foram aqui calculados para estimar o rendimento energético do produto em um cenário de comercialização. Neste caso a umidade é levada em consideração nos dois termos do rendimento energético: na razão de poder calorífico inferior e no rendimento sólido em umidade de equilíbrio.

É interessante notar que para todos os tratamentos termoquímicos o rendimento energético inferior superou o rendimento energético superior. Para todos os casos  $\eta_{mu}$  foi inferior a  $\eta_m$  em função do denominador ter maior valor por incluir massa de água, porém a razão de poder calorífico inferior supera a redução observada no rendimento gravimétrico para todos os casos.

#### 4.6.6 Análise Imediata

Os resultados para os produtos *in natura*, torreficado e carvão são expressos considerando que os tratamentos de densificação não alteraram a composição química da matéria-prima. A Tabela 9 apresenta os teores de carbono fixo (CF), de cinzas (Cz) e de matérias voláteis (MV) para os tratamentos, com o teste de médias de Tukey ao nível de 5% de significância.

Tabela 9 – Valores médios de carbono fixo, cinzas e matérias voláteis e teste de médias de Tukey\*.

Tratamentos	CF %	Cz %	MV %
<i>P. aurea</i> carvão	73,62 a	4,22 b	22,16 d
<i>A. donax</i> carvão	69,07 b	9,08 a	21,85 d
<i>A. donax</i> torreficado	21,59 c	3,29 bc	75,11 c
<i>P. aurea</i> torreficado	17,35 d	1,02 d	81,64 ab
<i>A. donax in natura</i>	17,29 d	2,90 c	79,81 b
<i>P. aurea in natura</i>	15,28 d	1,01 d	83,70 a

CF – Teor de carbono fixo; Cz – teor de cinzas; MV – teor de matérias voláteis.

\* a 0,05 de significância. Letras iguais na mesma coluna não se diferem estatisticamente.

A temperatura dos tratamentos termoquímicos impacta a concentração de carbono fixo e redução de matérias voláteis, como observado no carvão de ambas espécies em relação aos torrificados e *in natura*.

O carvão de *Arundo donax* possui mais que o dobro do teor de cinzas em relação ao carvão de *Phyllostachys aurea*, corroborando ao maior rendimento gravimétrico para o carvão de *Arundo donax*, apesar de ter menor teor de lignina. De fato, a maior concentração de cinzas explica parte do rendimento gravimétrico elevado observado na discussão da carbonização das duas espécies.

É interessante notar que, para o material torrificado de *Arundo donax*, houve significativa redução do teor de voláteis quando comparado ao material *in natura*, e isso não se verificou para a *Phyllostachys aurea*. Para *Arundo donax*, a baixa temperatura de torrefação causou devolatilização da amostra em maior intensidade em relação a outra espécie, o que é corroborado pelos picos observados no Gráfico 15, onde *Arundo donax* apresentou um segundo pico durante o patamar de temperatura muito mais evidente que o segundo pico de *Phyllostachys aurea*.

Os teores de matérias voláteis encontrados para *in natura* e carvão de *Phyllostachys aurea* diferiram dos encontrados por Sette Junior et al. (2017), que consistiram em 81,5% e 25,4%. Também houve diferença nos resultados de carbono fixo da biomassa e do carvão, 17,6% e 69,4%. Parte da diferença dos resultados com o carvão podem ser explicados por diferenças nos protocolos de carbonização, onde o teste do presente estudo teve duração mais longa, provavelmente explicando a maior concentração de carbono fixo.

## 5 CONCLUSÕES

Todos os tratamentos evidenciam o potencial energético para as espécies *Arundo donax* e *Phyllostachys aurea*. Destaque ao teor de cinzas bastante reduzido encontrado para *Phyllostachys aurea* no DF, o que o aproxima das madeiras mais do que as outras espécies de bambu.

