

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA**

**APROVEITAMENTO DA BIOMASSA REMANESCENTE DA  
COLHEITA DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA COGERAÇÃO**

**KARLA MENEGUETTI BLANCO**

Orientador: Prof. Dr. Nehemias Curvelo Pereira

Maringá, 20 de Fevereiro de 2013

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA**

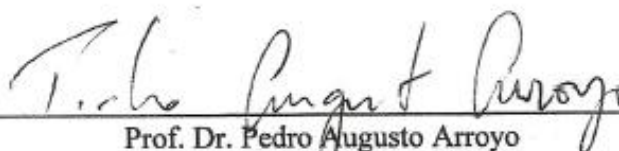
Esta é a versão final da dissertação de Mestrado apresentada por **Karla Meneguetti Blanco** perante a Comissão Julgadora do Curso de Mestrado em Bioenergia em 20 de fevereiro de 2013.

**COMISSÃO JULGADORA**



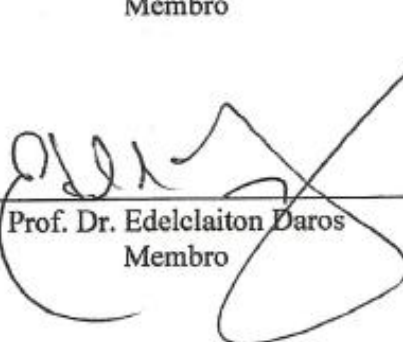
---

Prof. Dr. Nehemias Curvelo Pereira  
Orientador/Presidente



---

Prof. Dr. Pedro Augusto Arroyo  
Membro



---

Prof. Dr. Edelclaiton Daros  
Membro

“Vitória sem luta é mérito sem glória”  
(Provérbio Chinês)

Aos meus avôs, Pedro Blanco (*in  
memorian*) e Felizardo Meneguetti, que  
viveram da terra e dela sobreviveram com  
muito suor, dedico.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que me abençoou com a oportunidade de desenvolver este trabalho e permitiu a ousadia de concluí-lo com louvor.

A minha família, meus pais, meus irmãos e meus avós, meus alicerces, pelo amor infinito, força, incentivo imensurável e atenção dada até hoje, aconselhando-me nas decisões e me apoiando para que eu não desista em momento algum. Pela companhia diária e pela confiança na minha capacidade de lutar para conquistar meus objetivos, como a conquista desse trabalho, meu eterno amor e gratidão.

Ao meu namorado, Luís Fernando P. Crepaldi, por sua presença, amor e dedicação, por não ter medido esforços e esteve comigo nos momentos mais difíceis, participando ativamente na parte experimental a campo, deste trabalho. Sem sua participação, seu amor e paciência de todos os dias, este trabalho não teria sido concluído.

Ao Prof. Dr. Nehemias Curvelo Pereira por ter aceitado dividir este desafio, por toda orientação, confiança e conhecimento disseminados, dentro e fora dos assuntos acadêmicos.

As verdadeiras amizades construídas nos laboratórios do departamento de Engenharia Química da UEM e aos colegas de mestrado, pelo companheirismo, amizade, incentivo e o carinho de todos também foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

A Universidade Estadual de Maringá, pela oportunidade de complementação à minha formação profissional.

A Usina Santa Terezinha, em nome do Diretor Álvaro Meneguetti, por ter autorizado utilizar a unidade de Paranacity/PR para o desenvolvimento deste projeto.

A todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho, agradeço.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>4</b>
2.1	O setor energético	4
2.2	Palhiço de cana-de-açúcar como fonte energética alternativa	6
2.3	A cultura da cana-de-açúcar no Brasil	10
2.4	Componentes químicos majoritários da cana-de-açúcar	13
2.4.1	Celulose	15
2.4.2	Hemicelulose	17
2.4.3	Lignina	19
2.5	Mecanização da colheita de cana crua (sem queima prévia)	20
2.6	Caracterização da biomassa como combustível e processos de combustão	22
2.7	Caracterização físico-química da biomassa	24
2.8	Caracterização complementar da biomassa	28
2.9	Cogeração de energia no setor sucroalcooleiro	31
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>36</b>
3.1	Materiais	36
3.1.1	<i>Materiais a campo</i>	36
3.1.1.1	Variedades de cana-de-açúcar	36
3.1.1.2	Conjunto mecanizado	38
3.1.1.3	Outros utensílios	39
3.1.2	<i>Materiais laboratoriais</i>	39
3.1.2.1	Mensuração ponderal	39
3.1.2.2	Características físico-químicas da biomassa	40
3.1.2.2.1	Determinação do teor de umidade	40
3.1.2.2.2	Determinação da granulometria em peneiras	40
3.1.2.2.3	Determinação do poder calorífico	41
3.1.2.2.4	Determinação do teor de materiais voláteis	41
3.1.2.2.5	Determinação do teor de cinzas	42
3.1.2.2.6	Determinação do carbono fixo	42
3.2	Métodos	42
3.2.1	<i>Caracterização das variedades de cana-de-açúcar e condições do terreno</i>	43
3.2.2	<i>Determinações ponderais da matéria prima e do material remanescente da colheita</i>	46
3.2.3	<i>Caracterização físico-química da biomassa</i>	47
3.2.3.1	Determinação do teor de umidade	47
3.2.3.2	Determinação da granulometria em peneiras	48
3.2.3.3	Determinação do poder calorífico	49
3.2.3.4	Determinação do teor de materiais voláteis	50
3.2.3.5	Determinação do teor de cinzas	51
3.2.3.6	Determinação do teor de carbono fixo	51
3.2.4	<i>Caracterização complementar da biomassa</i>	52
3.2.4.1	Análise Termogravimétrica (ATG)	52
3.2.4.2	Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	52
3.2.4.3	Análise de Espectroscopia no Infravermelho (FTIR)	52
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>54</b>

4.1	Caracterização das variedades de cana-de-açúcar.....	54
4.1.1	<i>Determinações ponderais da matéria prima e do material remanescente da colheita</i> .....	54
4.2	Caracterização físico-química da biomassa .....	55
4.2.1	Análise granulométrica .....	55
4.2.2	Análise Imediata.....	57
4.2.3	Poder Calorífico .....	58
4.3	Análises Complementares .....	62
4.3.1	Análise Termogravimétrica.....	62
4.3.2	Microscopia Eletrônica de Varredura .....	66
4.3.3	Espectroscopia no Infravermelho.....	69
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>72</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS</b> .....	<b>74</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>75</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Oferta interna de energia mundial. Ano base 2008 .....	5
Figura 2: Oferta interna de energia no brasil. Ano base 2010.....	5
Figura 3: Média de produtividades do palhão (LIMA, 2009); adaptado pela Autora.....	7
Figura 4: Zoneamento Agroecológico da cana-de-açúcar.....	11
Figura 5: Estrutura de uma fibra vegetal.....	13
Figura 6: Fluxograma genérico dos componentes químicos principais da biomassa da cana-de-açúcar .....	15
Figura 7: Parte central da molécula de celulose .....	15
Figura 8: Associação dos componentes da parede celular. (1) Cadeia linear da celulose, com a indicação de sua unidade estrutural; (2) arranjo das cadeias na fibrila elementar; (3) Cristalito; (4) seção transversal da microfibrila .....	16
Figura 9: Monossacarídeos constituintes das hemiceluloses. D-glucose (1), D-galactose (2), L-arabinose (3), D-xilose (4), D-manose (5), 4-O-metil-D-Glucurônico (6) e L-ramnose (7)....	17
Figura 10: Esquema da parede celular vegetal. Representa a estrutura de uma microfibrila, com 36 moléculas de celulose depositadas umas sobre as outras. Uma das moléculas de hemicelulose (o glucuronoarabinoxilano) é mostrada em detalhe na parte de cima da figura	18
Figura 11: Representação da estrutura química de um tipo de lignina .....	19
Figura 12: Fluxograma de representando as análises e os processos para a caracterização da biomassa .....	24
Figura 13: Gráfico da expansão da produção brasileira do bagaço e da palha de cana, até o ano de 2030 .....	33
Figura 14: Variedade RB835054.....	37
Figura 15: Variedade RB867515.....	38
Figura 16: A: Colhedora CASE; B: Visão interna da colhedora (despontador); C: Descarga da colhedora para o transbordo; D: Deslocamento do transbordo .....	39
Figura 17: Imagens da guilhotina, recipiente de acondicionamento e dessecador.....	40
Figura 18: Conjunto de peneiras e vibrador de peneiras.....	40
Figura 19: Bomba Calorimétrica Parr 6200 .....	41
Figura 20: Imagens da peneira, cadinhos com tampas e mufla em operação .....	42
Figura 21: Imagens da mufla em operação e dos cadinhos no dessecador .....	42
Figura 22: Representação da metodologia a campo.....	43
Figura 23: Representação da numeração de folhas no sistema estabelecido por Kuijper.....	44
Figura 24: Imagem Google Maps – Fazenda Maria Regina .....	45
Figura 25: Imagem Google Maps – Fazenda Figueira .....	46
Figura 26: Operação de colheita mecânica (A); Gabarito de 1m <sup>2</sup> sobre o palhão (B); Recolhimento do palhão contido no gabarito (C); Solo limpo, final da operação (D). .....	47
Figura 27: Influência da umidade no poder calorífico para a Variedade RB835054.....	57
Figura 28: Influência da umidade no poder calorífico para a Variedade RB867515.....	58
Figura 29: Valores do poder calorífico entre as Variedades RB835054 e RB867515.....	59
Figura 30: Curva termogravimétrica das frações de folhas da variedade RB835054, com as regiões de perda de massas registradas .....	60
Figura 31: Perfil ATG/DATG - Folhas Secas da Variedade RB835054 .....	61
Figura 32: Perfil ATG/DTGA - Folhas Verdes da Variedade RB835054 .....	62
Figura 33: Perfil ATG/DTGA - Folhas Ponteiro da Variedade RB835054.....	62
Figura 34: Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da fração folha seca de cana-de-açúcar da variedade RB835054 .....	63

Figura 35: Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da fração folha verde de cana-de-açúcar da variedade RB835054.....	64
Figura 36: Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da fração folha do ponteiro de cana-de-açúcar da variedade RB835054.....	64
Figura 37: Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da fração folha seca de cana-de-açúcar da variedade RB867515 .....	65
Figura 38: Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da fração folha verde de cana-de-açúcar da variedade RB867515 .....	65
Figura 39: Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da fração folha do ponteiro de cana-de-açúcar da variedade RB867515 .....	66
Figura 40: Espectros no infravermelho das frações de folhas de cana-de-açúcar (folha seca, ponteiro e verde) para a variedade RB835054 .....	67
Figura 41: Espectros no infravermelho das frações de folhas de cana-de-açúcar (folha seca, ponteiro e verde) para a variedade RB867515 .....	67



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização da matéria prima colhida manualmente.....	7
Tabela 2: Valores médios de PCS – poder calorífico superior e PCU – poder calorífico útil de algumas biomassas em kcal kg <sup>-1</sup> .....	8
Tabela 3: Distribuição da energia contida em um canavial com 60 t ha <sup>-1</sup> de matéria prima.....	9
Tabela 4: Composição das fibras lignocelulósicas do bagaço de cana e seus respectivos teores energéticos .....	14
Tabela 5: Composição das fibras lignocelulósicas da palha.....	14
Tabela 6: Valores médios de carbono (%), hidrogênio (%), umidade (%), poderes caloríficos superior, inferior e útil (kcal kg <sup>-1</sup> ) .....	26
Tabela 7: Composição do bagaço e palhiço pela análise imediata.....	27
Tabela 8: Análise imediata e poder calorífico superior da biomassa de cana-de açúcar.....	28
Tabela 9: Estimativa da oferta da biomassa de cana até o ano de 2030 (em milhões de toneladas).....	34
Tabela 10: Caracterização da matéria prima colhida manualmente (percentual em massa).....	51
Tabela 11: Dados obtidos com o recolhimento de palhiço .....	52
Tabela 12: Resultados para a Análise Imediata (%) .....	54
Tabela 13: Análise Imediata para biomassa de cana-de-açúcar(%) .....	55
Tabela 14: Valores médios de poder calorífico, em base úmida (MJ kg <sup>-1</sup> ) .....	56
Tabela 15: Valores médios de poder calorífico, em base seca (MJ kg <sup>-1</sup> ) .....	56
Tabela 16: Análise termogravimétrica (variedadeRB835054) .....	61
Tabela 17: Relação Grupo funcional no espectro infravermelho das amostras estudadas .....	68

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1: Conjunto de peneiras com suas respectivas aberturas .....	48
Quadro 2: Distribuição granulométrica e valor calculado do diâmetro médio de Sauter da fração folha seca de cana-de-açúcar .....	53

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

**ABNT:** Associação Brasileira de Normas Técnicas

**Alcoobras:** Revista Alcoolbras

**ALCOPAR:** Associação de produtores de bioenergia do Estado do Paraná

**ANEEL:** Agência Nacional de Energia Elétrica

**ASTM:** American Society for Testing and Materials

**BEN:** Balanço Energético Nacional

**CGEE:** Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

**CNI:** Confederação Nacional da Indústria

**COGEN:** Associação da Indústria de Cogeração de Energia

**COMCAP:** Complexo de Centrais de Apoio à Pesquisa

**CONAB:** Companhia Nacional de Abastecimento

**COPERSUCAR:** Cooperativa de Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo

**CTC:** Centro de Tecnologia Canavieira

**DEQ:** Departamento de Engenharia Química

**Eletrobrás:** Centrais Elétricas Brasileiras

**EMBRAPA:** Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

**ESALQ/USP:** Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” de São Paulo

**IAP:** Instituto Ambiental do Paraná

**IEL:** Instituto Euvaldo Lodi

**MME:** Ministério de Minas e Energia

**Proálcool:** Programa Brasileiro do Álcool

**RIDESA:** Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro

**SEMA:** Secretaria de Estado do Meio Ambiente

**UEM:** Universidade Estadual de Maringá

**ATG:** Análise Termogravimétrica

**ATR:** Reflexão Total Atenuada

**FTIR:** Espectroscopia no Infravermelho

**MEV:** Microscopia Eletrônica de Varredura

**PC:** Poder Calorífico

**PCI:** Poder Calorífico Inferior

**PCS:** Poder Calorífico Superior

**PCU:** Poder Calorífico Útil

**TG/DTG:** Curva Termogravimétrica e Derivada da curva Termogravimétrica

## LISTA DE UNIDADES DE MEDIDA

**cm:** Centímetro

**m<sup>2</sup>:** Metro quadrado

**mm:** Milímetro

**nm:** Nanômetros

**ha:** Hectare

**g:** Gramas

**kg:** Quilogramas

**kg ha<sup>-1</sup>:** Quilogramas por hectare

**t:** Toneladas

**t dia<sup>-1</sup>:** Toneladas por dia

**t h<sup>-1</sup>:** Toneladas por hora

**t ha<sup>-1</sup>:** Toneladas por hectare

**kcal kg<sup>-1</sup>:** Quilocalorias por quilograma

**Mcal:** Mega calorias

**MJ kg<sup>-1</sup>:** Mega joules por quilograma

**MW:** Megawatts

**MWh:** Megawatts hora

**%:** Porcentagem

**%b.s:** Porcentagem em base seca

**%b.u:** Porcentagem em base úmida

**°C:** Graus Celsius

**mL:** mililitros

## LISTA DE NOMENCLATURAS

**Mu** = Massa úmida da amostra (g)

**Ms** = Massa seca da amostra (g)

**M0** = Massa do cadinho (g)

**M** = Massa da amostra (g)

**M2** = Massa inicial do cadinho + amostra (g)

**M3** = Massa do cadinho + resíduo (g)

**TC; CZ** = Teor de cinzas (%)

**TCF; CF** = Teor de carbono fixo (%)

**TMV; MV** = Teor de materiais voláteis (%)

**U** = Teor de umidade (%)

**Dm**: Variação de massa

**dm/dT**: Variação de massa pela variação do tempo

$\lambda$ : Comprimento de ondas

$\mu$ : Mícron

**v**: Número de onda

**A**: Absorbância;  $A = \log_{10}(1/T)$ : Logaritmo na base 10 do recíproco da transmitância

**KBr**: Brometo de Potássio

**kV**: Unidade de medida de tensão elétrica

**T**: Transmitância

**UV**: Ultravioleta

**W**: Filamento de tungstênio

**D<sub>médio</sub>** (cm): Diâmetro médio da peneira (centímetros)

**D<sub>médio de Sauter</sub>** (cm): Diâmetro médio de Sauter (centímetros)

**D<sub>peneira</sub>** (cm): Diâmetro de abertura da peneira (centímetros)

**M<sub>s</sub>** (g): Massa de folha seca contida no interior da peneira (gramas)

$\Delta\phi$  = Fração das partículas retidas na peneira;

$\phi <$  = Fração das partículas que apresentam um diâmetro menor que o diâmetro da peneira;

$\phi >$  = Fração das partículas que apresentam um diâmetro maior que o diâmetro da peneira;

$\Delta\phi/D_{médio}$  (1/cm): Fração das partículas retidas na peneira dividida pelo diâmetro médio da peneira (um sobre centímetros)

**Mesh Tyler:** Especificação da peneira

**C:** Carbono

**Ca:** Cálcio

**CO<sub>2</sub>:** Dióxido de Carbono

**H; H<sub>2</sub>:** Hidrogênio

**K:** Potássio

**Mg:** Magnésio

**N; N<sub>2</sub>:** Nitrogênio

**Na:** Sódio

**O; O<sub>2</sub>:** Oxigênio

**S:** Enxofre

**SO<sub>2</sub>:** Dióxido de Enxofre

**α:** Alfa

**β:** Beta

**s.d:** Sem data definida

**PVC:** Policloreto de vinila

**Brix:** Porcentagem em massa de sólidos solúveis contidos em uma solução de sacarose quimicamente pura

**C4:** Primeiro composto orgânico estável da fotossíntese é uma molécula de 4 carbonos

**Pol:** Porcentagem em massa de sacarose aparente contida em uma solução açucarada de peso normal

**PCC:** Pol da cana corrigida

# **APROVEITAMENTO DA BIOMASSA REMANESCENTE DA COLHEITA DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA COGERAÇÃO**

**AUTORA: KARLA MENEGUETTI BLANCO**

**ORIENTADOR: PROF. Dr. NEHEMIAS CURVELO PEREIRA**

Dissertação de Mestrado; Programa de Pós-Graduação em Bioenergia; Universidade Estadual de Maringá; Av. Colombo 5790, Bloco E-46 - 09, CEP 87020-900 - Maringá – PR, Brasil.

