



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus Experimental de Itapeva

LUCAS CARVALHO NOVAES DE MACEDO

ESTUDO TÉRMICO DA COMBUSTÃO DE BIOMASSA

Itapeva - SP
2017

LUCAS CARVALHO NOVAES DE MACEDO

ESTUDO TÉRMICO DA COMBUSTÃO DE BIOMASSA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus de Itapeva, como requisito para a conclusão do curso de Engenharia Industrial Madeireira.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Juliana Esteves Fernandes Cieslinski

Itapeva - SP
2017

Macedo, Lucas Carvalho Novaes de.

M141e Estudo térmico da combustão de biomassa / Lucas Carvalho Novaes de Macedo. – Itapeva, SP, 2017.
37 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Câmpus Experimental de Itapeva, 2017
Orientadora: Juliana Esteves Fernandes Cieslinski

1. Energia - Fontes alternativas. 2. Biocombustíveis. 3. Resíduos agrícolas. I. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Câmpus Experimental de Itapeva. II. Título.

CDD 621.042

LUCAS CARVALHO NOVAES DE MACEDO

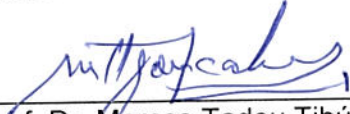
ESTUDO TÉRMICO DA COMBUSTÃO DE BIOMASSA

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Industrial Madeireira, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: 
Prof.ª. Dr.ª. Juliana Esteves Fernandes Ciesliski
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

2º Examinador: 
Prof.ª. Dr.ª. Elén Aparecida Martines Morales
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

3º Examinador: 
Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

Itapeva, 21 de novembro de 2017.

MACEDO, L. C. N. **Estudo térmico da combustão de biomassa**. 2017. 40f (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Industrial Madeireira) – Faculdade de Engenharia do Campus de Itapeva, Universidade Estadual Paulista, Itapeva, 2017.

RESUMO

A matriz energética brasileira passa por uma mudança nos últimos anos onde ocorre o decréscimo da oferta energética a partir de combustíveis não renováveis e a ascensão da oferta por combustíveis renováveis. Sendo a biomassa uma fonte limpa e flexível de energia. O aumento da produção agrícola no Brasil e a quantidade de terra agricultável apontam uma perspectiva de crescimento na produção agrícola, e, conseqüentemente, de biomassa no país. Este trabalho tem por objetivo analisar os aspectos energéticos de biomassa no tocante à determinação do poder calorífico superior, experimentalmente. Para a determinação experimental do PCS foi utilizado o calorímetro C 5000 Control Package 1/12. Os resultados experimentais mostraram que as biomassas estudadas, casca de arroz, bagaço de cana e palha de milho, apresentam o PCS de 14,16 MJ/kg, 16,71 MJ/kg e 16,92 MJ/kg, respectivamente.

Palavras-chave: Energia. Casca de arroz. Bagaço de cana, Palha de milho. Poder calorífico.

MACEDO, L. C. N. **Thermal study of the combustion of biomass**. 2017. 40f (Completion of course in Industrial Engineering) - Faculty of Engineering of the Campus of Itapeva, Paulista State University, Itapeva, 2017.

ABSTRACT

The Brazilian energy matrix has been going through a change, where it occurs a decrease in energetic supply by the non-renewable fuels inducing an increase in renewable fuels supply. Therefore, the biomass is a clean and flexible source of energy. With the expansion of Brazilian agricultural production due to the amount of arable land, studies point out a perspective on agricultural production growth, consequently, an increase in biomass production in this country. For that reason, this work aimed to analyse the energy aspects of biomass, determining the superior and inferior calorific value, experimentally and through calculations. To the experimental determination of SCP, it was used the calorimeter C 5000 Control Package 1/12. The experimental results showed that the studied biomass, rice husk, sugarcane bagasse and corn straw, brought up an SCP of 14,16 MJ/kg, 16,71 MJ/kg and 16,92 MJ/kg, respectively.

Keywords: Energy. Rice husk. Sugarcane bagasse. Corn straw. Higher Calorific Value.

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira De Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional De Energia Elétrica
ASTM	American Society For Testing And Materials
BEN	Balanco Energético Nacional
CONAB	Companhia Nacional De Abastecimento
EPE	Empresa De Pesquisa Energética
MME	Ministério De Minas E Energia
OIEE	Oferta Interna De Energia Elétrica
PNE	Plano Nacional De Energia

LISTA DE SÍMBOLOS

C	carbono
H	hidrogênio
N	nitrogênio
S	enxofre
O	oxigênio
MV	teor de materiais voláteis
CF	teor de carbono fixo
U	teor de umidade
CZ	teor de cinzas
PCS	poder calorífico superior
PCI	poder calorífico inferior
°C	grau celsius
TEP	tonelada equivalente de petróleo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	08
2 OBJETIVO	10
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1 Matriz energética brasileira	11
3.1.1 Energia de biomassa	12
3.2 Biomassa Agrícola	13
3.2.1 Casca de Arroz	14
3.2.2 Palha de Milho	14
3.2.3 Bagaço de Cana	15
3.3 Caracterização de biomassa	16
3.3.1 Composição química elementar	16
3.3.2 Composição química imediata	16
3.3.3 Poder calorífico de biomassas	18
3.4 Determinação do poder calorífico	18
3.4.1 A partir da composição do combustível	18
3.4.2 A partir de fórmulas empíricas	19
3.4.3 A partir de medida experimental	19
4 MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1 Biomassas Agrícolas	21
4.2 Análise imediata das biomassas	21
4.2.1 Preparo das amostras	21
4.2.2 Teor de Umidade	22
4.2.3 Teor de Material Volátil	22
4.2.4 Teor de Cinzas	23
4.2.5 Teor de Carbono Fixo	24
4.3 Poder Calorífico Superior	24
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
6 CONCLUSÃO	34
REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

No decorrer últimas décadas vivencia-se um momento de grande evolução industrial, no Brasil e nos demais países. Este avanço no desenvolvimento foi possível em primeiro lugar pelo aumento da capacidade de fornecimento de energia, independentemente de sua origem. Entretanto atualmente já percebe-se a necessidade de um crescimento sustentável, em outras palavras desenvolver atendendo as necessidades ambientais, sociais e econômicos. (SEGURA, 2017)

Existe uma tendência que revela a substituição dos derivados de petróleo. Por muito tempo recebia-se informações de que a principal fonte energética poderia se esgotar. Todavia, se tal tendência persistir por mais alguns anos, é possível que a necessidade de uso dos derivados do petróleo diminua, ou ainda acabe antes do esgotamento das reservas, o que na ótica de 10 à 15 anos atrás apresentava-se inconcebível. (SEGURA, 2017)

A predominância de fontes renováveis na matriz energética brasileira deve se manter estável no ano de 2017, com a participação de 43,8% do total. Este desempenho é reflexo das transformações ocorridas no setor energético nacional, que tem incentivado tanto o crescimento dessas fontes quanto a diversificação da matriz nos últimos anos. Os dados constam no Boletim Mensal de Energia – Janeiro de 2017, elaborado pelo Ministério de Minas e Energia.

A biomassa retornou ao posto de segunda fonte de geração mais importante do Brasil na Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) com o registro de 8,8%, em 2016, superando os 8,1% de participação do gás natural. As informações são do Boletim Mensal de Energia (referência – dezembro/2016), elaborado pelo Ministério de Minas e Energia (MME). De um total de geração de 54 TWh por biomassa em 2016, o bagaço e a palha da cana contribuíram com 36 TWh, ou 67%. Compõem a biomassa o bagaço e a palha da cana, os resíduos de madeira da produção de celulose, o biogás, a casca de arroz, palha de milho, etc.