Os processos termoquímicos sofreram impactos no perfil térmico da amostra em função de diferenças no teor de umidade de equilíbrio e por diferenças de constituição química entre as espécies. *Arundo donax*, por apresentar biomassa mais seca e menor teor de lignina, apresentou maior propensão à degradação térmica, apresentando as reações de degradação em tempo mais curto que *Phyllostachys aurea*. O teor de cinzas do carvão de *Arundo donax* foi 2,2 vezes maior que o do carvão de *Phyllostachys aurea*, o que influenciou o rendimento sólido mais elevado do carvão de *Arundo donax*.

A densidade energética do granel para carvão de *Phyllostachys aurea* não diferiu daquelas para os tratamentos *in natura* e torreficado das duas espécies. Por outro lado, a densidade energética do granel para carvão de *Arundo donax* foi significativamente inferior em comparação aos tratamentos *in natura* e torreficado. Carvão de *Arundo donax* pode ser utilizado para fins energéticos se combinado a algum tratamento de densificação, ou pode ser aproveitado em usos não energéticos.

Todos os tratamentos de densificação apresentaram efeito significativo sobre as densidades em comparação com os produtos *in natura*, torreficado e carvão. A briquetagem após torrefação atingiu as maiores densidades energéticas do granel. A peletização apresentou densidades energéticas sólidas equivalentes à briquetagem após torrefação.

As espécies podem ser utilizadas energeticamente na condição *in natura* com a recomendação de que seja feita secagem natural prévia.

Os tratamentos termoquímicos propiciaram ganhos de poder calorífico e teor de carbono fixo ao custo de menores rendimentos gravimétricos e energéticos. Porém esses produtos são mais propícios que o produto *in natura* para substituir o carvão mineral em sistema de cogeração.

Empacotar os produtos logo após o seu resfriamento no processo melhorou a energia útil e o rendimento energético inferior, pois os produtos torreficados e carvão conservaram baixos teores de umidade.

Os péletes de *Phyllostachys aurea* apresentaram resultados preliminares promissores na única repetição possível, divergindo dos dados da literatura. Isso sugere que a condição inicial da matéria-prima dos péletes de *Phyllostachys aurea* favoreceu o resultado encontrado neste estudo, onde a granulometria estava mais fina e o teor de umidade substancialmente mais alto que os parâmetros da literatura.

## 6 REFERÊNCIAS

ARAGÓN-GARITA, S.; MOYA, R.; BOND, B.; VALAERT, J.; TOMAZELLO-FILHO, M. Production and quality analysis of pellets manufactured from five potential energy crops in the Northern Region of Costa Rica. **Biomass and Bioenergy**, v. 87, s/n., p. 84-95, Oxford, 2016.

BADA, S.O.; FALCON, R.M.S.; FALCON, L.M.; BERGMAN, C. P. Cofiring potential of raw and thermally treated *Phyllostachys aurea* bamboo with coal. In: **Energy Sources**, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 38:10, 1345-1354, 2016.

BALAT, M.; BALAT, M.; KIRTAY, E.; BALAT, H. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems. In: **Energy Conversion and Management**, v. 50, n. 12, p. 3147-3157, 2009.

BARBOSA, Bruno M. G. **Fitorremediação de solos contaminados com Zn e Cr utilizando *Arundo donax* L.** Lisboa: FCT/UNL, 2014.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. In: **Scientia Forestalis**, n.14, p.9-20, Piracicaba: IPEF, 1977.

CENTRE FOR AGRICULTURAL AND BIOSCIENCE INTERNATIONAL (CABI). **Invasive Species Compendium: *Arundo donax* (Giant Reed)**. 2014. Disponível em: <<https://www.cabi.org/isc/datasheet/1940>>. Acessado em: <05/12/2019>.

CENTRE FOR AGRICULTURAL AND BIOSCIENCE INTERNATIONAL (CABI). **Invasive Species Compendium: *Phyllostachys aurea* (Golden Bamboo)**. 2016. Disponível em: <<https://www.cabi.org/isc/datasheet/42072>>. Acessado em: <05/12/2019>.