## **RESUMO**

Neste trabalho foi estudada a utilização do palhiço, material remanescente da colheita mecânica da cana-de-açúcar, obtido sem queima prévia do canavial, como combustível sólido em caldeiras. O uso dessa biomassa se faz necessário, pois apresenta-se como matéria prima alternativa de potencial energético interessante para uso como combustível sólido em caldeiras e, conseqüentemente, para a cogeração de energia. O palhiço poderá ser utilizado como combustível complementando a função do bagaço, atualmente utilizado, aumentando assim a eficiência energética do processo.

O poder calorífico deste material, por volta de 4000 kcal kg<sup>-1</sup>, é equivalente ao bagaço da cana, o que o torna não mais um material descartável, mas um importante produto para agregação de valor no setor sucroalcooleiro. Inúmeros estudos apontam para a relação em que 1 t de palhiço corresponde, energeticamente, 1,2 a 2,5 barris de petróleo americano, dependendo da umidade e da massa e, que em 1 ha de canavial se obtém de 4 a 10 t de palhiço com umidade aproximada de 15 a 20%. No entanto, o setor ainda enfrenta dificuldades para estabelecer uma tecnologia viável no recolhimento deste coproduto do campo até sua destinação à indústria. Mesmo diante desse entrave, estudos promissores garantem que em breve essa tecnologia será dominada.

Como resultados deste trabalho, os valores médios obtidos para o poder calorífico do palhiço das variedades RB835054 e RB867515 foram de 4100 kcal kg<sup>-1</sup> e 4300 kcal kg<sup>-1</sup> (em base seca), respectivamente. Já a proporção correspondente às frações folha verde, folha seca e folha do ponteiro em relação ao total da planta resultaram em um valor médio de 20%, que atende ao material disponibilizado para uso. Além disso, a produtividade estimada para o palhiço foi em média de 16 t ha<sup>-1</sup>, para cada variedade.



Os resultados obtidos demonstram que a metodologia proposta atendeu as necessidades esperadas de obtenção dos dados que permitem uma tomada de decisão. No entanto, ainda é preciso buscar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da utilização do palhiço como mais um coproduto agrícola de considerável inserção no mercado.

**Palavras-chave:** biomassa, cana-de-açúcar, palhiço, poder calorífico, combustível, cogeração.

# **BIOMASS UTILIZATION OF THE REMNANT OF HARVEST SUGAR CANE FOR COGENERATION**

**Authoress: KARLA MENEGUETTI BLANCO**

**Adviser: PROF. Dr. NEHEMIAS CURVELO PEREIRA**

Masters dissertation, Graduate Program in Bioenergy, University of Maringá; Av. Colombo 5790, Block E-46 - 09, zip code 87020-900 - Maringá – PR, Brazil.

## **ABSTRACT**

In this work was studied the use of sugar cane straw, material remnant of mechanical harvesting from sugar cane without burning, as solid fuel in boilers. The use of biomass is required, it presents itself as an alternative raw material with energetic potential interesting. The straw is used as fuel, complementing the role of the crushed sugar cane, currently used, thus increasing the energy efficiency of the process.

The calorific value of this material, around  $4000 \text{ kcal kg}^{-1}$ , is equivalent to sugar cane bagasse, which makes it no longer a disposable material, but an important product to add value in the biofuels industry. Numerous studies point to the relationship 1 ton of trash corresponds energetically 1.2 to 2.5 barrels of American petroleum, depending on the humidity and the mass and that in 1 ha of sugar cane obtained from 4 to 10 tons of trash to approximate moisture 15-20%. However, the sector still faces difficulties in establishing a viable technology in the gathering of this coproduct from the field to its destination industry. Even in the face of this obstacle, promising studies ensure that this technology will soon be dominated.

The results of this study, the mean values obtained for the calorific value of straw varieties were RB835054 and RB867515 of  $4100 \text{ kcal kg}^{-1}$  and  $4300 \text{ kcal kg}^{-1}$  (dry basis), respectively. The proportion corresponding to fractions green leaf, dry leaf and leaf pointer in relation to total plant resulted in an average of 20%, which meets the material available for use. Besides that, the estimated yield for the trash was on average 16 tons per hectare for each variety.

The results demonstrate that the proposed methodology has met the requirements expected of obtaining data that allow a decision. But we still need to seek technical, economic

and environmental viability of using straw as another by product of considerable agricultural market insertion.

**Keywords:** biomass, sugar cane, straw, calorific value, fuel, cogeneration.

## 1 INTRODUÇÃO

O centro das preocupações do mundo contemporâneo envolve questões relacionadas à energia e clima. O Brasil como vice-líder na produção de bioetanol de cana-de-açúcar representa uma oportunidade estratégica em um cenário de crescente demanda global por energia limpa. O aproveitamento de fontes alternativas de energia permite utilizar com mais eficiência os recursos energéticos e isso faz parte dos objetivos dos responsáveis por instituições governamentais e de pesquisa, tendo a cogeração de energia como uma medida indispensável para suprir a demanda.

A produção de etanol por meio da cultura da cana-de-açúcar a baixo custo, devido às características locais e as tecnologias adequadas, permite pensar em expansão significativa dessa produção. O uso decorrente de combustíveis fósseis é um dos causadores do aumento da emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera e por esse motivo, há a necessidade de produção de combustíveis a partir de biomassa, os chamados biocombustíveis.

Para Ripoli et al. (2006), dois terços de todo o potencial energético teórico da cana-de-açúcar, representados pelo bagaço e o palhiço, começam a ser aproveitados na sua totalidade. A composição da energia primária presente na cana-de-açúcar respeita, a grosso modo, a seguinte relação: um terço no caldo de cana, um terço no bagaço e um terço no palhiço. Até aqui, tem-se utilizado os açúcares do caldo para produzir açúcar e etanol, enquanto a maior parte do bagaço é queimada para gerar vapor e bioeletricidade em um processo de baixa eficiência energética.

Vários autores afirmam que o volume de palhiço sob a cana soca dificulta a sua emergência, causando falha na rebrota, alterando a temperatura do solo, favorecendo o aparecimento de pragas. Isto torna necessária uma reformulação nas práticas de coleta e aproveitamento dessa biomassa, até então não empregadas no manejo da cana colhida com queima (COSTA et al., 2003).

Outro problema que o setor enfrenta é como recolher essa palha, sendo que não há máquinas destinadas para o mesmo. Segundo Vian (s.d), atualmente, o setor sucroalcooleiro utiliza a energia proveniente do bagaço da cana-de-açúcar para gerar eletricidade para seu próprio consumo. A queima do bagaço produz, em média, uma quantidade de energia igual a 4450 kcal kg<sup>-1</sup>. Estudos recentes aumentam a perspectiva de utilização da biomassa proveniente da colheita da cana-de-açúcar crua. A coleta do palhiço é realizada após ele secar naturalmente no campo, ao atingir 30% de umidade. Sua recuperação pode ser feita, então, de forma mecanizada, por meio de máquinas enleiradoras, enfardadoras e de carregamento.

Segundo estudos feitos pelo Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), dependendo dos procedimentos de colheita, é possível recuperar um teor de biomassa seca equivalente a 14% da massa de cana (caules colhidos) entregue à usina. O potencial do palhiço como fonte para aumentar a oferta de biomassa lignocelulósica, seja para processos hidrolíticos, seja como fonte de energia primária, justifica um estudo aprofundado para conhecer sua composição e propriedades físicas e químicas.

A principal questão em que o setor sucroalcooleiro busca resposta é como retirar o palhiço do campo e disponibilizá-lo na usina de maneira mais adequada. O aproveitamento em larga escala ainda é dificultado pelos altos custos de sua recuperação, que envolve recolhimento, adensamento, transporte, redução de tamanho e tecnologia para utilização na planta industrial. Existem também dificuldades relacionadas com a heterogeneidade e baixa densidade do material, além de se utilizar, atualmente, equipamentos de baixa capacidade operacional e custos elevados.

À medida que se consolida o conceito de cana-energia com aproveitamento integral da planta, a recuperação do palhiço passa a ser parte da colheita da cana-de-açúcar, mesmo que esse processo envolva uma sequência de operações complementando a operação convencional da colhedora que recupera apenas os colmos (BRAUNBECK & CORTEZ, 2005).

Diante dos resultados obtidos será possível estabelecer a potencialidade energética da biomassa alternativa destinada à utilização como combustível sólido em caldeiras e, conseqüentemente, para cogeração de energia. Assim como, comparar o potencial energético definido para as duas variedades com as características específicas do bagaço da cana-de-açúcar, coproduto atualmente utilizado para a finalidade de cogeração no setor sucroalcooleiro.

Como objetivos específicos deste trabalho foram necessários caracterizar biometricamente as variedades de cana-de-açúcar para determinar proporcionalmente as frações correspondentes à folha seca, folha verde e ponteiro, do total da planta; estimar a quantidade de massa remanescente presente na área, após a colheita mecânica, para cada variedade; analisar quimicamente o material colhido anteriormente a campo para identificar e comparar as características da biomassa vegetal das duas variedades de cana-de-açúcar; realizar análises químicas complementares para o melhor conhecimento dos materiais vegetais estudados.

O objetivo geral deste trabalho é comparar o potencial energético do material remanescente da colheita de duas variedades de cana-de-açúcar, em duas condições de uso, biomassa úmida e seca, para fins de cogeração.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 O setor energético

A partir de meados da década de 80 surgiram algumas dificuldades no setor energético brasileiro, que desde então entrou em uma fase de reestruturação e que ainda tem provocado algumas alterações em vários e diferentes setores (PRIETO, 2003). Dificuldades tais que em 2001 provocou uma crise energética que marcou a história dos brasileiros.

Tolmasquim (2000) já destacava como principais causas desta conturbada fase, o aumento do consumo de energia nos dois anos anteriores à referida data e a escassez das chuvas, que deixaram de abastecer os reservatórios das principais hidrelétricas brasileiras. Ficou evidente, assim, a falta e a insuficiência de investimentos no setor energético brasileiro, que devido à crise incentivou o país na busca de novas e diferentes alternativas de produção de energia.

À procura de fontes mais eficientes e menos impactantes, o mundo tem buscado novas e diferentes alternativas, e vem procurando priorizar as mais limpas. Como resultado, as que mais têm se destacado são as fontes ditas como renováveis, que em pesquisas do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, feitas em 2001, já se destacava em sua crescente utilização no mundo como insumo energético (CGEE, 2001).

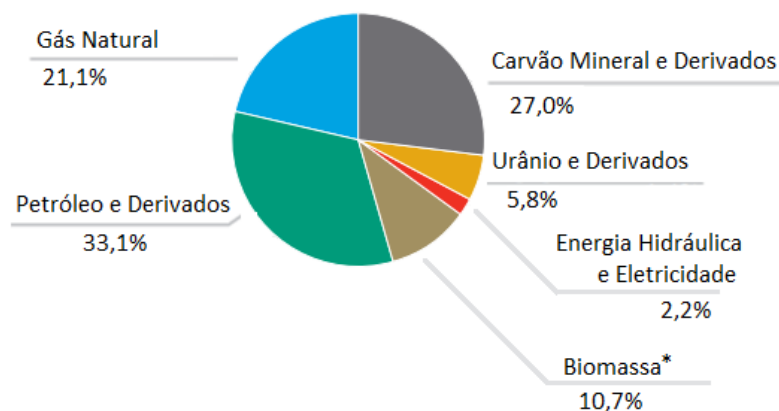
Dentre as formas de energia renovável, a oriunda da biomassa é uma das mais utilizadas no mundo. Estima-se que seu consumo atual esteja entre 10% e 14%, é o que afirmam Rosillo-Calle, et al (2005). Segundo estes autores, o papel da energia da biomassa tem se transformado rapidamente devido a vários aspectos, e os que têm se destacado são os fatores ambientais, energéticos, climáticos, sociais e econômicos. Por essas e outras razões, sua importância cresce significativamente em muitos países industrializados.

Nos países em desenvolvimento, a produção de energia elétrica a partir da biomassa tem sido bastante defendida (BARROS, 2007). Alguns programas nacionais começaram a ser desenvolvidos visando ao incremento da eficiência de sistemas, o que não tem sido diferente no Brasil, onde há vários anos tem sido crescente a aplicação de tecnologias para a utilização da biomassa como fonte geradora de energia, gerando empregos e com muito pouco recurso financeiro (FIESP, 2001).

Dentre estes, os combustíveis mais comuns são os resíduos agrícolas, madeira e plantas, como a cana-de-açúcar, que são colhidos com o objetivo de produzir energia. O lixo

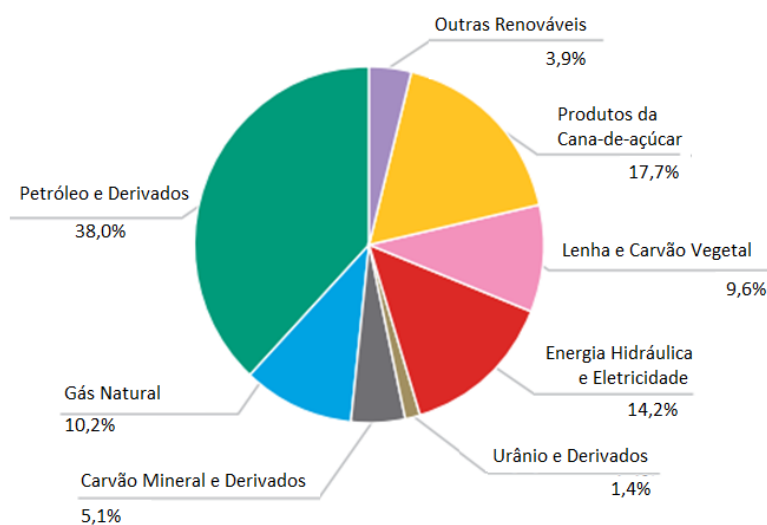
municipal pode ser convertido em combustível para o transporte, indústrias e mesmo residências. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME, 2011), nos resultados preliminares do Balanço Energético Nacional 2011 (BEN), a cana-de-açúcar tem se destacado significativamente com seu crescimento na Matriz Energética Brasileira.

As Figuras 1 e 2, a seguir, representam a matriz energética mundial e brasileira, tendo como base o ano de 2008 e 2010, respectivamente.