A partir destas informações, o presente trabalho buscou a princípio a caracterização de diferentes biomassas que são produzidas no Brasil, que são mais

utilizadas como fonte de energia pelas indústrias, como a casca de arroz, o bagaço de cana e a palha de milho, quanto ao seu potencial energético.

2 OBJETIVOS

Objetivo geral:

O objetivo geral deste trabalho é analisar os aspectos energéticos de biomassa provenientes da casca de arroz, do bagaço de cana e da palha de milho.

Objetivos específicos:

- Calcular o poder calorífico superior de biomassas;
- Analisar a influência da umidade no PCS da biomassa;
- Realizar a análise química imediata das biomassas (MV, CF, U e CZ);
- Analisar os resultados do PCS com os obtidos na análise química imediata;
- Estudar o potencial energético das biomassas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Matriz energética brasileira

Uma matriz energética é um conjunto de fontes de energia ofertado por um país. No Brasil, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), elabora e publica anualmente o Balanço Energético Nacional (BEN). O BEN, segundo EPE (2015), tem por finalidade apresentar a contabilização relativa à oferta e ao consumo de energia no Brasil, contemplando desde a extração de recursos energéticos primários até a distribuição e uso final da energia. A Tabela 1 revela os dados referentes a produção interna de energia no Brasil a partir de cada combustível nos anos de referência 2014, 2015 e 2016.

Tabela 1 – Oferta interna de energia no Brasil no período de 2014 à 2016.

Fonte (Mtep)	2015 Ano base 2014	2016 Ano base 2015	2017 Ano base 2016
<i>Renováveis</i>	<i>120,5</i>	<i>123,2</i>	<i>124,0</i>
Energia hidráulica	35,0	33,9	36,3
Biomassa da cana	48,2	50,6	50,3
Lenha e carvão vegetal	24,9	24,5	23,1
Lixívia e outros renováveis	12,4	14,2	14,3
<i>Não Renováveis</i>	<i>185,1</i>	<i>176,0</i>	<i>163,0</i>
Petróleo e derivados	120,3	111,6	105,4
Gás natural	41,4	41,0	35,6
Carvão mineral	17,5	17,7	15,9
Urânio (U₃O₈)	4,0	3,9	4,2
Outros não renováveis	1,8	1,8	1,9
<i>Oferta energética total</i>	<i>305,5</i>	<i>299,2</i>	<i>287</i>

Fonte: Adaptado de EPE (2015)

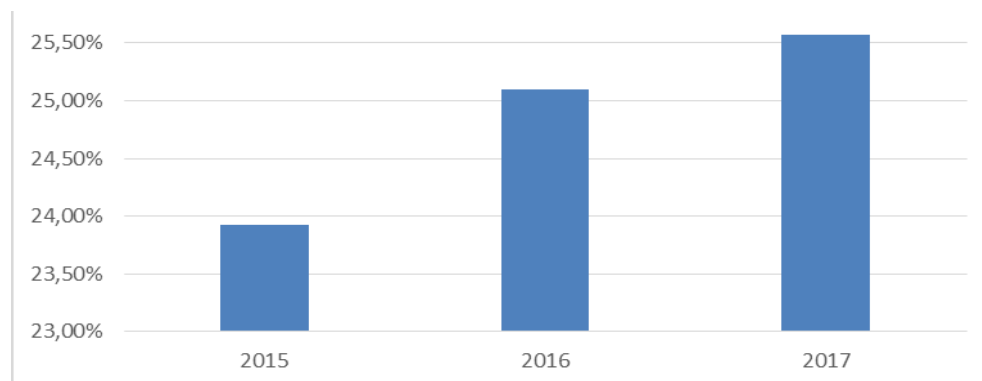
Nos últimos três anos (2015 – 2017) com base nos relatórios energéticos divulgados, foi perceptível o decréscimo da oferta interna de energia no Brasil. De

305,6 Mtep no BEN de 2015 – ano base 2014, à 287,0 Mtep no BEN de 2017 – ano base 2016. Observa-se ainda uma queda da oferta de energia proveniente de combustíveis não renováveis de 12% em 2017 (Ano base 2016), em relação à 2015 (Ano base 2014) e uma ascensão na oferta energética obtida por meio de combustíveis renováveis de 3% para o mesmo período.

3.1.1 Energia de biomassa

Existem várias rotas tecnológicas para obtenção da energia elétrica a partir da biomassa. Conforme Brás *et al.* (2007) para transformar a biomassa em energia os processos termoquímicos e biológicos os mais utilizados. Este último baseia-se na utilização de microrganismos para fragmentar as moléculas presentes na biomassa em compostos mais simples, porém com alto valor energético. Nesta gama de processos estão a Fermentação e Digestão Anaeróbia. Existem também os processos termoquímicos que utilizam o calor para transformar a biomassa em energia. Esta tecnologia vem sendo desenvolvida para modificar a biomassa residual de atividades agrícolas, florestais e industriais. Quanto a métodos termoquímicos são três tipos de processos, os quais dependem da quantidade de oxigênio presente na transformação: pirólise, gaseificação e combustão. Todas preveem a conversão da matéria-prima em um produto intermediário que será utilizado em uma máquina motriz. Essa máquina produzirá a energia mecânica que acionará o gerador de energia elétrica. Na Figura 1 é possível observar a evolução dessa fonte energética no BEN, dos últimos anos, perfazendo um quarto em 2017, ano base 2016, da matriz.

Figura 1 – Oferta interna de energia a partir de biomassa.



Fonte: Adaptado de EPE (2015)

Devido à expressiva participação da biomassa na matriz energética brasileira atual, este trabalho objetiva estudar essa fonte energeticamente e quimicamente.

3.2 Biomassa Agrícola

De acordo com a (ANEEL, 2015) uma biomassa consiste numa matéria orgânica que pode ser transformada em energia térmica, mecânica ou elétrica. Varia conforme sua origem sendo classificada como florestais: resíduos de corte, usinagem da madeira, etc.; agrícolas: resíduos de colheita e beneficiamento de culturas de soja, arroz, cana-de-açúcar, entre outros e por fim os rejeitos urbanos e industriais. Dentre suas principais vantagens encontra-se o baixo custo da matéria-prima, a alta eficiência energética, a utilização de recursos renováveis entre outros, todavia encontram-se as desvantagens como a dificuldade de armazenamento da biomassa sólida, o custo elevado na aquisição de equipamentos industriais e um menor poder calorífico quando comparado com combustíveis fósseis.

Segundo o relato do estudo sobre o tema inserido no Plano Nacional de Energia 2030 (PNE), a melhor região do planeta para a produção da biomassa é a faixa tropical e subtropical, entre o Trópico de Câncer e o Trópico de Capricórnio. Tal faixa do planeta abrange alguns países das Américas Central e do Sul, como o Brasil. Os países com o cultivo agrícola ativo e em grandes dimensões cultiváveis são os maiores fornecedores de matérias-primas para a produção de bioenergia.