CALIFORNIA INVASIVE PLANT COUNCIL. ***Arundo donax* (giant reed): Distribution and Impact**. Report. State Water Resources Control Board, 2011.

CAMPOS, R.F. **Potencial Energético da Biomassa e do Carvão de Espécies de Bambu**. Ponta Grossa: UEPG, 2017.

CARNEIRO, A. C. O. Pirólise lenta da madeira para produção de carvão vegetal. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. (Ed.) **Bioenergia e biorrefinaria - Cana-de-açúcar e Espécies Florestais**, p. 429-455, Viçosa: UFV, 2013.

CARNEIRO, A.C.O.; CASTRO, A.F.N.M.; RENATO VINÍCIUS OLIVEIRACASTRO, ROSIMEIRE CAVALCANTE DOS SANTOS, LUMMA PAPASPYROU FERREIRA, RENATO AUGUSTO PEREIRADAMÁSIO E BENEDITO ROCHA VITAL. Potencial Energético da Madeira de *Eucalyptus sp.* em Função da Idade e de Diferentes Materiais Genéticos. In: **Revista Árvore**, v.38, n.2, p.375-381, Viçosa: UFV, 2014.

- CHEN, W. H.; PENG, J.; BI, X. T. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 847-866, 2015.
- CORREIA, R.; GONÇALVES, M.; NOBRE, C.; MENDES, B. Impact of torrefaction and low-temperature carbonization on the properties of biomass wastes from *Arundo donax* L. and *Phoenix canariensis*. In: **Bioresource Technology**, v.223, p. 210-218, 2017.
- CORNO, Luca; PILU, Roberto; ADANI, Fabrizio. *Arundo donax* L.: a non-food crop for bioenergy and bio-compound production. **Biotechnology advances**, v. 32, n. 8, p. 1535-1549, 2014.
- COSENTINO, S. Management and Yields of *Arundo donax* L. **FIBRA Summer School, Lignocellulosic Crops as Feedstock for Future Biorefineries**. Lisboa, 2014.
- GLOBAL INVASIVE SPECIES DATABASE – GSID. **Species profile: *Arundo donax***. 2018. Disponível em: <<http://www.iucngisd.org/gisd/species.php?sc=112>>. Acessado em: <20/06/2018>.
- GOMES, P. A.; OLIVEIRA, J. B. Teoria da carbonização da madeira. In: **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte, MG: CETEC, p. 27-41, 1980.
- GONÇALVES, J.E. **Avaliação energética e ambiental de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de *Eucalyptus grandis***. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho”, Botucatu, 104p., 2010.
- GUCKER, Corey L. *Phyllostachys aurea*. **Fire Effects Information System**. Rocky Mountain: USFS, 2009.
- HERNÁNDEZ-MENA, L. E.; PÉCORÁ, A. A. B.; BERALDO, A. L. Slow Pyrolysis of Bamboo Biomass: Analysis of Biochar Properties. In: **Chemical Engineering Transactions**, v. 37, p. 115-120, 2014.
- IBÁ. Indústria Brasileira de Árvores. **Relatório anual 2017**. São Paulo, 2017.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17225-1: Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 1: General requirements**. 2014.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17828: Solid biofuels — Determination of bulk density**. 2015.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17830: Solid biofuels — Particle size distribution of disintegrated pellets**. 2016.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 18122: Solid biofuels — Determination of ash content**. 2015.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 18123: Solid biofuels — Determination of the content of volatile matter**. 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 18125: Solid biofuels — Determination of calorific value.** 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 18134-1: Solid biofuels — Determination of moisture content — Oven dry method — Part 1: Total moisture — Reference method.** 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 18847: Solid biofuels — Determination of particle density of pellets and briquettes.** 2016.