**Figura 1:** Oferta interna de energia mundial - Ano base 2008 (MME/BEN, 2011)

No mundo, a oferta de biomassa é crescente, mas ainda é baixa, sendo menor ainda a disponibilidade de derivados da cana, que está inclusa na parcela de 2,2% de Biomassa Moderna e outras. O que se destaca é o uso do petróleo, carvão mineral, gás natural e, derivados. Por outro lado no Brasil, só os produtos derivados da cana-de-açúcar respondem por cerca de 20% (Figura 2).



**Figura 2:** Oferta interna de Energia no Brasil - Ano base 2010 (MME/BEN, 2011)



## 2.2 Palhiço de cana-de-açúcar como fonte energética alternativa

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) define a biomassa como todo recurso renovável constituído, principalmente, de substâncias de origem orgânica (vegetal ou animal) (ANEEL, 2005). Está sendo usada de forma crescente no mundo como insumo energético, muito mais para usos finais como energia térmica, mas já com destaque como geradora de energia elétrica, e de forma também crescente como origem de combustíveis líquidos (BARROS, 2007). Para o último caso, tem-se como exemplo o etanol.

Segundo Vasconcelos et al. (2007), a biomassa energética é o resultado obtido da atividade fisiológica das plantas, que podem se comportar como verdadeiras usinas, podendo assim transformar a energia solar, por meio do processo fotossintético, em energia química. Quando a biomassa é processada de forma eficiente, química ou biologicamente, extrai a energia armazenada nas ligações químicas e a subsequente "energia" produzida combinada com o oxigênio, o carbono é então oxidado para produzir CO<sub>2</sub> e água. Esse processo é cíclico, e o CO<sub>2</sub> é então disponível para produzir nova biomassa (McKENDRY, 2002).

Referindo-se à capacidade fotossintética da cana-de-açúcar, Rosa (1977) comenta que 1,6% da energia solar incidente sobre a cultura é transformada em energia química, o que corresponde a 52 barris de petróleo por dia, em cada km<sup>2</sup> de área plantada. Desse total, apenas o correspondente a 6,8 barris é transformado em álcool e/ou açúcar.

O termo biomassa se destaca com o uso da matéria vegetal criada pela fotossíntese a partir de seus derivados. Lora (1997), em seu trabalho sobre conservação de energia elétrica no meio rural, explica que tais derivados abrangem os resíduos florestais e agrícolas, resíduos animais e matéria orgânica contida nos resíduos domésticos e urbanos.

A denominação genérica e errônea para o resíduo da colheita de cana-de-açúcar, sem queima prévia, segundo Ripoli et al. (2004), tem sido “palha”, quando o correto tecnicamente seria “palhiço”, porque tal maneira não se constitui apenas de folhas de cana com baixo grau de umidade. Ripoli (1991) define o palhiço como sendo constituído de folhas verdes, palhas, ponteiros, colmos ou suas frações, rebolos ou suas frações, com terra a eles agregados. O mesmo autor desenvolveu uma metodologia específica para determinar as quantidades de ponteiros, folhas verdes, palhas e colmos e/ou suas frações não colhidas. Tal metodologia será utilizada para o desenvolvimento do trabalho.

Ainda de acordo com Ripoli (1991), dependendo da variedade de cana-de-açúcar cultivada, pode-se encontrar valores por volta de 6% como matéria prima correspondente a

fração folha verde disponível por planta de cana, cerca de 10% para folha seca e 8% para folhas do ponteiro do total da planta (Tabela 1).

**Tabela 1** – Caracterização da matéria prima colhida manualmente

Variedades	% Frações da planta			
	Folha Verde	Folha Seca	Folha Ponteiro	Colmo
<b>SP 711406</b>	7	10,8	9	71,6
<b>NA5679</b>	4,7	11,0	6	78,0

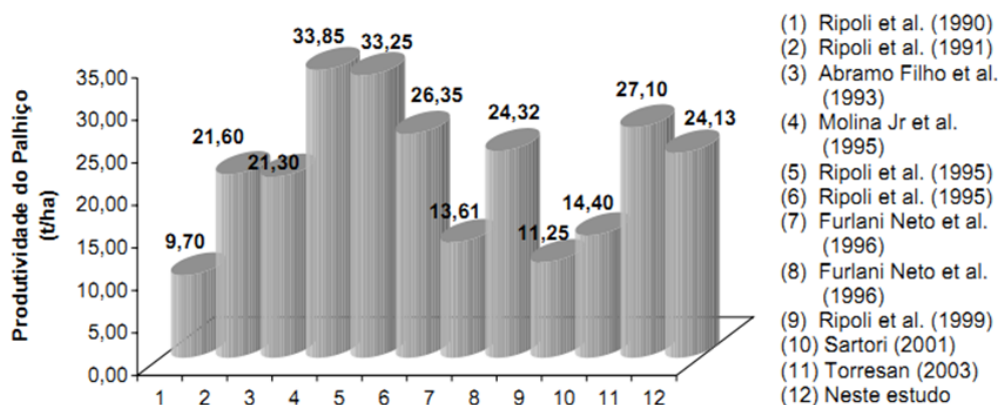
Fonte: Ripoli (1999)

São resultados relativamente semelhantes, apesar de serem consideradas variedades diferentes de cana-de-açúcar, cultivadas em solo, condições e regiões diferentes.

Para Ripoli (2001), esta matéria prima desperta o interesse dos canavieiros, uma vez que o equivalente energético do palhicho está em torno de 1,2 barril de petróleo por tonelada de material. Esse palhicho é encontrado nos canaviais na ordem de 9 a 32 t ha<sup>-1</sup> com base em massa úmida, ou seja, dependendo das condições da cultura, um hectare de canavial oferece entre 11 e 33 barris de petróleo equivalentes. Essa variabilidade oriunda de fatores como as diferentes características das variedades utilizadas, as diferenças metodológicas adotadas em cada experimento e, também, o tempo decorrido entre a colheita mecanizada e a coleta das amostras.

Cada variedade responde de acordo com a genética vegetal, o ambiente de produção em que foi instalada, desde solo onde é cultivada, a adubação, o sistema de colheita empregado, altura de corte, clima, região, entre outros.

A Figura 3 apresenta dados de diferentes produtividades de palhicho determinadas por diferentes autores e materiais varietais (LIMA, 2009).



**Figura 3** – Média de produtividades do palhicho (LIMA, 2009); adaptado pela Autora

Ripoli et al. (2004) concluíram que a biomassa proveniente do bagaço e do palhiço de cana-de-açúcar e da palha de arroz, se utilizados para cogeração, podem atender, anualmente, para a região Centro-Sul do Brasil, o seguinte número de habitantes, no que se refere ao consumo de eletricidade: palhiço de cana, 7,0 milhões; bagaço de cana, 5,55 milhões; e a palha de arroz, 0,26 milhões. Cerca de 12,5 milhões de pessoas podem ser servidas pela energia do palhiço e bagaço.

Em 2002, Ripoli mostrou que este resíduo do corte mecânico, o palhiço, dependendo de condições de campo, produz uma biomassa com poder calorífico equivalente à madeira e superior ao bagaço resultante da moagem da cana-de-açúcar e que isto poderia agregar valor ao setor.

Conforme Ripoli e Ripoli (2004) é significativo o resultado de um relatório interno de 1984, realizado pela empresa Bagatex de Ribeirão Preto/SP, em que estimaram a quantidade e o poder calorífico de resíduos industriais e agrícolas de algumas variedades plantadas no Brasil. Foi mostrado que o bagaço apresentava poder calorífico de  $1790 \text{ kcal kg}^{-1}$ , a palha  $3600 \text{ kcal kg}^{-1}$  e os ponteiros com a palha  $2280 \text{ kcal kg}^{-1}$  e foi estimado também que o potencial energético dos resíduos da colheita sem queima era da ordem de  $87,72 \times 10^{12} \text{ kcal ano}^{-1}$  de energia.

Para visualizar as variações do poder calorífico em função do material, Ripoli (2003), construiu a Tabela 2 que concentra algumas destas fontes de energia, com os seus valores médios de poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico útil (PCU).

**Tabela 2:** Valores médios de PCS – poder calorífico superior e PCU – poder calorífico útil de algumas biomassas em  $\text{kcal kg}^{-1}$

<b>Biomassas</b>	<b>PCS</b>	<b>PCU</b>
Colmos de sorgo	4273	-
Capim napier	4369	-
Palhas de <i>pinus spp</i>	4870	-
Carvão vegetal	7500	6798
Palha de cereal	4445	-
Madeira Molhe	4950	4576
Bagaço de Cana-de-açúcar	4560	1926
Folhas verdes de cana-de-açúcar	4412	1318
Palhas de cana-de-açúcar	4420	3608
Ponteiros de cana-de-açúcar	4350	899
Frações de colmos de cana	4426	675
Palhiço de cana-de-açúcar	6668	4441

Fonte: Ripoli (2003)

As pesquisas desenvolvidas pela ESALQ/USP, Copersucar e Unicamp nos últimos dez anos, de acordo com Ripoli (2003), apresentam valores médios da ordem de 4 a 12 t ha<sup>-1</sup> de palhico expresso em matéria seca e que as variações que ocorrem são devidas às condições agrônômicas de cultivo e das condições edafoclimáticas da região, mas que em termos médios o valor energético do palhico é na faixa de 1,1 a 2,2 barris de petróleo equivalentes, o que torna de vital importância o uso desta biomassa como fonte alternativa de geração de energia elétrica, tornando vantajoso o aproveitamento do palhico e de se colher a cana crua.

Ripoli, et al. (1991) estimaram que, de um canavial com 60 t ha<sup>-1</sup> de matéria prima, é possível obter 67.080 Mcal de energia, sendo distribuída como apresentado na Tabela 3.

**Tabela 3** – Distribuição da energia contida em um canavial com 60 t ha<sup>-1</sup> de matéria prima

Produtos	Quantidades	Energias (Mcal)	Percentuais (%)
Álcool	4500 L	16.830	25,09
Bagaço	15 t	26.850	40,03
Resíduos	12 t	23.400	34,88

Fonte: Ripoli, et al. (1999)

Os mesmos autores afirmam que a utilização dos resíduos de colheita como fonte de energia pode transformar a agroindústria sucroalcooleira em verdadeira usina de biomassa.

Quanto à escolha do mecanismo de aproveitamento do remanescente cultural, busca-se aquele que se apresente de forma que minimize o custo de combustível e da transferência do material para o centro de processamento com fins energéticos.

Segundo Coicev (2008), a colhedora de cana picada pode viabilizar a recuperação do palhico com a tecnologia disponível por meio de dois caminhos: a) recolhimento do palhico: que é lançado ao solo pelas colhedoras para posterior enleiramento e enfardamento, utilizando equipamentos de fenação ou similares derivados desses; b) colheita integral da cana: na qual o palhico é processado pelas colhedoras conjuntamente com os colmos industrializáveis. Neste caso existe menor contato da biomassa com o solo já que o palhico é lançado com os colmos ao veículo de transporte que acompanha a colhedora. A separação ocorrerá posteriormente na usina, por meio de um sistema de limpeza a seco. Nesse caso, se for opção a colheita integral da cana, os equipamentos para limpeza na indústria deverão ser substituídos para realização da separação da palha do colmo a seco. Por fim, há que se

considerar, também, a adição de um processo diferenciado ao palhiço, como picar e desfibrar, antes de ser somado ao bagaço para alimentação da caldeira.

### **2.3 A cultura da cana-de-açúcar no Brasil**

No Brasil, a cana-de-açúcar é cultivada desde a época da colonização (1532) e, atualmente, ocupa, de acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2012), 8.527,8 milhões de hectares do território brasileiro. Há 411 unidades produtoras cadastradas no departamento da cana-de-açúcar e agroenergia, sendo 292 mistas, 95 que produzem somente álcool e 10 exclusivamente açucareiras (BRASIL, 2012).

A produção de cana-de-açúcar se concentra nas regiões Centro-Sul e Nordeste do Brasil. De acordo com as safras das regiões brasileiras das últimas décadas, o estado de São Paulo e do Paraná são os responsáveis por metade da colheita nacional. A Figura 4 abaixo ilustra o zoneamento agroecológico da cana-de-açúcar, cujos territórios são classificados quanto ao potencial das terras para a produção da cultura da cana-de-açúcar em regime de sequeiro (sem irrigação plena), tendo como base as características físicas, químicas e mineralógicas dos solos expressos espacialmente em levantamentos de solos e em estudos sobre risco climático, relacionados com aos requerimentos da cultura (precipitação, temperatura, ocorrência de geadas e veranicos).



**Figura 4** – Zoneamento Agroecológico da cana-de-açúcar  
Fonte: EMBRAPA (2009)

Dessa forma, é possível fornecer subsídios técnicos para formulação de políticas públicas visando à expansão e produção sustentável de cana-de-açúcar no território brasileiro (EMBRAPA, 2009).

A cana-de-açúcar é uma cultura semiperene e possui ciclo médio de 4 anos desde o plantio até a renovação das áreas plantadas. A cana-de-açúcar faz parte da família Poacea do gênero *Saccharum*, tendo como principais espécies a *officinarum* L., a *spontaneum* L., *sinense* Roxb., *Barberi* Jesw., *robustum* Jews e *edule* Hask. É comumente cultivada nas regiões tropicais e subtropicais, pois necessita de uma época quente e chuvosa para o desenvolvimento vegetativo e uma época fria e/ou seca para o enriquecimento em açúcares (PAOLIELLO 2006).

De acordo com Cordeiro (2008), a cana-de-açúcar tem uma fisiologia privilegiada, pois pertence ao grupo de plantas C4, ou seja, é considerada altamente eficiente

na conversão de energia radiante em energia química (primeiro composto orgânico formado da fotossíntese é uma molécula de quatro carbonos que pode ser malato ou aspartato). A temperatura adequada, juntamente com a grande quantidade de energia solar e de água, forneceram o ambiente ideal para que a cana-de-açúcar se adaptasse no Brasil.

Como uma das mais importantes culturas agrícolas brasileiras, a cana-de-açúcar apresenta um rendimento médio de 85 t ha<sup>-1</sup>, podendo variar de 65 até 120 ha<sup>-1</sup>. Segundo Jank (2007), cada tonelada colhida e processada nas usinas pode gerar até 82 litros de álcool combustível ou 138 kg de açúcar.

Andreolli (2008) complementa essa informação, pois apresenta que a cada tonelada de cana é possível ainda gerar 250 kg de bagaço úmido (50% b.u.) e, por dados da União das Indústrias de Cana-de-açúcar (UNICA, 2009), em média 200 kg de palha e pontas.

Conforme dados da Companhia Nacional de Abastecimento, a área cultivada com cana-de-açúcar que será colhida e destinada à atividade sucroalcooleira na safra 2012/13 está estimada em 8.527,8 milhões de ha, distribuídos em todos estados produtores conforme suas características. O estado de São Paulo é o maior produtor com 51,82% (4.419,46 mil ha), seguido por Minas Gerais com 8,46% (721,86 mil ha), Goiás com 8,69% (741,38 mil ha), Paraná com 7,13% (608,38 mil ha), Mato Grosso do Sul com 6,50% (554,29 mil ha), Alagoas com 5,26% (448,86 mil ha) e Pernambuco com 3,63% (309,74 mil ha). Nos demais estados produtores as áreas são menores, com representações abaixo de 3%.

A área de cana-de-açúcar destinada à produção neste ano safra apresentou um crescimento de 2,1% ou 171,7 mil ha em relação à safra passada. A falta de investimento em novas unidades ou mesmo na ampliação da capacidade de processamento da já existente, bem como a renovação de áreas já cultivadas, dificulta um maior crescimento.

A produtividade média brasileira está estimada em 70 t ha<sup>-1</sup>, 4,3% maior que na safra 2011/12, que foi de 67 t ha<sup>-1</sup>. A previsão do total de cana moída na safra 2012/13 é de 596,63 milhões de toneladas, com aumento de 6,5% em relação à safra 2011/12, que foi de 560,36 milhões de toneladas, significando que a quantidade que será moída deve ser 36,3 milhões de toneladas a mais que na safra anterior. A produção de cana-de-açúcar da região Centro-Sul deve ser de 530,5 milhões de toneladas, 7,2% maior que a produção da safra anterior. A recuperação da produtividade foi seriamente comprometida na safra passada, somando-se a um pequeno incremento de área, justifica-se esta estimativa de crescimento da produção (CONAB, 2012).