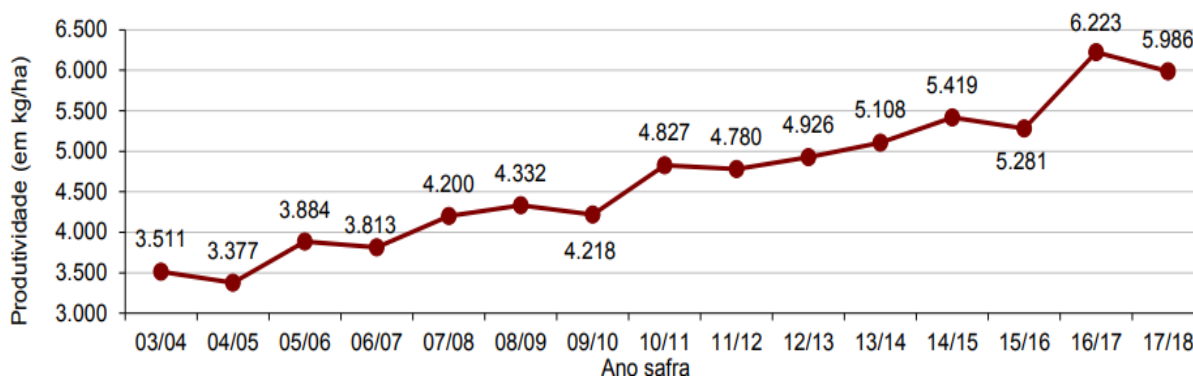
Além da grande quantidade de terra agriculturável, nosso país apresenta solo e condições climáticas adequadas.

A escolha das biomassas estudadas neste trabalho deu-se em conformidade ao crescimento da produção agrícola no Brasil. De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB) que fornece a estimativa de produtividade para o ano de 2018, estas estimativas se baseiam em análises estatísticas das séries históricas de produtividade. É importante salientar que esta primeira intenção de plantio oferece uma perspectiva de redução de produtividade, para praticamente todas as culturas. Tal situação pode ser reconsiderada a partir do momento em que o plantio se desenvolve e os diversos parâmetros que compõe a produtividade, tenham condições de ser melhor avaliados.

3.2.1 Casca de Arroz

No cômputo geral, a estimativa de produtividade é de aumento, sendo menor apenas em relação à safra anterior, como mostra a Figura 2.

Figura 2- Produtividade de arroz no Brasil.



Fonte: CONAB (2017)

3.2.2 Palha de Milho

A estimativa é de aumento na produtividade do milho (Figura 3). A produtividade esperada é a segunda melhor no período entre 2003/04 a 2017/18.

Figura 3- Produtividade de milho no Brasil.

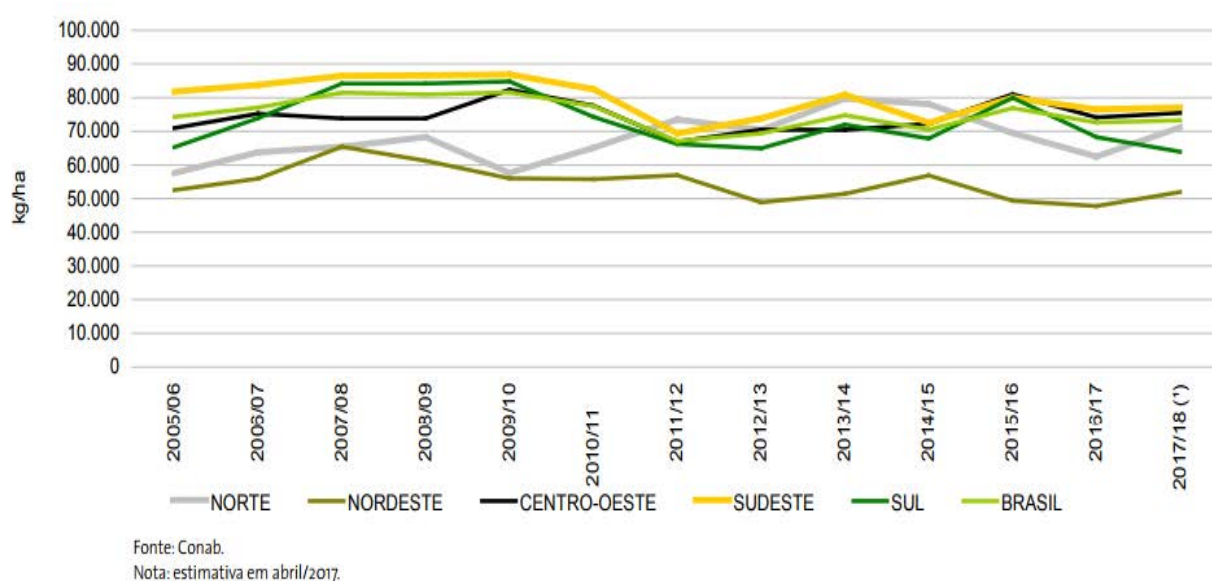


Fonte: CONAB (2017)

3.2.3 Bagaço de Cana

A produtividade estimada para a temporada 2017/18 é de 73.273 kg/ha. O leve incremento, observado em relação à safra passada (0,9%), é em decorrência da expectativa de recuperação das lavouras na Região Norte-Nordeste (9,1%) e em menor escala na Região Centro-Sul, principal produtora nacional (0,4%), em comparação com o observado na safra passada. As causas estão relacionadas à melhoria esperada das condições climáticas. (CONAB, 2017). A produtividade estimada pode ser observada Figura 4.

Figura 4 – Evolução da produtividade da cana-de-açúcar.



Fonte: CONAB (2017)

3.3 Caracterização de biomassa

3.3.1 Composição química elementar

Em conformidade com Horst (2013) mediante uma análise química, são conhecidas as frações em peso dos elementos químicos que constituem uma determinada biomassa. Assim determinam-se as concentrações de tais constituintes como o carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), enxofre (S), sendo que a fração relativa ao oxigênio (O), é determinada por diferença analítica. A Tabela 2 fornece as análises elementares para diferentes biomassas agrícolas.

Tabela 2 – Análise química elementar de diferentes biomassas

Análise elementar (%)						
Biomassa	C	H	N	S	O	Autor
Casca de arroz	40,1	4,7	0,40	0,02	38,3	Horst (2012)
Casca de arroz	39,1	5,8	0,3	0,1	54,7	Paula <i>et al.</i> (2011)
Bagaço de cana	46,8	5,9	0,5	0,3	45,7	Horst (2012)
Bagaço de cana	45,3	6,8	0,5	0,3	47,1	Paula <i>et al.</i> (2011)
Palha de milho	45,4	6,7	0,9	0,3	45,1	Horst (2012)
Palha de milho	44,8	6,8	0,3	0,1	47,9	Paula <i>et al.</i> (2011)

Fonte: Horst, (2012), Paula *et al.*, (2011).

3.3.2 Composição química imediata

A análise química imediata determina o teor de umidade, o teor de materiais voláteis, o teor de carbono fixo e de cinzas de uma amostra de biomassa. A Tabela 3 ilustra as análises químicas imediatas das biomassas estudadas por Horst (2012), Paula (2011) e Cieslinski (2014).

Tabela 3 – Análise química imediata de diferentes biomassas

Análise imediata (%)					
Biomassa	MV	CF	U	CZ	Autor
Casca de arroz	66,36	17,3	11,6	8,5	Cieslinski (2014)
Casca de arroz	81,60	16,87	10,90	10,30	Horst (2012)
Casca de arroz	66,36	17,3	-	16,43	Paula <i>et al.</i> (2011)
Bagaço de cana	66,4	14,8	10,5	14,8	Cieslinski (2014)
Bagaço de cana	82,33	16,87	12,90	0,8	Horst (2012)
Bagaço de cana	82,31	17,16	-	0,8	Paula <i>et al.</i> (2011)
Palha de milho	81,70	16,72	12,60	1,58	Horst (2012)
Palha de milho	81,68	17,05	-	1,58	Paula <i>et al.</i> (2011)

Fonte: Cieslinski (2014), Horst (2012), Paula *et al.* (2011).

Quanto a MV, de acordo com Klautau (2008) a biomassa com teor de materiais voláteis elevados apresentam maior facilidade de incendiar e queimar, além de resultar num maior PCS, porém o processo de combustão de maneira geral pode ser afetado, tendo em vista que existe dificuldade de controle do mesmo. (VIEIRA, 2012).