KANG, K. Y.; YOON, S. L.; JEON, K. S.; PARK, M. S.; PARK, N. C. A Study on the Utilization of Ingredients and Fibers from Korean Bamboo Species in Value-added Industry: Part 1.-Changes in Chemical Composition of Moso, Henon, and Timber Bamboo According to the Bamboo Ages. In: **Journal of Korea Technical Association of The Pulp and Paper Industry**, v. 43, n. 3, p. 43-51, 2011.

KOLESIK, Peter; MILLS, Alan; SEDGLEY, Margaret. Anatomical characteristics affecting the musical performance of clarinet reeds made from *Arundo donax* L. (Gramineae). **Annals of Botany**, v. 81, n. 1, p. 151-155, 1998. Disponível em: <<https://doi.org/10.1006/anbo.1997.0548>>

LAM, P. S.; TOOYSEKANI, Z.; NAIMI, L. J.; SOKHANSANJ, S. Pretreatment and pelletization of woody biomass. In: **Pretreatment Techniques for Biofuels and Biorefineries**. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 93-116, 2013.

LOO, Sjaak van; KOPPEJAN, Jaap. **Handbook of Biomass Combustion and Co-Firing**. Twente University Press, 2002.

MAIA, C. M. B. de F; BARATTO, R. L.; GUIOTOKU, M.; SIQUEIRA, F. C. J.; MADARI, B. E.; LEAL, W. G. de O. Efeito da temperatura de carbonização sobre características físico-químicas dos carvões de duas espécies de bambu. In: **Embrapa Florestas-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. Brasília: Embrapa, 2013.

MARYLAND DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Weed Risk Assessment for *Phyllostachys aurea* Carr. ex A. & C. Rivière (Poaceae) – Golden bamboo.** Annapolis, 2016.

MELO, J. E. de; CORADIN, V. T. R.; MENDES, J. C. Classes de densidade para madeiras da Amazônia brasileira. In: **Silvicultura**, São Paulo, v. 12, n. 42, p. 695-699, 1992.

NETO, C. P.; SECA, A.; NUNES, A. M.; COIMBRA, M. A.; DOMINGUES, F.; EVTUGUIN, D.; SILVESTRE, A.; CAVALEIRO, J. A. S. Variations in chemical composition and structure of macromolecular components in different morphological regions and maturity stages of *Arundo donax*. In: **Industrial Crops and Products**, v. 6, n. 1, p. 51-58, 1997.

NICHOL, C.; WESTOVER, T. ***Arundo donax* Test Results**. U.S. Department of Energy National Laboratory; 2012.

NSANGANWIMANA, F.; MARCHAND, L.; DOUAY, F.; MENCH, M. *Arundo donax* L., a candidate for phytomanaging water and soils contaminated by trace elements and

producing plant-based feedstock. A review. In: **International journal of phytoremediation**, v. 16, n. 10, p. 982-1017, 2014.

PANWAR, N. L.; KOTHARI, Richa; TYAGI, V. V. Thermo chemical conversion of biomass–Eco friendly energy routes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 4, p. 1801-1816, 2012.

OGINNI, O.; SINGH, K. Pyrolysis characteristics of *Arundo donax* harvested from a reclaimed mine land. In: **Industrial Crops & Products**, v. 133, p. 44-53, 2019.

OLIVEIRA, G. B. S.; VALE, A. T.; MIGUEL, E. P.; MACHADO, M. P. O.; FORTES, M. M.; MARTINS, I. S. Produção de biomassa, caracterização e potencial energético da espécie *Arundo donax* L. (cana-do-reino) de ocorrência no Distrito Federal (Brasil). **Espacios**, v. 38, n. 46, p. 11, Caracas, 2017.

PASTORE, M.; RODRIGUES, R. S.; SIMÃO-BIANCHINI, R.; FILGUEIRAS, T. S. **Plantas exóticas invasoras na Reserva Biológica do Alto da Serra de Paranapiacaba, Santo André – SP: guia de campo**. São Paulo: Instituto de Botânica, 2012.