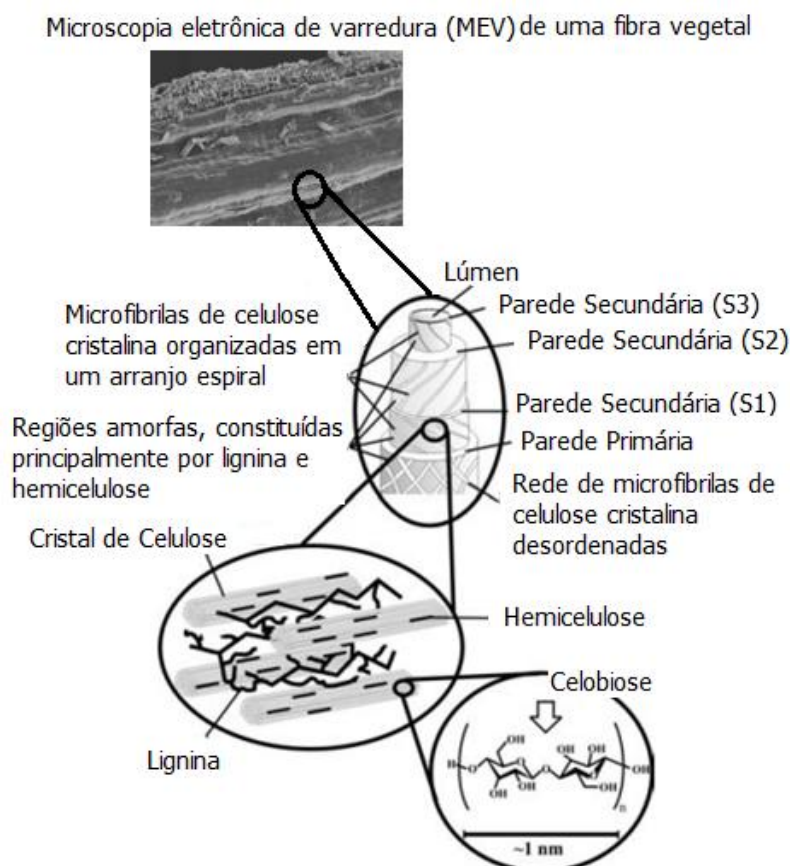
Para efeitos de produção de bioenergia, uma cultura deve ser de crescimento rápido e de produção de biomassa com alto rendimento na colheita, e em termos de energia produzida deve superar os combustíveis de origem mineral. Cumprindo-se os critérios acima, a cana-de-açúcar é atualmente a cultura energética mais promissora (WACLAWOVSKY et al., 2010).

## 2.4 Componentes químicos majoritários da cana-de-açúcar

A composição química da cana-de-açúcar pode apresentar variações em função da variedade de cana empregada e das condições de cultivo, solo e ambiente de produção.

As fibras vegetais podem ser consideradas como compósitos de fibrilas de celulose mantidas coesas por uma matriz constituída de lignina e hemicelulose (Jayaraman, 2003), cuja função é agir como barreira natural à degradação microbiana e servir como proteção mecânica. Suas características estruturais estão relacionadas à natureza da celulose e à sua cristalinidade.

A organização mais comum de uma fibra vegetal está representada na Figura 5.



**Figura 5:** Estrutura de uma fibra vegetal  
Fonte: SILVA et al. (2009); adaptado pela Autora (2012)



Cada fibra lignocelulósica tem uma estrutura de camadas complexas, constituída por uma parede primária fina, inicialmente depositada durante o crescimento das células, que circunda uma parede secundária. A parede secundária é constituída por três camadas (S1, S2 e S3), na qual a camada intermediária (S2) determina as propriedades mecânicas da fibra e consiste em uma série de microfibrilas, helicoidalmente formadas por longas cadeias de celulose e organizadas no sentido da fibra. Tais microfibrilas têm o diâmetro de 10 a 30 nm e são resultantes do empacotamento de 30 a 100 cadeias de celulose estendidas.

O bagaço da cana-de-açúcar é um material complexo, constituído de celulose, hemicelulose e lignina, que são os responsáveis pelo seu elevado conteúdo energético. A Tabela 4 apresenta a composição em fibras do bagaço seco e o respectivo teor energético.

**Tabela 4:** Composição das fibras lignocelulósicas do bagaço de cana e seus respectivos teores energéticos

Componentes	% em massa no bagaço integral seco	Poder calorífico (MJ kg <sup>-1</sup> )
Celulose	41	17,0
Hemicelulose	25	17,5
Lignina	20	20,1
Bagaço	-	18,5

Fonte: TEIXEIRA et al. (1997)

Dessa forma, observa-se que a lignina corresponde ao componente estrutural de maior influência no valor de poder calorífico e, a facilidade na sua obtenção, justifica seu estudo.

Segundo Lamonica (2005), a composição média da palha da cana-de-açúcar corresponde a apresentada na Tabela 5.

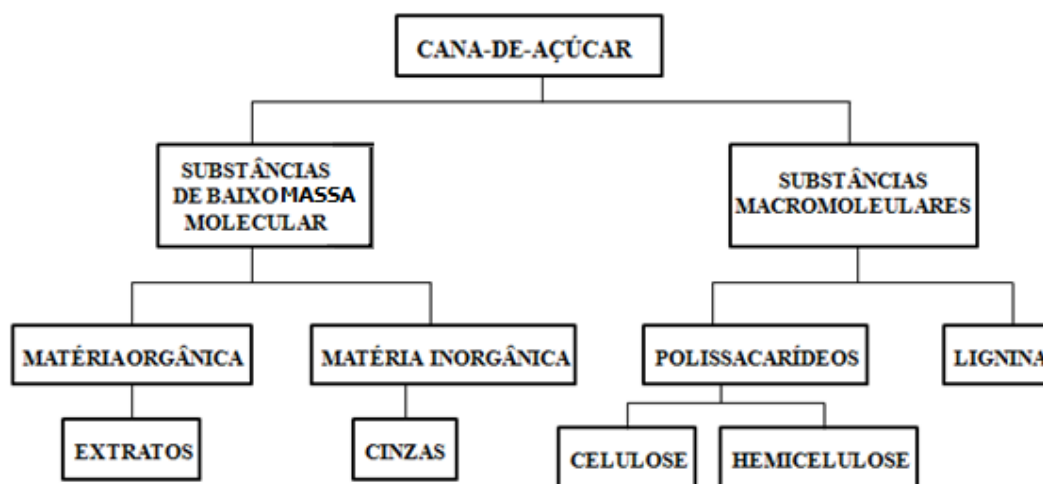
**Tabela 5:** Composição das fibras lignocelulósicas da palha

Componentes	Composição média (%)
Celulose	45,1
Hemicelulose	25,6
Lignina	12,7

Fonte: Lamonica, (2005) e Rossel, (2008); adaptado pela autora

Saad e Gonçalves (2005) relatam que encontraram resultados para a palha de cana-de-açúcar, cujos valores foram de 37% de celulose, 28% de hemicelulose e 26% de lignina.

A composição química da cana-de-açúcar pode apresentar variações em função da variedade da cana empregada e da localização geográfica dos locais de cultivo. Os principais componentes macromoleculares da cana são: celulose (38 a 50 %), polioses ou hemiceluloses (25 a 27%) e lignina (20 e 30%). Outros componentes, como extratos orgânicos e minerais inorgânicos variam de 5 a 20%. A Figura 6 apresenta um fluxograma representativo dos vários tipos de estruturas químicas da biomassa de cana-de-açúcar. Estes componentes encontram-se agregados na mesma matriz lignocelulósica e, devido a isto, a análise da composição química destes biomateriais torna-se complexa (MOHAN, et al. 2006).

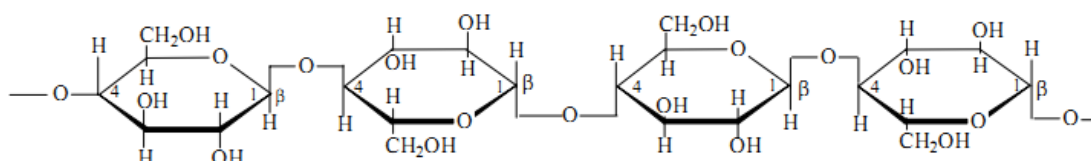


**Figura 6** – Fluxograma genérico dos componentes químicos principais da biomassa da cana-de-açúcar

Fonte: MOHAN, et al. (2006); adaptado pela Autora

### 2.4.1 Celulose

Este polímero natural é um homopolissacarídeo linear cuja unidade repetitiva é a celobiose ou anidroglicose sindiotática (Figura 7) que é formada por anéis de  $\beta$ -D-glicopirranose unidas por ligações do tipo  $\beta$ -D (1 $\rightarrow$ 4) glicosídicas, de fórmula geral  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , proporcionando assim um crescimento linear da cadeia macromolecular levando a uma elevada massa molecular, considerável grau de cristalinidade, insolubilidade em água e estrutura rígida.



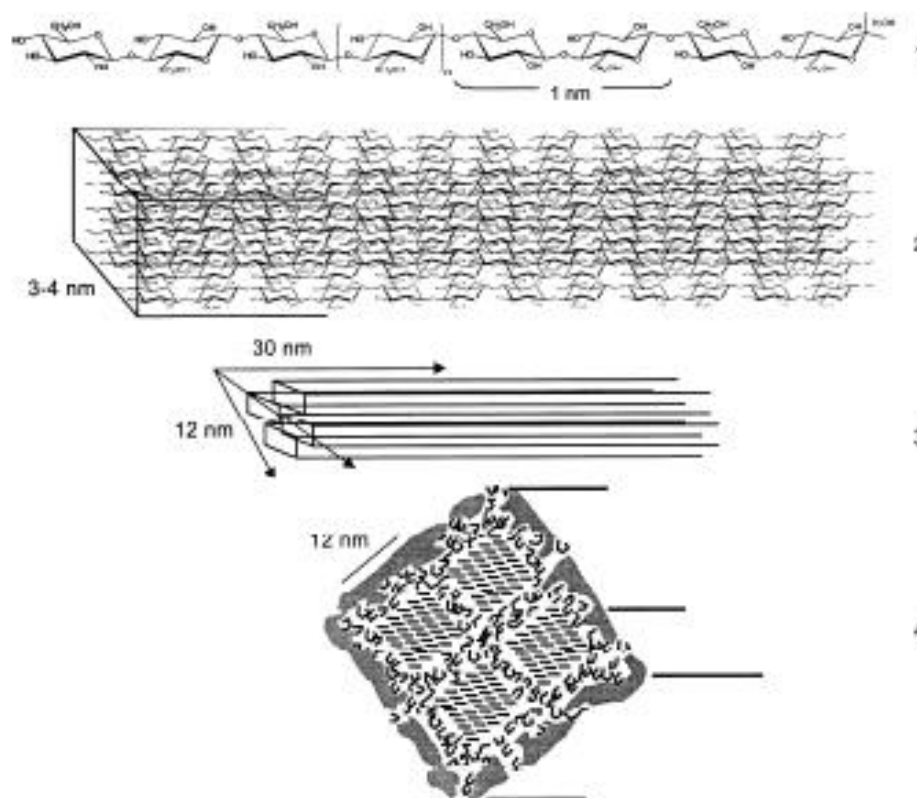
**Figura 7:** Parte central da molécula de celulose

Fonte: FENGEL e WEGENER (1989)

As moléculas de celulose tendem a formar ligações hidrogênio intramoleculares (entre unidades de glicose da mesma molécula) e intermoleculares (entre unidades de glicose de moléculas adjacentes). O primeiro tipo de interação é responsável por certa rigidez das cadeias unitárias e o segundo pela formação da fibra vegetal (FENGEL e WEGENER, 1989).

A principal vantagem da celulose quando comparada com derivados de petróleo, por exemplo, é sua grande disponibilidade, uma vez que ela provém de matéria-prima renovável.

De acordo com Fengel e Wegner (1989), diversas fibrilas elementares, com uma espessura média de 3,5 nm, se associam uma com as outras formando cristalitos de celulose cujas dimensões dependem da origem e do tratamento da amostra. Posteriormente, quatro desses agregados cristalinos se unem por meio de uma monocamada de hemiceluloses, gerando estruturas de 25 nm que são envolvidas por uma matriz amorfa de hemicelulose e protolignina. O composto natural que resulta dessa associação é chamado de microfibrila de celulose (Figura 8).



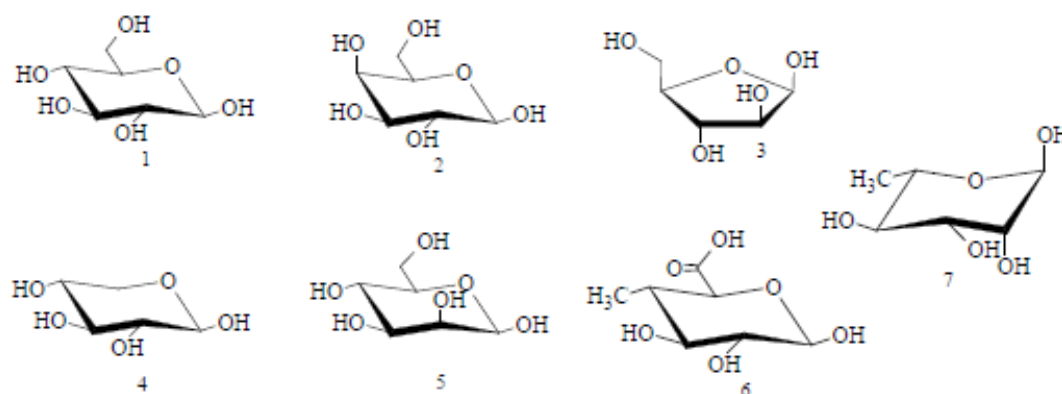
**Figura 8** - Associação dos componentes da parede celular. (1) Cadeia linear da celulose, com a indicação de sua unidade estrutural; (2) arranjo das cadeias na fibrila elementar; (3) Cristalito; (4) seção transversal da microfibrila

Fonte: RAMOS (2003)

### 2.4.2 Hemicelulose

As hemiceluloses são genericamente caracterizadas como uma família de polissacarídeos presentes na parede celular vegetal. O termo hemicelulose foi primeiramente utilizado para designar polissacarídeos precursores da celulose. Com a evolução do conhecimento, constatou-se que isso não era verdadeiro e que as rotas envolvidas na síntese desses dois polissacarídeos são distintas. Outra alternativa foi a de considerar as hemiceluloses como polissacarídeos isolados da madeira em meio alcalino, mas essa hipótese acabou apresentando pouca sustentação porque a água quente também pode solubilizar polissacarídeos que não correspondem quimicamente às hemiceluloses. Atualmente, as hemiceluloses são genericamente definidas como polissacarídeos não amiláceos e não celulósicos que podem ser extraídos da parede celular dos vegetais superiores (FENGEL E WEGENER, 1989).

As hemiceluloses são formadas por uma ampla variedade de blocos construtivos incluindo pentoses (por exemplo, xilose, ramnose e arabinose), hexoses (por exemplo, glucose, manose e galactose) e ácidos urônicos (são exemplos os ácidos 4-O-metilglucurônico e galacturônico) (Figura 9). São estruturalmente mais parecidas com a celulose do que com a lignina e são depositadas na parede celular em um estágio anterior a lignificação. Sua estrutura apresenta ramificações e cadeias laterais que interagem facilmente com a celulose, dando estabilidade e flexibilidade ao agregado (RAMOS, 2003).

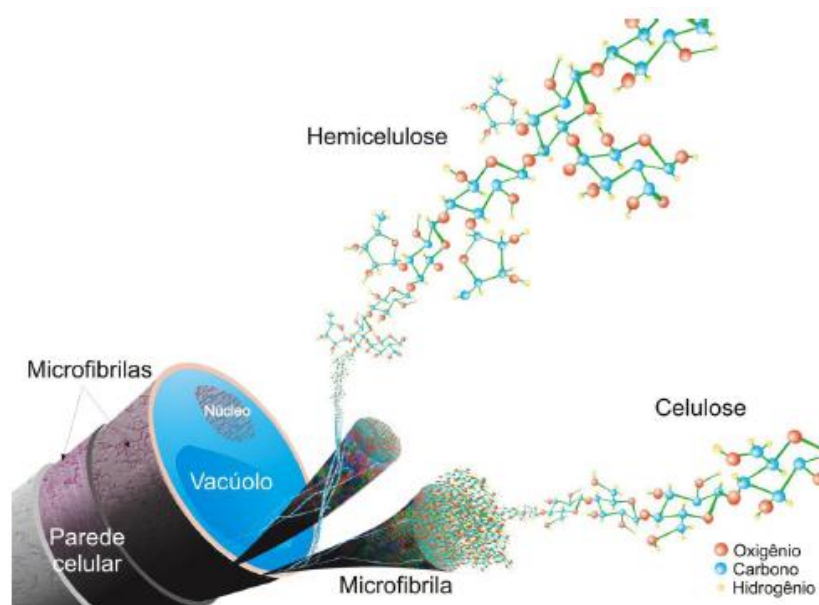


**Figura 9** – Monossacarídeos constituintes das hemiceluloses. D-glucose (1), D-galactose (2), L-arabinose (3), D-xilose (4), D-manose (5), 4-O-metil-D-Glucurônico (6) e L-ramnose (7)

Fonte: SJOSTROM (1992)

As hemiceluloses se encontram no bagaço de cana-de-açúcar na proporção de 25 a 27% e quando sofrem hidrólise ácida podem ser decompostas em xilose, arabinose, ácido urônico e furfural. O principal açúcar encontrado nas hemiceluloses do bagaço é a xilose (FENGEL e WEGENER, 1989).