Referente ao CF Borges (2015) e Cieslinski (2014) afirmam que este parâmetro possui a relação inversa proporcionalmente com o PCS das biomassas, ou seja quanto maior o CF menor o PCS. Já CZ para estes mesmos autores em alta concentração, podem apresentar um PCS inferior, salvo que a precipitação das cinzas é decorrente da combustão de compostos orgânicos e oxidações inorgânicos.

A U é um fator de grande importância a ser observado no tocante ao PCS, pois quanto menor este valor, menor será o gasto de energia no processo de carbonização da biomassa elevando seu PCS. (MENEZES, 2013).

Para Cieslinski (2014) a U interfere negativamente no PCS de combustíveis, Vieira (2012) salienta ainda que a presença de água na biomassa acarreta na redução do PCI, pois se faz necessário energia para evaporá-la e

concretizar a combustão, além da possibilidade de se dificultar o controle do processo de combustão.

3.3.3 Poder calorífico de biomassas

De acordo com Hilsdorf *et al.* (2004), o poder calorífico de determinado combustível, é a medida do calor que pode ser obtido pela queima completa do mesmo, sendo definido como a quantidade de calor liberada por unidade de massa ou volume. O seu cálculo é realizado a partir da composição do combustível e dos calores de combustão das frações combustíveis. Existem dois tipos de poderes caloríficos provenientes de diferentes formas de combustão sendo eles:

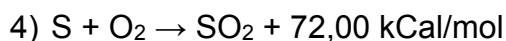
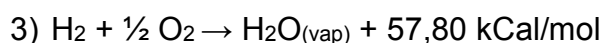
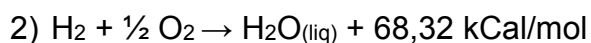
- a) Poder calorífico superior (bruto) – neste caso inclui-se o calor liberado através da condensação de toda a quantidade de água contida nos produtos da reação de combustão (fumos).
- b) Poder calorífico inferior (líquido) – é deduzido por meio do poder calorífico superior, do calor latente liberado pela condensação e resfriamento da totalidade de água contida nos produtos da reação de combustão, incluindo a água previamente presente no combustível por meio da umidade.

3.4 Determinação do poder calorífico

A determinação do PC de combustíveis, em especial da biomassa, pode se dar a partir da composição do combustível, de fórmulas empíricas ou ainda de medida experimental. (HILSDORF, 2004)

3.4.1 A partir da composição do combustível

Sabendo a composição do combustível, em peso ou molar, determinam-se quantidades de calor desprendidas através da combustão das frações combustíveis sendo elas:



. O somatório dessas quantidades de calor indicará o valor aproximado do poder calorífico do combustível em questão.

Deve-se ainda considerar que em ocasiões onde o combustível apresenta umidade é necessário, para a determinação do poder calorífico inferior, retirar o valor correspondente ao calor latente de evaporação da quantidade de umidade na unidade de massa de combustível.

O poder calorífico de determinada substância é descrito por meio do poder calorífico superior (PCS), e do poder calorífico inferior (PCI).

3.4.2 A partir de fórmulas empíricas

Um processo de análise estatística, consiste essencialmente em encontrar um modelo apropriado que possa descrever um fenômeno. A partir de parâmetros conhecidos, modelos empíricos são obtidos através de métodos estatísticos, (VISMARA, 2009).

A fórmula empírica para se determinar o valor de poder calorífico de biomassas é a fórmula de Gouthal, que por meio dos dados fornecidos pela análise imediata, apresenta valores satisfatórios para tais matérias-primas, com baixo teor de oxigênio, fornecendo o valor aproximado do poder calorífico superior.

3.4.3 A partir de medida experimental

A determinação do poder calorífico a volume constante é efetuado em aparelho altamente especializado denominada, bomba calorimétrica. Um determinado peso de combustível, biomassa, é depositada em um cadinho de aço inoxidável com resistência à altas pressões, denominada bomba. Esta é cheia com oxigênio à uma pressão de 25 atmosferas e é imersa em uma quantidade de água

de peso conhecido num vaso calorimétrico. Este vaso é um recipiente cilíndrico perfeitamente polido e brilhante, com volume de água o suficiente para cobrir a bomba calorimétrica. Por meio de um fio fusível aquecido eletricamente o combustível dentro da bomba é queimado. O calor desprendido durante a queima pela combustão aumenta a temperatura da bomba e da água na qual esta se encontra imersa. A elevação da temperatura é medida com cuidado fornecendo valores para determinar a quantidade de calor desprendido. (HILSDORF, 2004).

Os valores de PCS determinados experimentalmente pelos autores, Horst (2012), Paula (2011) e Cieslinski (2014) podem ser observados pela Tabela 4.

Tabela 4 – Análise poder calorífico superior de diferentes biomassas

Biomassa	PCS (MJ/kg)		
	Horst(2013)	Paula(2011)	Cieslinski(2014)
Casca de arroz	15,83	15,95	14,34
Bagaço de cana	18,06	17,88	15,96
Palha de milho	17,63	18,59	-

Fonte: Cieslinski, (2014), Horst, (2012), Paula *et al.*, (2011).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo foi desenvolvido no Laboratório de Química da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” / UNESP, *campus* de Itapeva-SP.

4.1 Biomassas Agrícolas

As Biomassas agrícolas casca de arroz, bagaço de cana e palha de milho, utilizados neste trabalho, foram adquiridos através de doação de indústria beneficiadora de arroz, vendedor ambulante de caldo de cana e agricultor, respectivamente.

4.2 Análise imediata das biomassas

Para a determinação da análise imediata das biomassas, o procedimento adotado foi regido pelas normas americanas (“American Society for Testing and Materials”), ASTM E-870- 82 “Análise Imediata para Biomassa e Resíduos”, baseada nas normas ASTM D-3172-07a “Prática padrão para análise de carvão e coque”, D-3173-11 “Análise de umidade para carvão e coque”, D-3174-12 “Análise de cinzas para carvão e coque”, D-3175-11 “Análise de materiais voláteis para carvão e coque” e na norma brasileira ABNT NBR 8112:1986 (“Associação Brasileira de Normas Técnicas”) “Carvão vegetal – análise imediata – método de ensaio”. Onde para cada uma das biomassas foram realizados ensaios em duplicata.

4.2.1 Preparo das amostras

Para se desenvolver os experimentos com as biomassas utilizadas, foram retiradas amostras homogeneizadas, a partir da moagem destes materiais e do seu peneiramento (material que passou pela peneira de 35 mesh – 0,500 mm e ficou retido na peneira de 60 mesh – 0,250 mm).

4.2.2 Teor de Umidade

Foram pesados dois cadinhos de alumínio identificados de maneira diferente em balança analítica, anotando suas respectivas massas. Em seguida foram pesadas duas amostras das biomassa úmida com auxílio de uma pinça de laboratório, uma em cada cadinho. As amostras foram introduzidas em uma estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, onde foram deixadas por 24 horas até atingirem massa constante. Após este tempo os dois cadinhos foram levados ao dessecador por aproximadamente 5 minutos, para resfriamento, sendo pesados após esse processo.

A Equação (1) foi utilizada para a determinação do teor de umidade.

$$U(\%) = \frac{mu - ms}{ms} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

$U(\%)$ = Teor de umidade da amostra;

mu = Massa da amostra úmida (g);

ms = Massa da amostra seca (g).