PERDUE, Robert E. *Arundo donax*—source of musical reeds and industrial cellulose. **Economic Botany**, v. 12, n. 4, p. 368-404, 1958.

PILU, R.; BUCCI, A.; BADONE, F. C.; LANDONI, M. Giant reed (*Arundo donax* L.): A weed plant or a promising energy crop? **African Journal of Biotechnology**, v. 11, n. 38, p. 9163-9174, 2012.

RAMSURRUN, B.R.; SURROP, D. Biofuel from thermally treated giant reed. In: **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 35, p. 230-244, 2019.

ROUSSET, P.; AGUIAR, C.; LABBÉ, N.; COMMANDRÉ, J.M. Enhancing the combustible properties of bamboo by torrefaction. In **Bioresource Technology**, v. 102, n. 17, p. 8225 – 8231, 2011.

SILVEIRA, E. A.; MORAIS, M. V. G.; ROUSSET, P.; CALDEIRA-PIRES, A.; PÉTRISSANS, A.; GALVÃO, L. G. O. Coupling of an acoustic emissions system to a laboratory torrefaction reactor. In: **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 129, p. 29-36, 2017.

SIMÕES, K. C. C.; HAY, J. D. V.; ANDRADE, C. O.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; GOMES, R. A. T. Distribuição de Cana-do-Reino (*Arundo donax* L.) no Distrito Federal, Brasil. In: **Biodiversidade Brasileira**, vol. 3, n.2, p. 97-105, Brasília: ICMBio, 2013.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T. do; ANDRADE, A. P. A. de.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos. **Revista da madeira**, v. 89, n. 100, p. e106, 2005.

QUIRINO, W. F.; PINHA, I. V. O.; MOREIRA, A. C. O.; SOUZA, F.; TOMAZELLO FILHO, M. Densitometria de raios x na análise da qualidade de briquetes de resíduos de madeira. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 96, p. 525-536, 2012.

SAIKIA, R.; CHUTIA, R. S.; KATAKI, R.; PANT, K. K. Perennial grass (*Arundo donax* L.) as a feedstock for thermo-chemical conversion to energy and materials. In: **Bioresource Technology**, v. 188, p. 265-272, 2015.

SETTE JUNIOR, C. R.; LIMA, P. A. F.; LOPES, D. M. M.; BARBOSA, P. V. G.; CONEGLIAN, A.; ALMEIDA, R. A. Characterization of biomass, charcoal and briquette of *Phyllostachys aurea* Carr. ex A. & C. Rivière. **Scientia Forestalis**, v.45, n. 116, p. 619-628, Piracicaba, 2017.

SPENCER, D. F.; TAN, W.; LIOW, P. S.; KSANDER, G. G.; WHITEHAND, L. C.; WEAVER, S.; OLSON, J.; NEWHOUSER, M. Evaluation of glyphosate for managing giant reed (*Arundo donax*). **Invasive Plant Science and Management**, v. 1, n. 3, p. 248-254, 2008.

SUZUKI, Kiyoshi; ITOH, Takao. The changes in cell wall architecture during lignification of bamboo *Phyllostachys aurea* Carr. **Trees**, v. 15, n. 3, p. 137-147, 2001.

TUMULURU, J. S.; WRIGHT, C. T.; HESS, J. R.; KENNEY, K. L. A review of biomass densification systems to develop uniform feedstock commodities for bioenergy application. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, n. 6, p. 683-707, 2011.

USDA-ARS. **Germplasm Resources Information Network (GRIN). Online Database**. Beltsville: National Germplasm Resources Laboratory, 2014.

VALE, A. T. do; BRASIL, M. A. M.; LEÃO, A. L. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. **Ciência Florestal**, v. 12, n.1, p. 71-80, 2002.

YANG, H.; YAN, R.; CHEN, H.; LEE, D.H.; ZHENG, C. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. In: **Fuel** vol. 86, p. 1781–1788, 2007.