Seis a oito moléculas de celulose se alinham paralelamente para formar uma fibra onde ocorre a completa expulsão das moléculas de água, tornando a microfibrila extremamente longa e resistente. Sobre a superfície das microfibrilas, aderem-se as hemiceluloses (polímeros heterogêneos que são classificados de acordo com a composição em monossacarídeos) que cobrem a celulose formando o chamado domínio celulose-hemicelulose da parede celular (Figura 10).



**Figura 10** - Esquema da parede celular vegetal. Representa a estrutura de uma microfibrila, com 36 moléculas de celulose depositadas umas sobre as outras. Uma das moléculas de hemicelulose (o glucuronoarabinoxilano) é mostrada em detalhe na parte de cima da figura

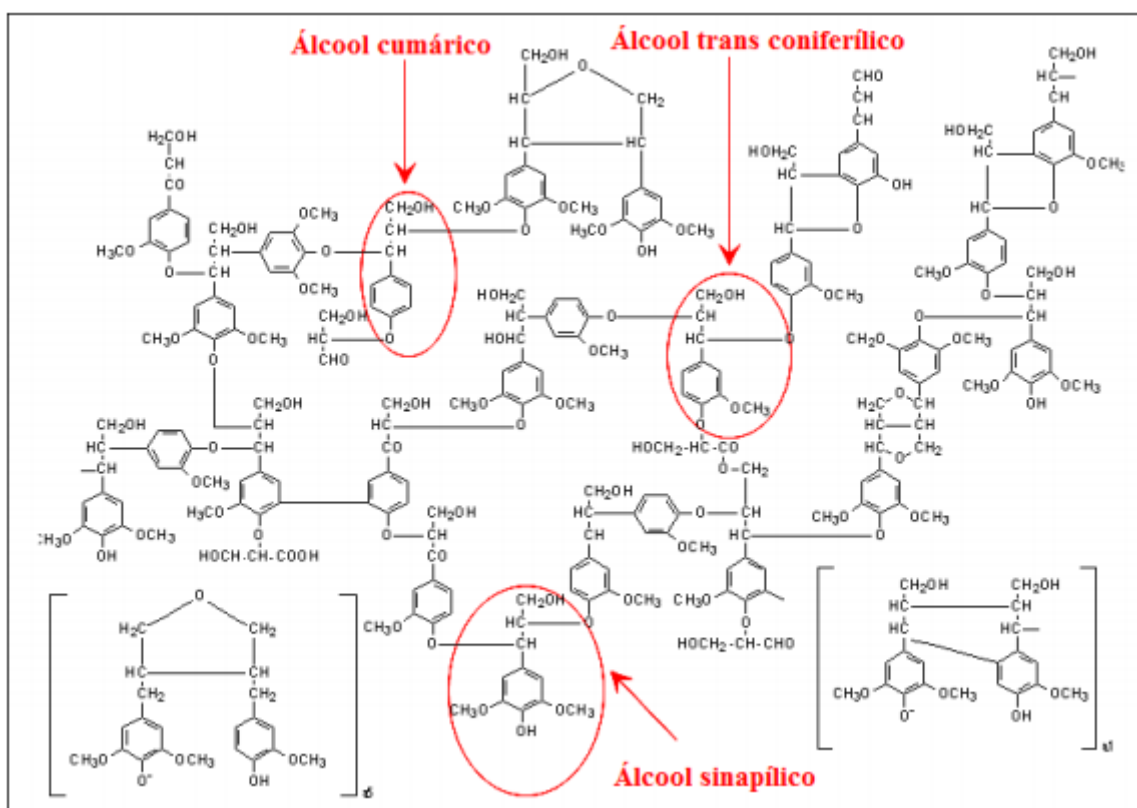
Fonte: BUCKERIDGE, et al.(2008)

As hemiceluloses impedem que as moléculas de celulose de fibras paralelas colapsem entre si, mas também permitem a interação fraca entre uma fibra e outra, formando uma rede. O domínio celulose-hemicelulose fica imerso em um domínio formado por pectinas, que são açúcares altamente ramificados que dentre outras funções, determinam a porosidade da parede e sinalizam a presença de organismos patogênicos e insetos (BUCKERIDGE, et al. 2008).

### 2.4.3 Lignina

A lignina está presente na madeira em cerca de 20% a 30%, agindo como material adesivo, como agente de enrijecimento e como barreira contra degradação enzimática e/ou microbiana da parede celular (FENGEL E WEGENER, 1989).

A lignina é uma macromolécula amorfa com estrutura tridimensional muito complexa baseada em três precursores monoméricos: os alcoóis coniferílico, sinapílico e p-cumarílico (Figura 11). A proporção desses monômeros varia entre diferentes espécies de plantas e estas diferenças podem ser utilizadas com propósitos taxonômicos. Dependendo do grau de metoxilação, o grupo aromático e o p-hidroxibenzil (derivado do álcool p-cumarílico), guaiacil (derivado do álcool coniferílico) ou siringil (derivado do álcool sinapílico). A propriedade física mais importante dessa macromolécula orgânica é a sua rigidez, que não só confere estrutura ao tecido da planta, mas, também, previne o colapso de elementos condutores de água.



**Figura 11:** Representação da estrutura química de um tipo de lignina  
Fonte: FENGEL E WEGENER (1989); adaptado pela Autora

As ligninas de coníferas são quase que exclusivamente compostas por resíduos derivados do álcool coniferílico (lignina do tipo G), enquanto as ligninas das folhosas contêm resíduos derivados dos álcoois coniferílico e sinapílico (lignina tipo GS). Em contraste, as

ligninas derivadas de gramíneas contem os três precursores básicos citados acima (lignina tipo HGS). Como consequência, as ligninas das folhosas possuem alta quantidade de grupos metoxílicos, são menos condensadas e mais suscetíveis a conversão química do que as ligninas derivadas das coníferas (RAMOS, 2003).

A composição elementar da lignina é 53-65% de carbono, 6-9% de hidrogênio e 26-36% de oxigênio. Quando não modificada a lignina não apresenta enxofre, fósforo, nitrogênio ou outros elementos. Os grupos funcionais mais importantes encontrados em ligninas são:

a) Grupos metoxila (-OCH<sub>3</sub>): são os grupos mais característicos da lignina, variando de 11 a 16% nas coníferas e de 15 a 22% nas folhosas;

b) Grupos hidroxila (-OH): são de diferentes naturezas: fenólicas e alifáticas (primárias, secundárias e terciárias). A taxa total deste grupo é por volta de 10%, no entanto as hidroxilas fenólicas representam de 2 a 6%, dependendo do grau de degradação;

c) Grupos carbonilas (R-CO-R) e grupos carboxílicos (-COOH);

d) Grupos éteres (R-O-R): podem ser aromáticos ou alifáticos;

e) Grupos ésteres (-COO-R): ocorrem em algumas folhosas;

f) Insaturações (C=C): duplas ligações.

A identificação de grupos funcionais, como hidroxilas alifáticas e aromáticas, grupos éter, grupos carbonila e metoxila, para a elucidação da estrutura da lignina, pode ser feita por vários métodos químicos e físicos, sendo o de espectroscopia no infravermelho, o método utilizado para a identificação dos grupos funcionais correspondentes à lignina no presente trabalho.

## 2.5 Mecanização da colheita de cana crua (sem queima prévia)

De acordo com Ripoli (2004), a colheita mecanizada, sem a queima do canavial, é cada vez mais crescente no setor sucroalcooleiro, diminuindo a quantidade de terra contida nesta matéria prima e aumentando a quantidade de resíduo vegetal, trazendo benefícios ao meio ambiente e à saúde do ser humano.

O avanço tecnológico permitirá que a maior parte da colheita da cana-de-açúcar seja feita por meio de máquinas. A colheita mecanizada pode ser economicamente interessante, visto que há um melhor controle das atividades de corte combinada com o ritmo de trabalho da indústria. Há também como vantagem da colheita mecanizada uma padronização, pré-processamento da matéria prima e maior segurança no processo produtivo,

sendo que os problemas ambientais podem ser minimizados pela não queima da cana-de-açúcar (TOLENTINO, 2007).

A mudança no tipo de corte da cana-de-açúcar, de manual para mecânico, não é apenas uma mera substituição de uma técnica por outra. Costa Neto (2006) adverte que a mecanização da colheita de cana é inevitável e que uma colhedora de cana equivale a 100 cortadores, podendo chegar a um rendimento de 15 a 20 t h<sup>-1</sup> contra 5 a 6 t dia<sup>-1</sup> por pessoa.

As usinas estão com dificuldades para encontrar mão de obra qualificada para o corte manual da cana-de-açúcar. Tanto a escassez de mão de obra como o aumento de seu custo, levam as usinas a substituir trabalho humano pelo trabalho mecanizado (ROCHA, 2007).

A mecanização da colheita não busca apenas a redução de custos, mas também atender à legislação e, principalmente, uma solução estratégica para a escassez de mão de obra.

De acordo com Paoliello (2006), países importadores impõem inúmeras barreiras aos produtos obtidos sem que sejam observadas condutas ambientalmente aceitáveis, portanto, a suspensão da queima da cana-de-açúcar e implantação sistema de corte de cana-de-açúcar crua está ocorrendo não apenas pela existência de dispositivos legais ou ações movidas pelo ministério público, por meio das curadorias de meio ambiente, mas, principalmente, por exigência mercadológica visto que são inúmeras as barreiras impostas por países importadores aos produtos obtidos sem que sejam observadas condutas ambientalmente aceitáveis.

Para Lanzotti (2000), a queima da cana-de-açúcar apresenta vantagens e desvantagens. Como vantagem, facilita e barateia o corte manual e reduz os custos de carregamento e de transporte. Facilita também o acesso ao canavial por parte dos cortadores, os protegendo. Na usina ocorre um aumento da eficiência da moenda, que não necessita parar seu funcionamento para retirada do palhiço. Porém, há também desvantagens da queima da cana-de-açúcar pré-colheita, como a perda da energia que o palhiço contém; compactação do solo devido ao aumento da temperatura e diminuição da umidade; emissão de poluentes na atmosfera, afetando as áreas rurais adjacentes e os centros urbanos mais próximos e gerando grande impacto no ambiente e na saúde humana; aumento da sujeira doméstica e do consumo de água tratada; dano às redes de transmissão de energia, causando eventuais interrupções no fornecimento de energia elétrica; aumento de acidentes automobilísticos, já que a fumaça diminui a visibilidade dos motoristas.



A característica marcante do sistema de colheita de cana crua é a grande quantidade de resíduos (palhiço), restantes sobre o solo após a colheita. Existem diversos benefícios do palhiço deixado no campo, segundo Hassuani et al. (2005): proteção do solo contra a erosão, menor temperatura do solo devido a proteção da radiação solar, aumento da atividade biológica do solo, maior taxa de infiltração de água no solo, redução da evaporação e consequente aumento na disponibilidade de água, controle de plantas daninhas e redução e/ou eliminação do uso de herbicidas. Ainda, de acordo com Hassuani et al. (2005), há também alguns problemas relacionados à presença do palhiço no campo: riscos de incêndio durante e após a colheita, problemas na realização do cultivo e adubação das soqueiras, retardamento ou falhas na brotação causando redução da produtividade quando a temperatura do solo é baixa e/ou a umidade é alta, elevação da população de pragas devido ao cobertor de palhiço, onde elas se abrigam e se multiplicam.

Furlani Neto et al. (1997) comentam que a colheita da cana-de-açúcar sem a queima reduz a capacidade das colhedoras em cerca de 15,60%, mas que a qualidade tecnológica da matéria prima sem queima foi superior em brix, pol e fibra o que representa um acréscimo de 0,54% na qualidade de PCC – Pol da cana corrigida, ou seja, 601,4 kg de pol por hectare.

Para Michelazzo & Braunbeck (2008), a mecanização da colheita de cana-de-açúcar será considerada como certa, sendo apenas uma questão de tempo. Isto fará com que o palhiço seja disponível para algum fim que não a queima no campo. A geração de energia por meio do palhiço será inevitável, visto as questões ambientais, a grande disponibilidade desta biomassa, o seu potencial energético e a escassez das fontes energéticas. Uma vez que conscientemente há convicção de que mais do que nunca, a geração de energia oriunda de palhiço é viável, ecologicamente. Para utilização racional de resíduos é necessário o aprofundamento de estudos nas questões inerentes ao manejo dos mesmos. O excedente energético produzido poderá ser negociado para a concessionária responsável pela distribuição de energia na região.

## **2.6 Caracterização da biomassa como combustível e processos de combustão**

O termo biomassa engloba a matéria vegetal gerada por meio da fotossíntese e os seus derivados, tais como: resíduos florestais e agrícolas, resíduos animais e a matéria orgânica contida nos resíduos industriais, domésticos, municipais etc. Estes materiais contêm energia química provida da transformação energética da radiação solar. Essa energia química

pode ser liberada diretamente por combustão, ou convertida por meio de algum processo em outras fontes energéticas mais adequadas, para um fim qualquer desejado, tal como o álcool e o carvão vegetal (LORA, 2003).

A energia proveniente da biomassa pode ser convertida em eletricidade, combustível ou calor. Certamente o primeiro combustível utilizado pela humanidade foi biomassa. Com a descoberta dos combustíveis fósseis seu uso ficou mais restrito. Com a redução constante das reservas de combustíveis fósseis, sendo estes não renováveis, aliado à grande poluição causada com a queima dos mesmos, o uso da biomassa como combustível volta a ganhar força (BARROS, 2007).

Atualmente, com a inserção de novas tecnologias aplicadas ao uso sustentável da bioenergia, esta apresenta uma crescente recuperação no cenário energético mundial. As projeções para o fim deste século é que esse aumento da demanda mundial bioenergética seja contínuo, podendo representar até 20% de toda a energia utilizada no planeta (GOLDEMBERG, 2009).

De acordo com Cortez et al. (2008), os combustíveis e seu processo de combustão são campos importantes na área tecnológica, atualmente. O processo de combustão provê a maior parte da energia utilizada hoje no mundo, como por exemplo, em aquecimento, transporte e geração de energia elétrica (JOSÉ, 2004). O crescimento na oferta de energia calorífica, obtida por meio dos combustíveis, vem tornando possível a grande atividade industrial atual (HILSDORF et al., 2004).

Combustível pode ser definido, de acordo com Hilsdorf et al. (2004), como qualquer substância que ao reagir quimicamente com outra libera energia na forma de calor. Inúmeras substâncias possuem esta propriedade, especialmente ao reagir com oxigênio, porém, poucas são as substâncias consideradas como combustíveis industrialmente importantes. Para ser considerado um combustível industrial, o material deve ser carbonáceo, disponível, desprender grande quantidade de calor quando queimado ao ar atmosférico e o calor produzido deve ser controlável sem esforço (HILSDORF et al., 2004).