4.2.3 Teor de Material Volátil

A princípio dois conjuntos de cadinhos de porcelana passaram por um processo de cauterização a fim de secar e retirar qualquer substância que pudesse estar impregnada. Em seguida, amostras secas das biomassas estudadas, em duplicata, foram introduzidas nos conjuntos de porcelana, sendo importante a presença da tampa para impedir que a biomassa não entre em ignição. Como se observa na Figura 3, estes conjuntos foram dispostos na porta do forno mufla, ainda aberto, à 850°C por um período de 4 minutos, para impedir o colapso do cadinho por choque térmico ao inseri-lo definitivamente no forno. Terminado o condicionamento dos conjuntos, estes foram inseridos no forno, que foi fechado pelo tempo de 6

minutos. A Equação (2) foi utilizada para a determinação do teor de materiais voláteis.

$$MV(\%) = \frac{ms - mf}{mi} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

MV(%) = Teor de materiais voláteis da amostra;

mf = Massa final da amostra (g);

ms = Massa da amostra seca (g).

mi = Massa inicial da amostra (g)

4.2.4 Teor de Cinzas

Nesta etapa procedimental foi considerado o conjunto de porcelana contendo as amostras finais da determinação do teor de materiais voláteis. Primeiramente o forno mufla foi configurado para apresentar uma temperatura em torno de 750°C, em seguida os cadinhos contendo as amostras foram inseridos no forno sem as suas tampas, permanecendo por um período de 4 horas até a calcinação completa. Ao término do experimento as amostras foram colocadas no dessecador para esfriá-las, finalmente foram pesadas para a determinação das massas de resíduos (mr). O teor de cinzas das amostras foram determinados, conforme a Equação 3.

$$CZ(\%) = \frac{mr}{ms} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

CZ(%) = teor de cinzas;

ms = massa seca da amostra (g);

mr = massa do resíduo (g).

4.2.5 Teor de Carbono Fixo

O teor de carbono fixo é obtido a partir de medida indireta, por meio de cálculo de acordo com a Equação 4.

$$CF(\%) = 100 - (MV + CZ) \quad (4)$$

Onde:

CF (%) = teor de carbono fixo;

CZ (%) = teor de cinzas;

MV (%) = teor de materiais voláteis.

4.3 Poder Calorífico Superior

A amostra das biomassas foram pesadas em aproximadamente 5 gramas na granulometria especificada e posteriormente montado o conjunto da bomba como pode ser observado na Figura 5.

Figura 5: Constituinte da bomba calorimétrica.



Fonte: Próprio autor (2017)

Posteriormente a montagem da bomba calorimétrica, esta foi encaixada no equipamento denominado calorímetro ilustrado na Figura 6, com o intuito de se obter o poder calorífico superior da biomassa. A obtenção dessa variável consiste na variação da temperatura de uma massa de água contida no interior do equipamento, acarretada pela combustão da biomassa ocorrida no interior bomba calorimétrica. Essa combustão ocorre devido a ignição de um filamento de algodão, que entra em curto, interagindo a chama com o combustível presente no interior do cadinho, como um estopim. Nesse processo é inserido como comburente o O_2 , em excesso, a fim de queimar completamente a biomassa experimentada. Ao término da reação de combustão o equipamento apresenta os resultados numa tela acoplada no mesmo.

Figura 6: Constituinte da bomba calorimétrica.



Fonte: Próprio autor (2017)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aqui estão apresentados os resultados obtidos a partir da análise química imediata, bem como o PCS determinados experimentalmente.

5.1 Caracterização das biomassas

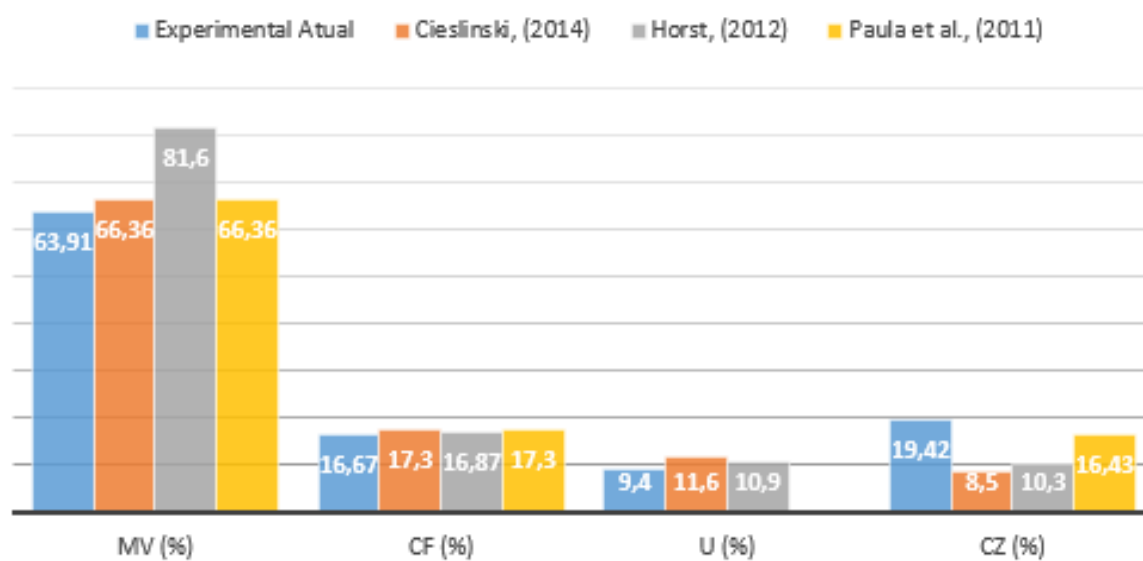
As biomassas utilizadas neste estudo, casca de arroz, bagaço de cana e palha de milho, foram a princípio caracterizados pela análise química imediata quanto a sua umidade (U), materiais voláteis (MV), cinzas (CZ) e carbono fixo (CF) sendo este determinado por meio da Equação 4. Os resultados para a análise química imediata para este estudo podem ser observados na Tabela 5 em conjunto com os obtidos por Cieslinski (2014), Horst (2012) e Paula (2011), contidos no item 2.4.3, bem como encontram-se agrupados nas Figura 7, 8 e 9.

Tabela 5- Valores obtidos experimentalmente na análise imediata das biomassas estudadas.

Amostra	MV (%)	CF (%)	U (%)	CZ (%)
Arroz	63,91	16,67	9,4	19,42
Cana	81,84	17,29	8	0,87
Milho	77,21	19,40	8,37	3,39

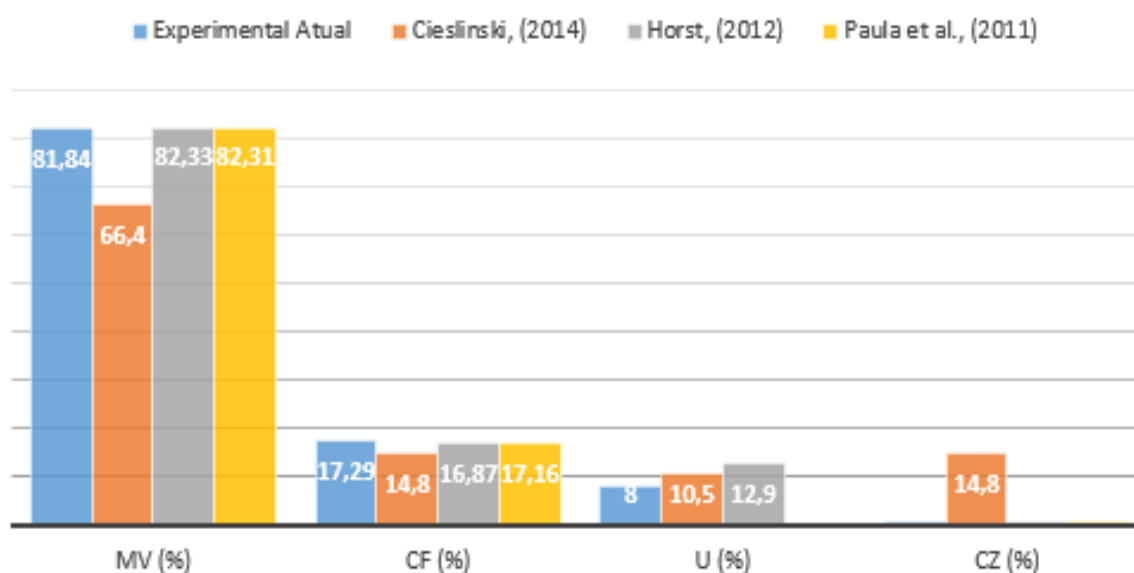
Fonte: Resultados obtidos para análise química imediata.