A maior parte dos combustíveis tem carbono (C) e hidrogênio (H) como elementos principais da sua composição. Além desses, o oxigênio (O), nitrogênio (N) e enxofre (S) também podem estar presentes. Os elementos C, H e S determinam a qualidade do combustível, ou seja, combustíveis que possuem maior quantidade desses elementos irão liberar mais energia (calor) durante a queima; ao contrário, o oxigênio é indesejável, pois é considerado como já combinado com hidrogênio, diminuindo a quantidade unitária de calor

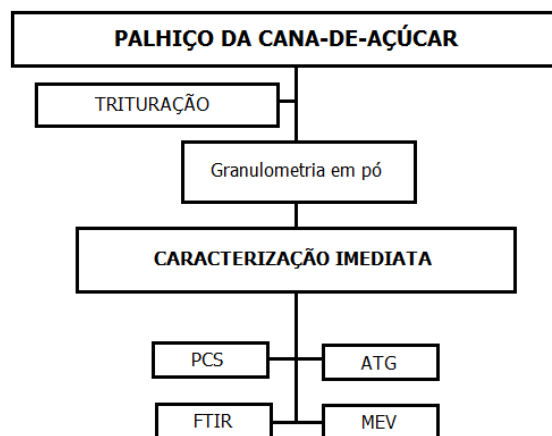
desprendida. O nitrogênio não pode reagir com oxigênio liberando calor, por isso, no campo da combustão industrial, baixas quantidades de nitrogênio são desejáveis (HILSDORF et al., 2004).

Durante as reações envolvidas na combustão, substâncias gasosas são produzidas, como CO<sub>2</sub> e SO<sub>2</sub>, e são liberadas juntamente com vapor de água, sendo chamadas de “gases residuais” da combustão. Para combustíveis sólidos há além dos gases, os resíduos sólidos que compreendem as cinzas (HILSDORF et al., 2004).

## 2.7 Caracterização físico-química da biomassa

Segundo Quirino et al. (2004), o conhecimento da composição química da biomassa é um fator importante para a avaliação do rendimento energético de um processo de combustão da madeira e de outros materiais lignocelulósicos, que dependem também da sua composição química. Deve-se ressaltar que os teores de materiais voláteis, cinzas e carbono fixo variam com a espécie, sendo eles de grande importância para a escolha adequada da biomassa a ser utilizada para fins energéticos, por apresentarem comportamento específico durante a combustão do material.

Os métodos de análises utilizadas para a caracterização do produto sólido da pirólise da biomassa estão representados no fluxograma abaixo (Figura 12) e detalhadas a seguir.



**Figura 12** – Fluxograma de representando as análises e os processos para a caracterização da biomassa

Fonte: Georges (2011); adaptado pela Autora

É importante o conhecimento das propriedades dos sólidos particulados para o estudo de operações unitárias como o peneiramento, a mistura, o armazenamento, as separações mecânicas, entre outros.

Segundo McCabe, et al. (1976), é necessário conhecer as características dos sólidos em forma de partículas para projetar os processos e os equipamentos em que intervêm tais sólidos.

O método mais prático de se efetuar a separação de partículas em frações consiste em passar o material em uma série de peneiras com malhas progressivamente menores, em que cada uma das quais retém uma parte da amostra. Esta operação, conhecida como análise granulométrica, é aplicável às partículas de diâmetros maiores que 70 $\mu$ m (GOMIDE, 1982). Entende-se por peneiramento, portanto, como sendo a separação de um material em duas ou mais classes, estando estas limitadas uma superior e outra inferiormente.

Cortez et al. (2008) expõem a potencialidade de um combustível – análise, se o mesmo é aproveitado em sua total capacidade pode ser avaliada pelo conhecimento preliminar de suas propriedades térmicas e químicas fundamentais, sendo estas o potencial calórico, a composição elementar e a composição imediata.

A composição química elementar consiste no teor em porcentagem de massa dos elementos essenciais que compõe a biomassa: carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N), umidade (U) e material residual – cinzas - (A). A composição química imediata corresponde ao conteúdo porcentual em massa de carbono fixo (CF), voláteis (MV), umidade (U) e cinzas (CZ). O teor de umidade da amostra deve ser determinado pela secagem da mesma, anteriormente às análises de composição elementar e imediata (CORTEZ et al., 2008).

De acordo com Rodrigues et al. (2002), ao queimar, todo combustível libera uma quantidade de energia (calor), sendo esta quantidade proporcional a massa do material queimado. A medida do calor obtido pela queima completa do combustível pode ser definida como poder calorífico (PC).

O poder calorífico pode ser determinado sob duas bases distintas: poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI). Perez et al. (2008) e Rodrigues (2002) definiram o poder calorífico superior como sendo a quantidade de energia contida no combustível, considerando que a água gerada na combustão mais aquela já contida no combustível estão no estado líquido. Para o poder calorífico inferior a água gerada na combustão está no estado vapor.

O poder calorífico superior é comumente determinado experimentalmente pela utilização de um calorímetro (SANTIAGO, 2007). A amostra de combustível é queimada em sistema fechado, com oxigênio puro, a volume constante e o calor gerado na combustão é

transferido para água do calorímetro (FERREIRA, 2006). Sendo um sistema fechado, a possível existência de água no combustível não acarreta em perda de calor, pois a água é evaporada e novamente condensada. Em aplicações industriais o poder calorífico inferior é o que representa melhor as condições de combustão, pois, em um sistema aberto a água contida no combustível passa do estado líquido para o vapor, escapando do sistema, que perde energia na forma de calor (ARONI, 2005). O poder calorífico inferior é obtido descontando-se do poder calorífico superior a fração de massa de água do combustível.

Alto poder calorífico é obtido quando o combustível apresenta elevada quantidade de carbono e hidrogênio, no entanto, o oxigênio possui efeito inverso, ou seja, um combustível com maior quantidade de oxigênio tende a possuir menor poder calorífico (PEREIRA Jr., 2001).

Estudando o potencial energético de resíduos de colheita de cana crua, Ripoli, et al (1991) determinaram, para cinco variedades de cana-de-açúcar, de segundo corte, dados (médios) apresentados na Tabela 6.

**Tabela 6** – Valores médios de carbono (%), hidrogênio (%), umidade (%), poderes caloríficos superior, inferior e útil ( $\text{kcal kg}^{-1}$ )

VARIÁVEIS	PONTEIRO	FOLHAS VERDES	PALHAS
<b>Carbono (%)</b>	42,11	43,41	41,76
<b>Hidrogênio (%)</b>	6,25	6,38	6,26
<b>Umidade (%)</b>	76,79	66,21	8,81
<b>Poder Calorífico Superior (<math>\text{kcal kg}^{-1}</math>)</b>	4318,70	4400,60	4339,00
<b>Poder Calorífico Inferior (<math>\text{kcal kg}^{-1}</math>)</b>	3981,40	4095,60	4001,40
<b>Poder Calorífico Útil (<math>\text{kcal kg}^{-1}</math>)</b>	888,00	1344,80	3609,00

Fonte: Ripoli, et al (1991)

Segundo Koopmans & Koppejan (1997), os resíduos constituem a maior parte da produção total anual de biomassa e são uma importante fonte de energia tanto para uso doméstico como para propósitos industriais.

Segundo Earl (1975), é importante que o teor de umidade de material lignocelulósico a ser usado como combustível seja reduzido, diminuindo assim o manejo e o custo de transporte, agregando valor ao combustível. Além disso, quanto maior o conteúdo de umidade, menor é o seu poder de combustão, devido ao processo de evaporação da umidade, o qual absorve energia em combustão (CUNHA et al, 1989).

A análise imediata mostra a composição para o bagaço e palhiço, conforme a Tabela 7.

**Tabela 7** – Composição do bagaço e palhiço pela análise imediata

Composição	Bagaço(%)	Palhiço (%)		
		Folhas verdes	Folhas secas	Ponteiros
<b>Carbono fixo</b>	13	11,7	10,8	11,6
<b>Voláteis</b>	83	85,2	85,8	84,1
<b>Cinzas</b>	4	3,2	3,3	4,3

Fonte: Neto e Ramon (2002)

O bagaço e o palhiço apresentam um elevado teor de voláteis, assim, mesmo com alto teor de umidade, estes resíduos apresentam boa ignição. Cerca de 80% do poder calorífico do bagaço é representado pelos materiais voláteis e consomem 74% do ar de combustão (PELLEGRINI, 2002).

O material volátil é a parte do combustível que se separa na forma de gases quando o combustível é submetido a um teste padrão de aquecimento. Compõe-se de gases combustíveis (como metano, monóxido de carbono, hidrogênio) e de gases não combustíveis. Como a quantidade de material volátil indica o combustível gasoso presente no combustível, ela afeta a mecânica de acendimento, o volume da fornalha e o arranjo das superfícies de troca térmica (HENRÍQUEZ, s.d).

Já os materiais minerais (cinzas) são compostos principalmente de carbonatos, sulfatos e fosfatos de sílica e metais do primeiro e segundo grupo da Tabela Periódica dos Elementos (Ca, Mg, Na, K), de acordo com Garcia-Perez (2006). O teor de cinzas é indesejável durante a termoconversão da biomassa, já que formam parte do carvão, diminuindo o poder calorífico superior e o carbono fixo dos produtos.

O carbono fixo representa, basicamente, a concentração de carbono, apesar de conter também outros elementos como enxofre, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio. É um importante parâmetro utilizado para todos os cálculos de balanço energético e na caracterização de carvões, por exemplo. Os teores de carbono fixo, expressos em percentuais, são sempre valores calculados. Segundo a norma brasileira NBR 8112 - Carvão Vegetal – Análise Imediata, recomenda-se o cálculo do teor de carbono fixo a partir do teor de cinzas e de materiais voláteis. O carbono fixo, portanto, é o resíduo combustível deixado após a liberação da matéria volátil e consiste principalmente em carbono, embora contenha ainda alguns elementos voláteis não liberados ( $O_2$ ,  $H_2$ ,  $N_2$ , S) (HENRÍQUEZ, s.d.).

Ainda em relação à análise imediata, observa-se o trabalho realizado pela COPERSUCAR (03, 1998), citado por Neto (2002), com resultados parciais para 33 amostras,

apresentados na Tabela 8, considerando três variedades distintas de cana (RB72454, SP791011 e SP 801842) produzidas com e sem vinhoto e primeiro corte, 18 meses após o plantio, seguido de cortes com intervalos de 12 meses.

**Tabela 8** – Análise imediata e poder calorífico superior da biomassa de cana-de açúcar

<b>Análise Imediata (% m/m)</b>					
Material	Cinza*	Voláteis*	Carbono Fixo*	Teor de Umidade	PCS (MJ kg <sup>-1</sup> )*
<b>Folhas secas</b>	3,3	85,8	10,8	11,3	17,36
<b>Folhas verdes</b>	3,2	85,2	11,7	66,7	17,38
<b>Ponteiros</b>	4,3	84,1	11,6	82,5	16,27

\*Base seca

Fonte: COPERSUCAR 03, (1998)

Pelos resultados apresentados na Tabela 8, observa-se que há grande variação no teor de umidade entre as componentes folhas secas, verdes e ponteiros e os valores correspondentes aos teores de cinza, voláteis e carbono fixo variam pouco, assim como para o poder calorífico. Dessa forma, nota-se a importância de se trabalhar com material isento de altos teores de umidade para não comprometer a eficiência energética em relação aos resultados de poder calorífico.

## 2.8 Caracterização complementar da biomassa

Para contribuir com o melhor conhecimento da biomassa foi proposto trabalhar com análises complementares como a análise termogravimétrica (TGA), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia no infravermelho (FTIR), a título de complementação da caracterização da pesquisa.

A análise termogravimétrica (do inglês, Thermogravimetric Analysis, TGA), é uma técnica muito utilizada para análise do processo de pirólise de materiais, da qual se obtém um estudo do comportamento térmico de materiais carbonosos, bem como da cinética das reações de decomposição térmica de diferentes combustíveis sólidos. A análise das características da combustão permite obter um "perfil de queima" do material, definido como a representação da perda de massa em função da temperatura, em atmosfera oxidante (MANO, 1991).

A termogravimetria pode ser usada para investigar a cinética de reações de pirólise ou combustão de muitos materiais, inclusive polímeros (HAINES, 1995).

De acordo com Chen e Kuo (2010), os eventos térmicos dos componentes lignocelulósicos apresentam-se em faixas de temperaturas características. Em geral seus maiores constituintes são celulose, hemicelulose e lignina. A decomposição térmica das estruturas lignocelulósicas pode ser identificada e quantificada por meio das curvas de TG/DTG.

De acordo com Chen e Kuo (2010) a perda de massa da hemicelulose ocorre em temperaturas mais altas entre 150 e 350°C, na celulose, sua decomposição está entre as faixas de 275 a 350°C e a lignina é caracterizada pela decomposição gradual em temperaturas entre 250 e 500°C.

De acordo com Griouli et. al. (2006) e Ouajai e Shanks (2005), não há uma divisão distinta da degradação térmica de cada elemento (hemicelulose, celulose e lignina) dos materiais lignocelulósicos, visto que cada um destes elementos está ligado quimicamente. Contudo, a estabilidade térmica leva em consideração o comportamento e as características individuais de cada elemento. A lignina, por ser um dos componentes mais estáveis, degrada entre 250 e 500 °C com maior intensidade entre as faixas de 310 a 420°C. Assim, sua curva de TG/DTG é mais suave se comparado com a celulose que se degrada termicamente mais rápido em temperaturas entre 325 a 375 °C.

A DTG é a derivada primeira da curva TG. Nesta, os "degraus" correspondentes às variações de massa da curva TG são substituídos por picos que determinam áreas proporcionais às variações de massa, tornando as informações, visualmente, mais acessíveis e com melhor resolução. Apesar de a curva DTG trazer as mesmas informações que a TG, ela permite: a partir da altura do pico, a qualquer temperatura, obter a razão de Dm (variação de massa) naquela temperatura; obter as temperaturas correspondentes ao início e final da reação com maior exatidão e, também, na maioria das vezes, calcular a Dm no caso de sobreposição de reações (Wendlandt, 1986). No entanto, em caso de reações de decomposição térmica que ocorrem lenta e gradativamente a curva DTG não mostrará um pico, mas se aproximará de um patamar dificultando a avaliação dos eventos térmicos, uma vez que a derivada de uma constante é nula.

A espectroscopia de absorção na região do infravermelho é uma técnica instrumental rápida, que pode evidenciar a presença de alguns grupos funcionais. A radiação infravermelha provoca o aumento da amplitude de vibração de ligações covalentes entre átomos e grupos de átomos de decomposição orgânica. Como os grupos funcionais de moléculas inorgânicas incluem átomos unidos por arranjos específicos, a absorção de energia



infravermelha por uma molécula orgânica ocorrerá de modo característico dos tipos de ligações e de átomos presentes nos grupos funcionais específicos de cada molécula. Estas vibrações são quantizadas e, enquanto ocorrem, os componentes absorvem a energia do Infravermelho em regiões particulares da porção do espectro. Um espectro infravermelho produz passando a radiação infravermelha um feixe através da amostra e compara-se a radiação transmitida pela amostra com o feixe de referência. Qualquer frequência absorvida pela amostra será evidenciada pela diferença entre os feixes (SOLOMONS & FRYHLE, 2001).

O espectro obtido registra os resultados sob a forma de um gráfico. Tanto o comprimento de ondas ( $\lambda$ ) quanto o número de onda ( $\nu$ ) são usados para medir a posição de uma determinada absorção no infravermelho. A unidade do comprimento de onda é o micrão ( $\mu$ ), igual a  $10^{-3}$  mm. Os números de onda são o inverso dos comprimentos de onda e apresentam como unidade o  $\text{cm}^{-1}$ . As intensidades das bandas podem ser expressas como transmitância (T) ou absorbância (A). A transmitância é a razão entre a energia radiante transmitida por uma amostra e a energia radiante que nela incide. A absorbância é o logaritmo na base 10 do recíproco da transmitância, isto é,  $A = \log_{10}(1/T)$  (BICCA, 1994).

Devido a sua natureza aromática, a lignina absorve fortemente na região do ultravioleta, sendo os espectros de diferentes preparações geralmente bastante semelhantes. Os espectros de UV-visível de todas as amostras de lignina apresentam além da banda de extinção de alcanos por volta de 207 nm, um pico ao redor de 280 nm, típico de estruturas aromáticas fenólicas presentes na lignina, que possuem substituintes metoxila, além de uma cadeia carbônica em posição *para* ao grupo OH fenólico. Essa banda pode também estar relacionada a estruturas do tipo  $\alpha$ -carbonil fenólicas e o aumento de sua intensidade está relacionado ao aumento de oxidação da lignina, já que possui coeficiente de extinção 3 a 4 vezes maior que os da estrutura sem carbonila, com a utilização de compostos modelo. Parte-se da premissa que este comportamento possa ser aplicado também à molécula de lignina e que ocorra a incorporação de grupos oxigenados, como C=O, preservando a estrutura da lignina. O pico a 280 nm é geralmente utilizado para avaliar a concentração de ligninas em solução (GOLDSCHMIDT, 1971).

O espectro de ligninas no infravermelho apresenta, normalmente, como bandas principais, as provenientes dos grupos hidroxilas (em  $3400 \text{ cm}^{-1}$ ), de ligações C-H alifáticas (em  $2900 \text{ cm}^{-1}$ ), de ligações C-C aromáticas (em  $1600$  e  $1510 \text{ cm}^{-1}$ ) e de grupos carbonilas (em  $1668 \text{ cm}^{-1}$ ) (ASSUMPÇÃO, et al. 1988).

A microscopia eletrônica de varredura é utilizada em várias áreas do conhecimento. O uso desta técnica vem se tornando mais frequente por fornecer informações de detalhe, com aumentos de até 300.000 vezes. A imagem eletrônica de varredura é formada pela incidência de um feixe de elétrons sob condições de vácuo (DUARTE, et al. 2003).

A imagem pode ser obtida por meio de diferentes tipos de sinais que são produzidos pela da interação elétron-matéria. Para cada tipo de radiação empregada podem-se obter diferentes informações com relação à superfície da amostra, por exemplo, morfologia, fases, composição química, dentre outros (TOMIYAMA, 2003).

O princípio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) consiste em utilizar um feixe de elétrons de pequeno diâmetro para explorar a superfície da amostra, ponto a ponto, por linhas sucessivas e transmitir o sinal do detector a uma tela catódica, cuja varredura está perfeitamente sincronizada com aquela do feixe incidente. Por um sistema de bobinas de deflexão, o feixe pode ser guiado de modo a varrer a superfície da amostra segundo uma malha retangular. O sinal de imagem resulta da interação do feixe incidente com a superfície da amostra. O sinal recolhido pelo detector é utilizado para modular o brilho do monitor, permitindo a observação. A maioria dos instrumentos usa como fonte de elétrons um filamento de tungstênio (W) aquecido, operando numa faixa de tensões de aceleração de 1 a 50 kV. O feixe é acelerado pela alta tensão criada entre o filamento e o ânodo. Ele é, em seguida, focalizado sobre a amostra por uma série de três lentes eletromagnéticas com um spot menor que 4 nm. O feixe interagindo com a amostra produz elétrons e fótons que podem ser coletadas por detectores adequados e convertidas em um sinal de vídeo. Materiais não condutivos observados no MEV são tipicamente recobertos por uma fina camada de metal para minimizar o acúmulo de carga negativa do feixe atômico (DEDAVID, et al. 2007).

## **2.9 Cogeração de energia no setor sucroalcooleiro**

O Brasil domina a tecnologia de produção de álcool que é considerada uma fonte energética alternativa de ciclo limpo (KOBBLITZ, 2004). Possui terras agricultáveis a serem cultivadas para a geração de combustível alternativo, visando a atender a demanda mundial e o comércio de crédito de carbono, de acordo com Alcoobras (2003), como “commodity” ambiental.

O setor energético depende do setor sucroalcooleiro para crescer e este, por sua vez, vem sendo analisado por investidores do mundo inteiro em busca de novas tecnologias para produção de biocombustíveis e energia gerada por fontes renováveis (DANTAS, 2010).

O cultivo da cana-de-açúcar ligado ao uso da biomassa dela proveniente para fins energéticos permitem ao Brasil ocupar posição estratégica privilegiada no cenário nacional. A biomassa residual resultante do processo industrial das usinas sucroalcooleiras, em grande quantidade, integra-se favoravelmente ao processo de cogeração, que constitui-se da produção simultânea e sequenciada de duas ou mais formas de energia a partir de um único combustível (COGEN, 2008).

A cogeração é uma prática cada vez mais tradicional do setor sucroalcooleiro, sendo aplicada em várias partes do mundo. No Brasil, desde a instituição do Programa Brasileiro do Álcool (Proálcool), parte significativa das usinas sucroalcooleiras tornou-se autossuficiente em termos energéticos. Elas passaram a gerar toda a energia necessária para suprir sua demanda utilizando cada vez mais o bagaço da cana-de-açúcar, que responde por 30% do conteúdo energético da cana moída, chegando a render excedentes que podem ser vendidos à rede (BRIGHENTI, 2003).

Existem diversas definições de cogeração. O Plano Decenal de Expansão 2000/2009 apresenta a seguinte definição: "A cogeração é o processo de produção simultânea de energia térmica para calor de processo e energia elétrica ou mecânica a partir de um combustível" (ELETROBRÁS, 2000). Para Leme (2005), a cogeração é o aproveitamento sequencial, do ponto de vista termodinâmico, de duas ou mais formas úteis de energia a partir de uma única fonte primária. As aplicações da cogeração são diversas. O que se encontra normalmente é a produção combinada de calor e trabalho, o calor sendo utilizado como potência térmica pelo centro consumidor e o trabalho podendo ser utilizado diretamente como potência mecânica ou convertido em potência elétrica, por meio de um gerador elétrico.

Para Souza & Azevedo (2006a), as usinas que exploram mais intensamente a comercialização de excedentes de energia planejam a expansão futura da atividade sucroalcooleira, aumentando a oferta de energia. Em relação à estratégia de venda de excedentes, interferem: os custos associados à venda de energia excedente e a volatilidade no preço da energia elétrica.

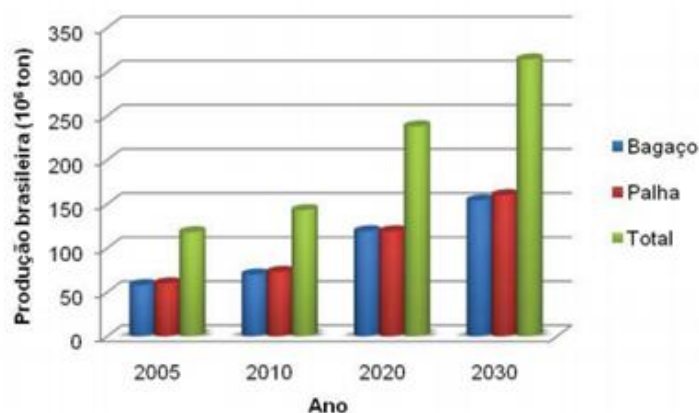
Um estudo feito pelo Instituto Euvaldo Lodi, em parceria com a Confederação Nacional da Indústria (CNI) e a Itaipu Binacional, apresentou que a biomassa da cana tem condições de adicionar ao sistema elétrico brasileiro até 2020, 15 mil megawatts (MW) de eletricidade, o que seria equivalente a incorporar uma nova Itaipu ao parque gerador nacional. Tais dados mostram que o setor poderá vir a contribuir para suprir a crescente demanda por energia no País (IEL, 2008).

Cada tonelada de cana processada requer, em média, 12 MWh, o que é facilmente gerado nos sistemas convencionais de cogeração instalados nas usinas. O aumento do preço da energia vendida pelo governo, que conduziu as usinas à autossuficiência e à valorização do bagaço para a venda e para outros fins, foi o que motivou as indústrias a explorar mais intensamente a comercialização de excedentes de energia gerada (DANTAS, 2010).

Para cogerar energia a partir destes insumos, utiliza-se um sistema de caldeiras e turbinas que trabalham sequencialmente com os geradores de energia elétrica. Atualmente, quase todas as usinas e destilarias brasileiras possuem sistemas de geração de vapor, que operam em cogeração queimando o bagaço, e algumas delas já vêm adicionando a palha, devido ao seu elevado potencial energético. O bagaço ainda é utilizado em quantidade muito superior que a palha, pois a maior parte da palha fica no campo e mais da metade é aproveitada como adubo (DANTAS, et al. 2009).

Martins (2009) apresenta diversos aspectos positivos com o uso da cogeração como o atendimento da necessidade nacional de geração de energia elétrica a partir de novas fontes energéticas; produção de energia elétrica com tecnologia totalmente limpa, de fonte renovável, que contribui para a preservação ambiental; produção de energia elétrica, sobretudo na época de menor pluviosidade, que coincide com a safra sucroalcooleira; inclusão de um novo agente de produção de energia elétrica, contribuindo, assim, para a consolidação do novo modelo de mercado competitivo.

A Figura 13 apresenta uma estimativa feita pelo Ministério do Meio Ambiente do aumento da produção da biomassa de cana nos próximos anos, até 2030, e do total, o quanto de bagaço e o quanto de palha poderão ser produzidos.



**Figura 13:** Gráfico da expansão da produção brasileira do bagaço e da palha de cana, até o ano de 2030

Fonte: MME (2007b)

A Tabela 9 apresenta uma estimativa feita pelo mesmo órgão da oferta da biomassa de cana também até 2030.

**Tabela 9:** Estimativa da oferta da biomassa de cana até o ano de 2030 (em milhões de toneladas)

<b>DESCRIÇÃO</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>
<b>Produção de cana</b>				
Total	431	516	849	1140
<b>Biomassa produzida</b>				
Total	117,8	141,9	233,5	313,5
Bagaço seco	57,8	69,7	114,6	153,9
Palha seca	60	72,2	118,9	159,6
<b>Biomassa ofertada</b>				
Total	57,8	73,3	132,3	185,8
Uso do Bagaço	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Recuperação da palha	0,0%	5,0%	14,9%	20,0%
<b>Destinação da biomassa</b>				
Produção de etanol	0	0,3	17,7	18,7
Produção de eletricidade	57,8	73	114,6	167,1

Fonte: MME (2007b)

Pela Tabela 9, pode-se verificar que há uma tendência de que a maior parte do bagaço produzido e da palha recuperada seja destinada à produção de eletricidade, deixando implícito que, com a melhoria dos sistemas de cogeração existentes, poderá ocorrer um aumento considerável da oferta de eletricidade por parte das usinas sucroalcooleiras.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

Os materiais utilizados para o desenvolvimento do presente trabalho referem-se a equipamentos de mensuração ponderal, a campo e, energética, em laboratório. Além do uso de dados de pesquisas referentes às duas variedades da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) selecionadas para o desenvolvimento do trabalho. Tanto os dados, como as amostras das variedades de cana-de-açúcar foram coletadas na Usina Santa Terezinha - Unidade Paranacity e as análises laboratoriais foram feitas no Laboratório de Processos de Separação, no Departamento de Engenharia Química (DEQ), da Universidade Estadual de Maringá.

##### 3.1.1 *Materiais a campo*

###### 3.1.1.1 Variedades de cana-de-açúcar

As variedades de cana escolhidas para a caracterização apresentam alta utilização e produtividade na região. São denominadas RB835054 e RB867515. De acordo com o material, Variedades RB de Cana-de-Açúcar (2010), da Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro - RIDESA, a variedade RB835054 (Figura 14), atende a atributos como touceiramento médio, com colmos eretos, pouco empalhados, de fácil despalha, de diâmetro médio, e de cor verde clara, com mancha de cera escurecida quando exposta ao sol. Além de apresentar alta brotação da soqueira tanto em colheita de cana queimada como em colheita de cana crua, alta produtividade agrícola e industrial, alto teor de sacarose, atinge seu período de maturação entre os meses de maio a julho e setembro a novembro, sendo identificada, portanto, como uma variedade de ciclo precoce/médio.



**Figura 14** – Variedade RB835054

Fonte: RIDESA (2010)

A variedade RB867515 (Figura 15) responde por características como alta velocidade de crescimento, porte alto, hábito de crescimento ereto, alta densidade de colmo, diâmetro de colmo médio, entre nós cilíndricos de cor verde arroxeado e roxo intenso quando exposto ao sol, pouca rachadura, leve ziguezague e de pouca cera. Além de ser tolerante à seca e ter boa brotação da soqueira, mesmo colhida crua; média despalha, possui alto teor de sacarose e produtividade agrícola; responsiva a maturador, podendo ser colhida em início de safra. Atinge seu período de maturação nos meses entre julho e setembro, identificada, portanto, como uma variedade de ciclo médio/tardio.



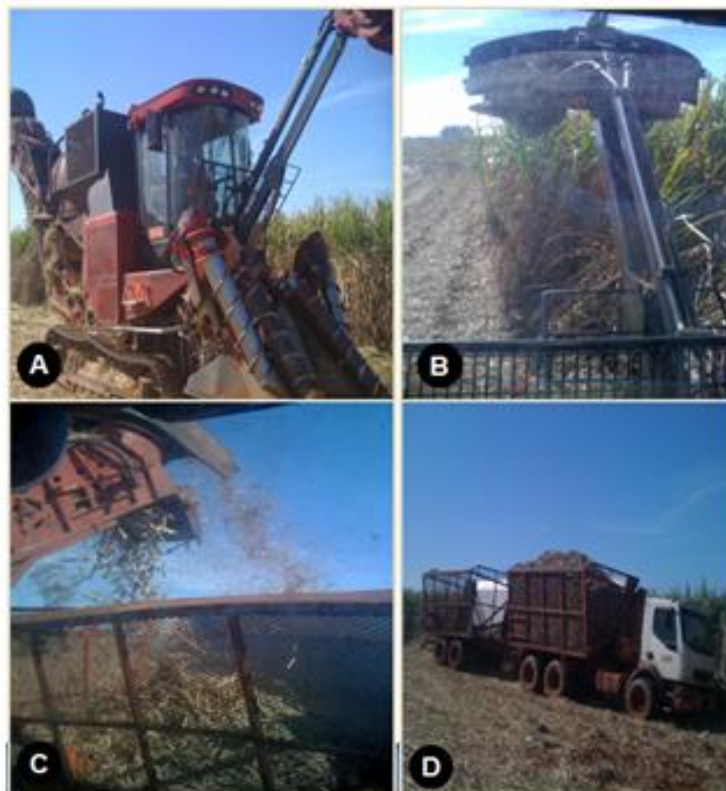
**Figura 15** – Variedade RB867515 (Arquivo pessoal, 2011)  
Local: Santa Terezinha/Unidade Paranacity – PR

A variedade RB867515 merece destaque já que hoje tem papel significativo para o setor produtivo do Estado, pois ocupa área superior a 20% da área cultivada com a cultura da cana-de-açúcar, proporciona aos produtores de cana-de-açúcar ótima opção de manejo para meio e final de safra e falando de Brasil, a variedade ocupa mais de um milhão de hectares cultivados.

#### 3.1.1.2 Conjunto mecanizado

Para a colheita mecânica do canavial utilizou-se a colhedora autopropelida, marca CASE, modelo A8800, rodado esteira, automática, 330 cv e transbordo agrícola de arrasto sobre o caminhão (Figura 16).





**Figura 16** – A: Colhedora CASE; B: Visão interna da colhedora (despontador); C: Descarga da colhedora para o transbordo; D: Deslocamento do transbordo  
Local: Santa Terezinha/Unidade Paranacity – PR

### *3.1.1.3 Outros utensílios*

Utilizou-se uma trena metálica (Leather) para demarcar as unidades experimentais e um quadrado de plástico (PVC), de 1 m<sup>2</sup> para recolher o material remanescente da colheita. Além disso, foi feito uso de sacos plásticos com volumes de 20 e 100 litros para o acondicionamento das amostras, etiquetas, fitilhos, uma lona plástica de 5m x 2m e freezer.

## *3.1.2 Materiais laboratoriais*

### *3.1.2.1 Mensuração ponderal*

Nas dependências da Usina foram determinadas as quantidades, em quilogramas (kg), de ponteiros, folhas verdes, palhas e colmos com o uso de balança (Filizola MF-30I). Depois de efetuada a pesagem, as amostras das respectivas frações foram acondicionadas em sacos plásticos identificados e encaminhados ao laboratório.

### 3.1.2.2 Características físico-químicas da biomassa

#### 3.1.2.2.1 Determinação do teor de umidade

Para determinação do teor de umidade do material foi utilizado um picador manual (guilhotina), recipiente de alumínio para acondicionar a amostra, balança analítica (BEL Mark 210A), estufa para secagem (FABBE, termostato 300 °C) e dessecador (Figura 17).



**Figura 17** – Imagens da guilhotina, recipiente de acondicionamento e dessecador  
Local: Laboratório de Processos de Separação I – DEQ/UEM

#### 3.1.2.2.2 Determinação da granulometria em peneiras

Após a determinação do teor de umidade, as amostras passaram por testes de granulometria para determinar o diâmetro padrão da amostra para ser aplicado às demais análises. Para os testes foram utilizados materiais como balança analítica, espátula, cronômetro, ar comprimido, vibrador de peneiras, folha seca moída e o conjunto de peneiras com Tyler 16, 20, 28, 32 e 35, conforme Figura 18.