Figura 7 – Análise química imediata para a casca de arroz



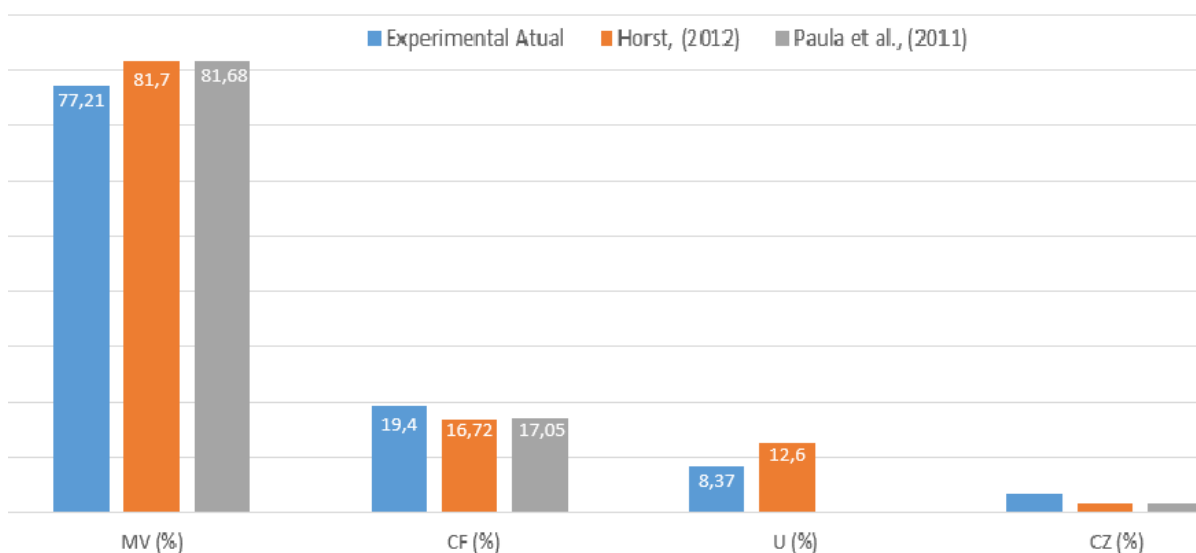
Fonte: Resultados obtidos para análise química imediata e por Cieslinski (2014), Horst (2012), Paula *et al.* (2011).

Figura 8 – Análise química imediata para o Bagaço de cana



Fonte: Resultados obtidos para análise química imediata e por Cieslinski (2014), Horst (2012), Paula *et al.* (2011).

Figura 9– Análise química imediata para a palha de milho



Fonte: Resultados obtidos para análise química imediata e por Horst (2012), Paula *et al.*(2011).

As comparações estabelecidas entre os valores encontrados por meio deste trabalho e os encontrados na literatura serviram como base de análises, tendo em vista que possuem valores próximos, contudo diferentes, isso acontece devido as amostras não terem tido as mesmas condições de crescimento enquanto plantas vivas, como: Adubação, irrigação, pulverização etc, assim como também quanto a espécie e local de cultivo. De acordo com Cieslinski (2014), esse fato descreve a realidade que ocorre com a maioria das indústrias, tendo em vista que nem sempre as biomassas são adquiridas no mesmo local ou ainda com as mesmas propriedades.

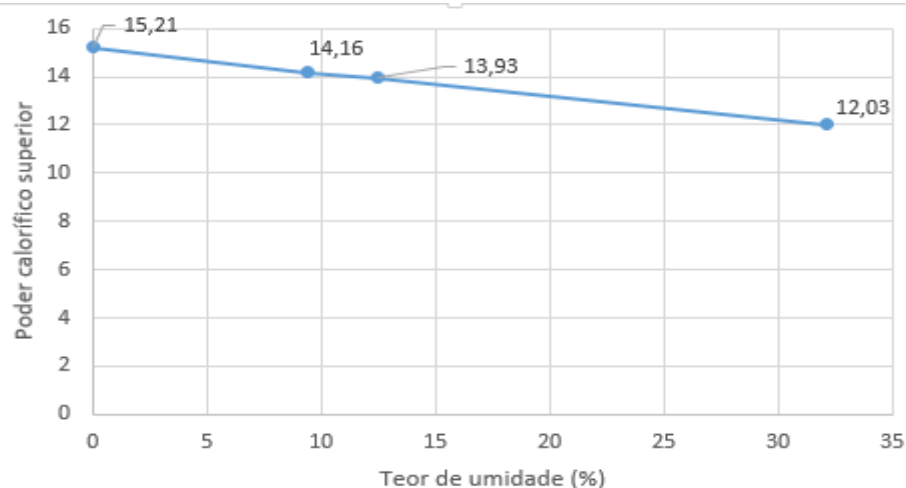
A seguir por meio das Tabelas 6, 7 e 8 é possível observar os valores determinados experimentalmente, para o PCS. As Figuras 10, 11 e 12 apresentam graficamente a interferência do teor de umidade no PCS de biomassas.

Tabela 6 – PCS determinado experimentalmente para a casca de arroz.

U %	PCS [MJ/kg]
0,00	15,21
9,40	14,16
12,44	13,93
32,10	12,03

Fonte: Resultados obtidos neste trabalho para PCS.

Figura 10 – Relação entre PCS e U (%) para a casca de arroz.



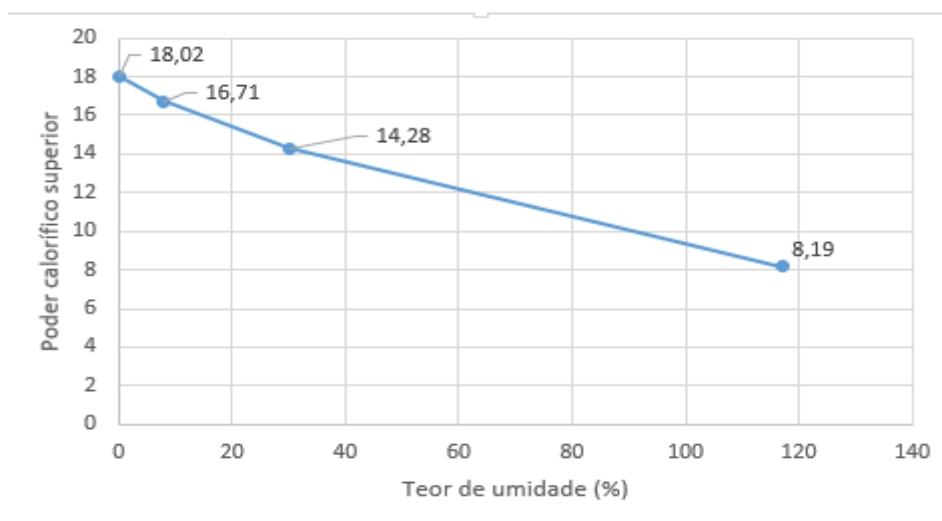
Fonte: Próprio autor.

Tabela 7 – PCS determinado experimentalmente para o bagaço de cana.

U %	PCS [MJ/kg]
0,00	18,02
8	16,71
30,09	14,28
117,10	8,19

Fonte: Resultados obtidos neste trabalho para PCS.

Figura 11 – Relação entre PCS e U (%) para o bagaço de cana.



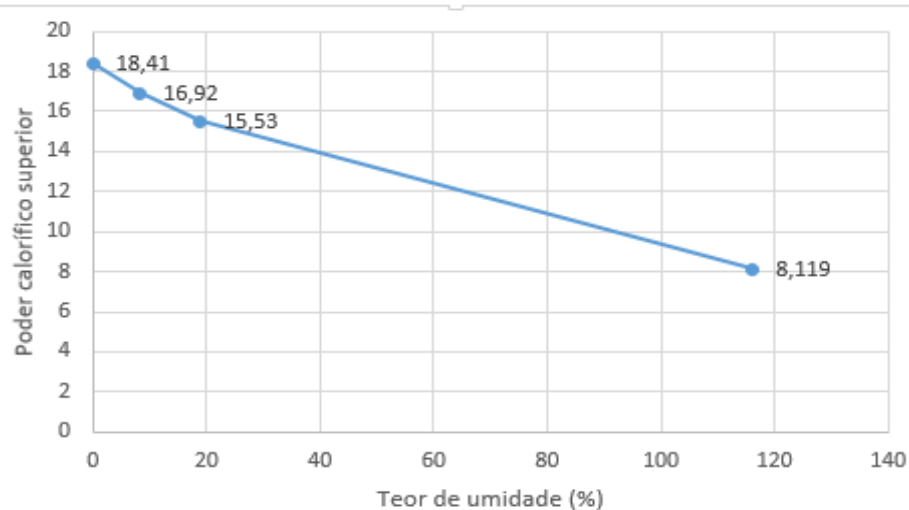
Fonte: Próprio autor.

Tabela 8 – PCS determinado experimentalmente para a palha de milho.

U %	PCS [MJ/kg]
0,00	18,41
8,37	16,92
18,92	15,53
116,21	8,119

Fonte: Resultados obtidos neste trabalho para PCS.

Figura 12 – Relação entre PCS e U (%) para a palha de milho.



Fonte: Próprio autor.

As Figuras 10, 11 e 12 mostram experimentalmente a relação negativa da umidade sobre o PCS, sendo que neste trabalho durante os experimentos foi constatado o que Viera (2012) mencionou em sua pesquisa, onde as amostras estudadas com U elevado, não tiveram a combustão completa.

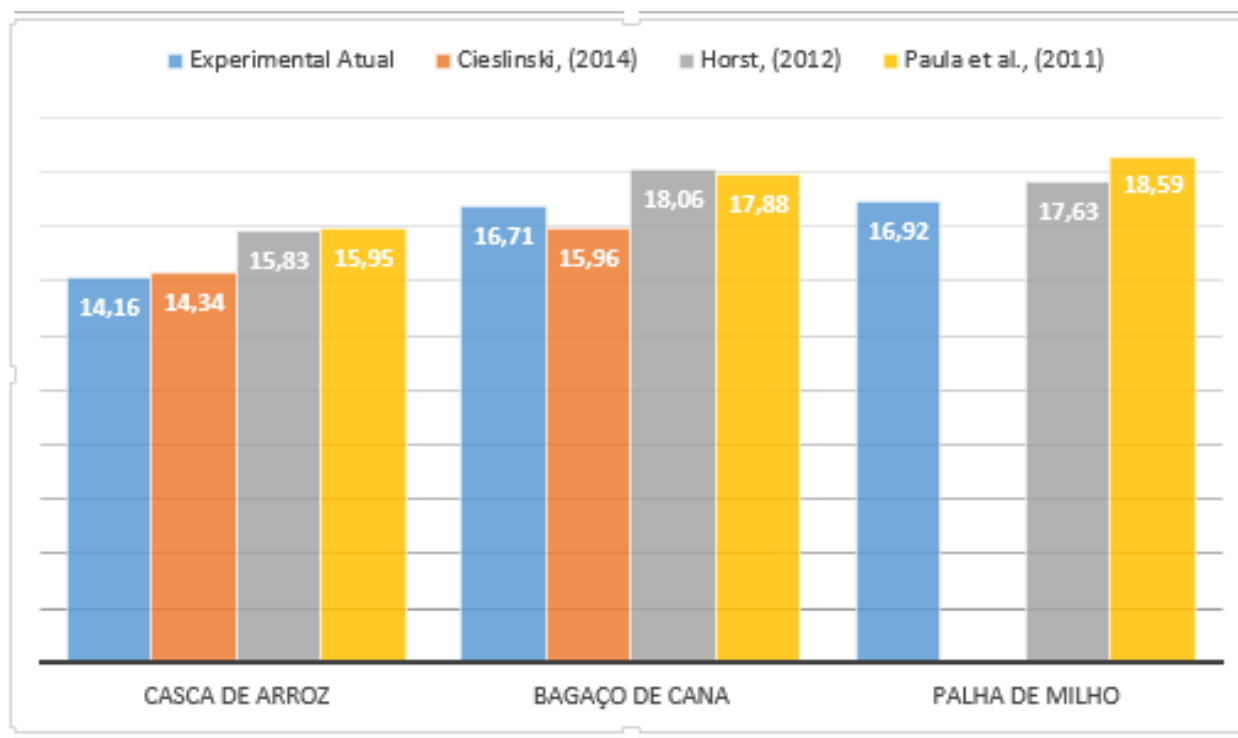
Quanto a biomassa proveniente da casca de arroz o valor obtido para MV apresentou-se próximo aos determinados experimentalmente por Cieslinski (2014) e Paula *et al.*, (2011), e inferior ao determinado por Horst, (2012) em 18,9%. Quanto ao CF e U os valores descritos pelos autores se encontram no mesmo patamar dos determinados neste estudo, salvo que Paula *et al.*,(2011) não apresentou em suas análises o valor de U para as biomassas estudadas. No tocante à CZ o presente trabalho apresentou um índice superior aos determinados pelos autores pesquisados, tendo em vista que todos obtiveram valores diferentes em seus estudos.

Para o bagaço de cana o MV determinado neste estudo se apresentou bem similar aos valores apresentados por Paula *et al.*,(2011) e Horst, (2012), já em relação à Cieslinski (2014) apresenta um valor de 15,44% superior. Quanto a CF todos os valores obtidos se encontram no mesmo patamar. Por fim, U e CZ apresentaram valores heterogêneos, ressaltando ainda que para CZ somente Cieslinski (2014) determinou valores expressivos.

Por fim, para a análise imediata da biomassa da palha de milho é possível relacionar os valores obtidos somente com Paula *et al.*,(2011) e Horst, (2012), já que Cieslinski (2014) não desenvolveu estudos referentes a essa biomassa em sua tese. Os valores encontrados para MV, CF e CZ se encontram relativamente próximos com uma variação em torno de aproximadamente 4% entre os autores. Quanto à U a amostra estudada por Horst (2012) estava com um teor de umidade superior em 4,23% em relação a amostra estudada neste trabalho.

A comparação realizada para o PCS entre os resultados obtidos neste trabalho e os autores mencionados no item 2.4.3 está exposta na Figura 13.

Figura 13 – Poder calorífico superior (MJ/kg)



Fonte: Resultados obtidos neste trabalho para poder calorífico superior e por Cieslinski (2014), Horst (2012), Paula *et al.* (2011).

Para a casca de arroz é possível se dizer que o valor encontrado neste trabalho e por Cieslinski (2014) são próximos, entretanto inferior ao encontrados pelos outros dois autores. Isso pode ter ocorrido devido a interferência negativa do CZ, pois para este trabalho bem como no desenvolvido por Cieslinski (2014) foram obtidos índices superiores quando comparado com os outros autores, salvo ainda que para a biomassa em questão estudada por Horst (2012) apresentou o maior MV entre os trabalhos estudados, tendo em vista que o MV eleva o PCS da amostra.

Para a biomassa do bagaço cana nota-se uma certa disparidade entre os resultados obtidos e comparados, é válido ressaltar que para Cieslinski (2014) o MV foi o menor entre as amostras e seu CZ o maior, podendo essa ser a razão do seu estudo para biomassa da cana apresentar o menor valor de PCS entre as amostras estudadas por este trabalho. Para este trabalho juntamente com o desenvolvido por Horst (2012) é plausível justificar a diferença de PCS pela variação do U. Não é possível concluir algo quanto ao trabalho proposto por Paula *et al.* (2011) devido a falta de dados para estabelecer comparações tendo em vista que seus outros

indicadores (MV, CF e CZ) se apresentaram próximos a este trabalho o desenvolvido por Horst.

Por fim para a biomassa proveniente da palha de milho dentre os autores que foram considerados neste trabalho apresentaram resultados para essa biomassa, este trabalho apresentou o menor PCS que pode ser justificado devido ao CF que se apresentou superior ao dos autores bem como o CZ sendo estes parâmetros colaboradores para a queda do PCS.

6 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho pôde-se concluir que:

- A biomassa proveniente da casca de arroz apresentou um PCS de 14,16 MJ/kg, que se mostrou inferior em comparação ao obtido para as outras biomassas estudadas, devido ao seu MV ser menor e CZ ser maior do que as mesmas;
- As biomassas advindas do bagaço de cana bem como o da palha de milho apresentaram PCS de 16,71 MJ/kg e 16,92 MJ/kg, respectivamente, que se encontram bem próximos, o que ocorreu também com as análises químicas imediatas percebe-se uma certa similaridade entre as biomassas;
- Foi possível observar graficamente a influência negativa da U no PCS das biomassas estudadas;
- Foi realizado análise química imediata para as biomassas estudadas determinando assim MV, CF, U, CZ de cada uma delas;
- Na análise imediata existem parâmetros que interferem no PCS, sendo o MV elevando-o e CF, U e CZ rebaixando-o;
- Quando comparados os resultados obtidos neste trabalho com os obtidos por outros pesquisadores, as variações decorrentes podem ser explicadas com base nas análises químicas imediatas apresentadas pelos mesmos;

REFERÊNCIAS

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Fontes renováveis**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par2_cap4.pdf>. Acesso em: 29 out. 2017.

BORGES, A. C. P. **Caracterização energética do cavaco de Eucalyptus grandis “In natura” e torrefeito**. 2015. 81 f. Tese (mestrado) - Curso de Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/ri/bitstream/ri/21702/1/ANE_CAROLINE_PEREIRA_BORGES.pdf> Acesso em: 29/10/2017.

BRÁS, A. M; MIRANDA, F. HIPÓLITO, L; DIAS, L. S. **Biomassa e Produção de Energia**. 2008. Disponível em: <<http://portal.ipvc.pt/images/ipvc/esa/pdf/biomassa.pdf>> Acesso em: 29/10/2017.

CIESLINSKI, J. E. F. **Estudo da emissão e controle dos gases e particulados provenientes da queima de biomassa**. 2014. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014. Disponível em <<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/103729/000755664.pdf?sequence=1&isAllowed=y>> Acesso em: 29/10/2017.

CONAB, Companhia Nacional De Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira grãos: V. 5 - SAFRA 2017/18- N. 1 - Primeiro levantamento**. Brasília: Estudio Nous, 2017. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_10_16_16_34_39_graos_outubro_2017.pdf> Acesso em: 29/10/2017.

CONAB, Companhia Nacional De Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar : V. 4 - SAFRA 2017/18- N. 1 - Primeiro levantamento**. Brasília: Estudio Nous, 2017. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/17_04_20_14_04_31_boletim_cana_portugues_-_1o_lev_-_17-18.pdf> Acesso em: 29/10/2017.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço energético nacional 2015: Ano Base 2014**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, 2015.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço energético nacional 2016: Ano Base 2015**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, 2016.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço energético nacional 2017: Ano Base 2016**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, 2017.

GOLDEMBERG, J. **O estado atual do setor elétrico brasileiro**. Revista Usp, São Paulo, v. 100, n. 100, p.37-44, fev. 2015. Disponível em: <<file:///C:/Users/lucas/Downloads/106751-188564-1-SM.pdf>> Acesso em: 29/10/2017.

HILSDORF, J. W. *et al.* **Química tecnológica**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004. 340 p

HORST, D. J.. **Avaliação da Produção Energética a partir de Ligninas Contidas em Biomassas**. 2013. 106 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa-PR, 2013. Disponível em; < <http://www.pg.utfpr.edu.br/dirppg/ppgep/dissertacoes/arquivos/216/Dissertacao.pdf> > Acesso em: 29/10/2017.

KLAUTAU, J. von P. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo co-corrente para secagem de grãos**. 2008. 192 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008. Disponível em: < https://docs.ufpr.br/~bleninger/dissertacoes/150-Judith_Von_Paumgarten_Klautau.pdf > Acesso em: 29/10/2017.

MENEZES, M. J. S., M.Sc. **Poder calorífico e análise imediata da maravalha de Pinus (Pinus sp) e Araucária (Araucaria angustifolia) de reflorestamento como resíduos de madeira**, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Fevereiro de 2013. Disponível em: < http://portalpos.unioeste.br/media/Dissertacao_Marta_J_S_Menezes.pdf > Acesso em: 29/10/2017.

MME, Ministério de Minas e Energia. **Renováveis devem manter participação de 43% na matriz energética em 2017**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/renovaveis-devemmanter-participacao-de-43-na-matriz-energetica-em-2017>. Acesso em: 29/10/2017.

MME, Ministério de Minas e Energia. **Em 2016, biomassa é a segunda maior fonte de energia**. Disponível em: < <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2017/03/em-2016-biomassa-e-a-segunda-maior-fonte-de-energia> >. Acesso em: 29/10/2017.

PAULA, L.E.R, TRUGILHO P.F, NAPOLI A., BIANCHI M.L. **Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation**. Cerne, 2011. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cerne/v17n2/v17n2a12.pdf>> Acesso em: 29/10/2017.

REIS, L. B. dos. **Geração de Energia Elétrica**. Barueri: Manole Ltda., 2015. Disponível em < https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=YpgDCwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT3&dq=produ%C3%A7%C3%A3o+de+energia+%2B+eletrica&ots=2NbmSicZBX&sig=adKje57aK_p5KRSnMrBi06kUxxs#v=onepage&q&f=false > Acesso em: 29/10/2017.

SEGURA, M. L.. **A evolução da matriz energética brasileira: O papel dos biocombustíveis e outras fontes alternativas**. Disponível em: <<http://www.ambito->

juridico.com.br/site/index.php?n_link=revista_artigos_leitura&artigo_id=11039>.

Acesso em: 29/10/2017.

VIEIRA, A. C. M. **Caracterização da Biomassa Proveniente de Resíduos Agrícolas para Geração de Energia**. Sc, Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Janeiro – 2012. Disponível em: <http://portalpos.unioeste.br/media/File/energia_agricultura/pdf/Dissertacao_Ana_C_Vieira.pdf> Acesso em: 29/10/2017.

VISMARA, E. de S.. **Mensuração da biomassa e construção de modelos para construção de equações de biomassa**. 2009. 103 f. Tese (Mestrado) - Curso de Recursos Florestais, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009 Disponível em:<<http://cmq.esalq.usp.br/wiki/lib/exe/fetch.php?media=publico:disserteses:vismara-2009.pdf>> Acesso em: 29/10/2017.