**Figura 18** – Conjunto de peneiras e vibrador de peneiras  
Local: DEQ/UEM

### 3.1.2.2.3 Determinação do poder calorífico

Os ensaios para a determinação do poder calorífico superior foram realizados em base úmida e base seca para identificar a influência da umidade. Utilizou-se uma bomba calorimétrica digital Parr 6200 (Figura 19), em que foram analisadas amostras correspondentes às frações de folhas verdes, folhas secas e ponteiros, passadas em peneira com diâmetro de sauter de 0,4391mm (correspondente ao Tyler 35) que foram acondicionadas, manualmente, em cápsulas de aço e depositadas no aparato da bomba onde foi conectado o fio de ignição mantendo-o em contato com a biomassa contida na cápsula, estando o aparato preparado para ser fechado, receber pressurização e ser conduzido ao interior do equipamento. Os mesmos procedimentos foram utilizados para a determinação do poder calorífico de amostras de bagaço de cana-de-açúcar para efeito de complementação da pesquisa.



**Figura 19** – Bomba Calorimétrica Parr 6200  
Local: Complexo de Centrais de Apoio a Pesquisa (COMCAP/UEM)

### 3.1.2.2.4 Determinação do teor de materiais voláteis

Para a determinação do teor de materiais voláteis foram empregados utensílios como cadinhos de porcelana com tampa, moedor MARCONI, modelo TE-345, peneiras com Tyler 35, balança analítica com sensibilidade de 0,0001 g para pesar as amostras homogeneizadas, forno mufla controlável até 1000 °C e regulado a 900 °C  $\pm$  10 °C e dessecador com sílica para resfriar as amostras antes da determinação da respectiva massa (Figura 20).



**Figura 20** – Imagens da peneira, cadinhos com tampas e mufla em operação  
Local: Laboratório Processos de Separação I – DEQ/UEM

#### 3.1.2.2.5 Determinação do teor de cinzas

Para a determinação do teor de cinzas também foram utilizados cadinhos de porcelana para acondicionar as amostras, forno mufla com temperatura controlável até 1000 °C e regulado ~ a 600 °C, balança analítica com sensibilidade de 0,0001 g, dessecador, luva e pinça metálica (Figura 21).



**Figura 21** – Imagens da mufla em operação e dos cadinhos no dessecador  
Local: Laboratório III – DEQ/UEM

#### 3.1.2.2.6 Determinação do teor de carbono fixo

Para determinar o teor de carbono fixo efetuou-se o cálculo baseado na soma entre os valores do teor de materiais voláteis e do teor de cinzas, obtidos anteriormente.

### 3.2 Métodos

Para a otimização do processo de caracterização, as variedades de cana-de-açúcar foram selecionadas de acordo com o potencial produtivo na região, por meio do censo varietal da unidade de produção. Para a caracterização das variedades de cana-de-açúcar adotou-se o critério proposto por Ripoli (1991) em que considerou como parte da biometria das variedades de cana-de-açúcar, a determinação das quantidades, em quilogramas (kg), de

ponteiros, folhas verdes e secas, do total da planta. Após a determinação biométrica, o material recolhido foi identificado, pesado e encaminhado para análises químicas laboratoriais específicas para a caracterização do combustível sólido.

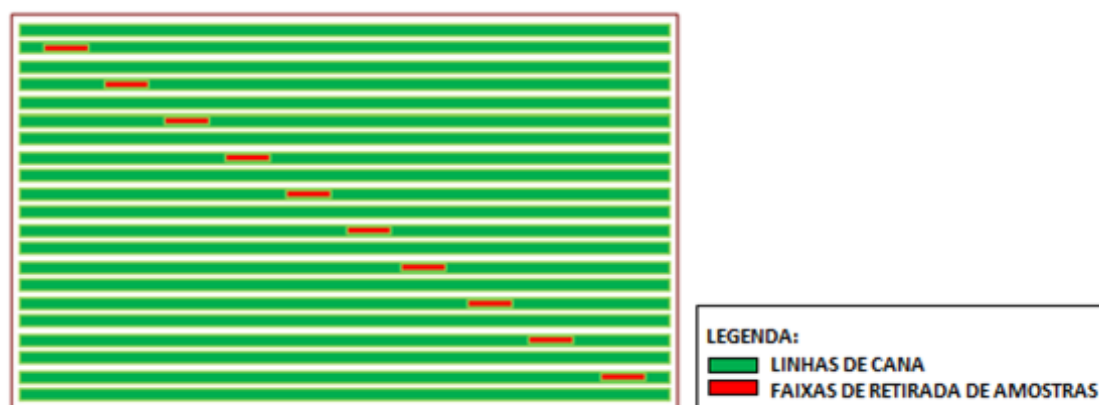
Por fim, após a coleta manual das amostras, seguiu-se com a obtenção da quantidade de biomassa remanescente no solo por meio da colheita mecânica do canavial, sem queima prévia, para estimar a produtividade do palhão.

A execução do modelo proposto efetuou-se, portanto, por meio de determinações a campo e determinações laboratoriais, cujos métodos serão apresentados e detalhados a seguir.

### 3.2.1 Caracterização das variedades de cana-de-açúcar e condições do terreno

Entre outras metodologias, Ripoli (1991) adotou uma para determinar as quantidades de ponteiros, folhas verdes, palhas e colmos e/ou suas frações não colhidas em que, primeiramente, é necessário determinar a área experimental geral de onde as amostras serão retiradas levando-se em consideração a homogeneidade de solo. Na área delimitada serão pré-estabelecidas as parcelas experimentais que deverão conter pelo menos 10 metros lineares (na linha de plantio), de onde de fato, serão recolhidas, aleatoriamente, no mínimo, 10 plantas como amostras de interesse.

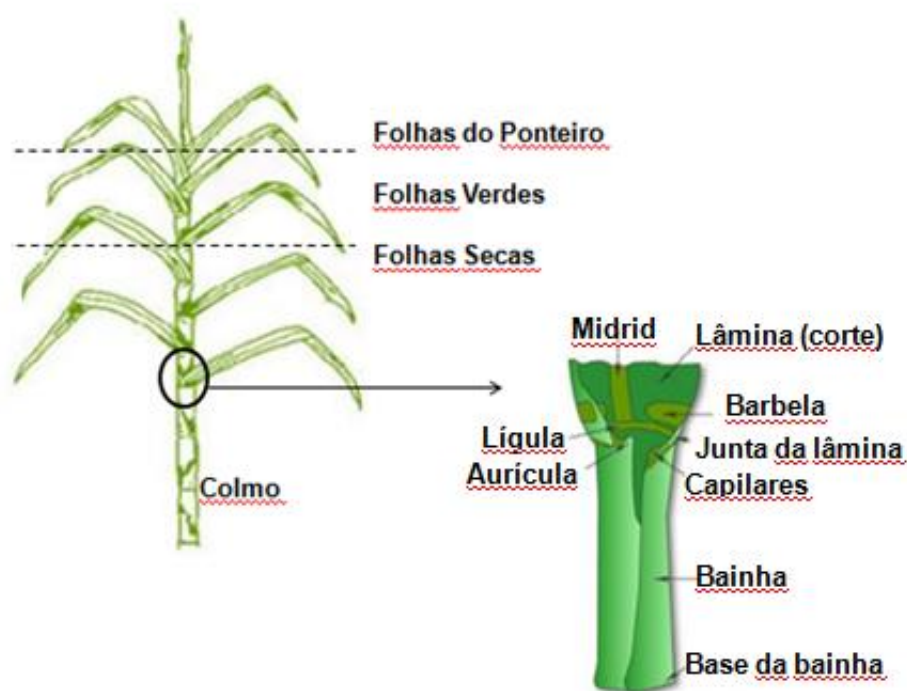
Para as variedades estudadas foram delimitadas duas áreas de 300 metros quadrados para cada variedade, cultivadas no mesmo tipo de solo, em fazendas diferentes, de onde foram tomadas amostras casualizadas de plantio com dez unidades experimentais (parcelas) caracterizadas cada uma por uma fileira de dez metros lineares, com espaçamento de plantio de 1,40 metros (Figura 22).



**Figura 22** – Representação da metodologia a campo



Em cada unidade experimental contou-se o número de colmos industrializáveis existentes e a seguir, nas mesmas unidades, manual e casualizadamente, foram retirados trinta colmos sem a eliminação dos ponteiros, folhas verdes e palhas, obtendo-se ao final, trezentas amostras de plantas. Em seguida, separou-se manualmente, para cada unidade experimental, as frações de colmos, ponteiros, folhas verdes e secas para cada variedade de cana, sendo, o ponteiro, a parte apical do colmo industrializável de cana-de-açúcar, constituído de internódios em formação recobertos pelas bainhas das folhas denominadas “zero e -1”, incluindo o cartucho; para as demais folhas (lâmina + bainha), foram consideradas as folhas verdes e secas até a folha que apresentava o primeiro colarinho visível (Dewlap). Após a retirada do ponteiro e das folhas, o restante foi considerado como colmo (Figura 23).



**Figura 23** – Representação da numeração de folhas no sistema estabelecido por Kuijper

Fonte: MARAFON (2012), adaptado pela Autora

A área inicial do presente estudo refere-se a um canavial sem queima prévia, colhido por sistema mecanizado e encontra-se situado em Inajá – PR, segundo informações oferecidas pela Usina Santa Terezinha - Unidade Paranacity. O talhão disponibilizado é pertencente à Fazenda Maria Regina, está codificado como talhão T 4774, cuja área correspondente a 20 hectares está indicada em vermelho na Figura 24. O local possui terreno

com declividade de 3% e localização topográfica referente à latitude 22°50'25" S, longitude 52°09'55" W.



**Figura 24** - Imagem Google Maps – Fazenda Maria Regina  
Local: Talhão 4774 – Inajá/PR

A variedade de cana-de-açúcar existente neste talhão é a RB835054, cultivada em ambiente de produção “E” (pouco fértil), solo identificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico (LVAd), ou seja, apresenta, resumidamente, estrutura granular forte, saturação por alumínio, pouco fértil e altamente intemperizado. A respectiva variedade tem data de plantio no dia 27 de março de 2008, em estágio de terceiro corte, com idade de 10 meses e produtividade estimada em 50 ha<sup>-1</sup> de cana. A segunda área definida para o estudo também refere-se a um canavial sem queima prévia, colhido por sistema mecanizado e situa-se em Paranacity/PR. O talhão disponibilizado, pertencente à Fazenda Figueira, está codificado como talhão T5191 (área aproximada de 20 hectares) e sua localização topográfica encontra-se na latitude 22°48'15" S, longitude 52°10'18" W (Figura 25).



**Figura 25** - Imagem Google Maps – Fazenda Figueira  
Local: Talhão 5191 – Paranacity/PR

A variedade de cana-de-açúcar existente neste talhão é a RB867515, também cultivada em ambiente de produção “E”, solo identificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico (LVAd). Com data de plantio no dia 31 de dezembro de 2008, em estágio de terceiro corte, idade de 11 meses e com uma produtividade estimada em  $60 \text{ ha}^{-1}$  de cana.

### **3.2.2** *Determinações ponderais da matéria prima e do material remanescente da colheita*

Determinou-se as quantidades, em quilogramas (kg), de ponteiros, folhas verdes, palhas e colmos com o uso de balança. As amostras devidamente pesadas foram acondicionadas em sacos plásticos e encaminhadas ao laboratório do Departamento de Engenharia Química da Universidade Estadual de Maringá, onde o material permaneceu congelado em freezer. Em seguida, as amostras foram encaminhadas para determinação de suas características físico-químicas importantes na determinação do potencial energético, como o teor de umidade, teor de cinzas, materiais voláteis e poder calorífico.

Do material remanescente de colheita da cana crua (sem queima prévia), foi lançado, aleatoriamente, o gabarito de  $1\text{m}^2$ , 20 vezes sobre o talhão em caminhamento diagonal (obedecendo ao caminhamento da metodologia anterior) para determinar a quantidade de biomassa em quilogramas (kg) em um metro quadrado e por meio da média



obtida estimar o equivalente à  $t\ ha^{-1}$  de palhiço (Figura 26). Todas as amostras foram pesadas individualmente e, em seguida, foram descartadas.



**Figura 26** – Operação de colheita mecânica (A); Gabarito de  $1m^2$  sobre o palhiço (B); Recolhimento do palhiço contido no gabarito (C); Solo limpo, final da operação (D)  
Local: Santa Terezinha/Unidade Paranacity – PR

### 3.2.3 Caracterização físico-química da biomassa

#### 3.2.3.1 Determinação do teor de umidade

Devido à falta de normas específicas para a caracterização do palhiço, para a determinação do teor de umidade utilizou-se como norma a NBR 8112 (1986), da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Foram sorteadas oito amostras, do total de 30, de cada constituinte (folha verde, folha seca e folhas do ponteiro), já separados conforme descrito no item anterior, de uma unidade experimental também obtida por meio de sorteio. As amostras foram então previamente preparadas, descongeladas e picadas.

Depois de misturado e picado todo o material, 100 gramas de cada fração (folha verde, folha seca e folha do ponteiro) foram pesadas com o uso de uma balança (BEL 210A). As amostras foram acondicionadas em recipientes de alumínio previamente secos e tarados e levados à estufa para secagem na temperatura de  $105\pm 2\ ^\circ C$ , onde permaneceram por 24 horas, tempo suficiente para que a massa das amostras se tornasse constante. A amostra retirada da estufa foi resfriada em um dessecador e, então, teve sua massa obtida.

Os cálculos referentes à obtenção do teor de umidade foram efetuados de acordo com a equação (1).

$$U = \frac{Mu - Ms}{Mu} 100 \quad (1)$$

Sendo:

U = teor de umidade (%);

Mu = massa úmida da amostra (g);

Ms = massa seca da amostra (g).

### 3.2.3.2 Determinação da granulometria em peneiras

A fim de se obter a homogeneização do material sólido a ser trabalhado, utilizou-se a determinação da granulometria em peneiras. Primeiramente, passou-se ar comprimido nas peneiras a fim de limpá-las e, em seguida, pesou-se cada peneira vazia. O material sólido foi selecionado, aleatoriamente, passou pelo processo de secagem e em seguida, foi moído em um triturador Marconi modelo TE-345. Foi utilizada uma amostra de 28 g de folha seca triturada para a realização da caracterização granulométrica em peneiras e o conjunto de peneiras foi montado adequadamente no vibrador de peneiras de acordo com a sequência Mesh Tyler, conforme o Quadro 1.

**Quadro 1:** Conjunto de peneiras com suas respectivas aberturas:

Mesh Tyler	Abertura (mm)
16	0,991
20	0,833
28	0,589
32	0,495
35	0,417

Logo após a montagem, peneirou-se a massa da amostra de folha. O peneiramento foi realizado em duas corridas, de 20 minutos cada, até que a massa das peneiras ficasse constante. Com os valores obtidos foi possível determinar o diâmetro médio de cada peneira.

O diâmetro médio de cada peneira (a partir da peneira 20) foi calculado pela Equação 2:

$$D_{\text{médio, peneira}_n} = \frac{D_{\text{peneira}_{n-1}} + D_{\text{peneira}_n}}{2}, \quad n = 16\_20\_28\_32\_35 \quad (2)$$

A fração de partículas retidas na peneira é dada pela Equação 3.

$$\Delta\varphi = \frac{\text{Mamostra}}{\text{Massa\_de\_amostra\_moída}} \quad (3)$$

A fração das partículas que apresentam um diâmetro menor que o diâmetro da peneira é dada pelas Equações 4 e 5.

$$\varphi <_{\text{peneira}_6} = \text{Soma\_de\_}\Delta\varphi - \Delta\varphi_{\text{peneira}_6} \quad (4)$$

$$\varphi <_{\text{peneira}_n} = \varphi <_{\text{peneira}_{n-1}} - \Delta\varphi_{\text{peneira}_n}, \quad n = 20\_28\_32\_35. \quad (5)$$

A fração das partículas que apresentam um diâmetro maior que o diâmetro da peneira é dada pela Equação 6.

$$\varphi \geq 1 - \varphi < \quad (6)$$

O diâmetro médio de Sauter foi calculado pela Equação 7.

$$D_{\text{médio\_de\_Sauter}} = \frac{1}{\text{Soma\_de\_}\Delta\varphi / D_{\text{médio}}} \quad (7)$$

Dessa forma, foi possível determinar a granulometria de interesse e, assim, padronizar as análises referentes à caracterização da biomassa.

### 3.2.3.3 Determinação do poder calorífico

Para a determinação do poder calorífico do palhiço, devido a ausência de metodologia específica para a referida biomassa, também adotou-se a mesma norma utilizada para determinação do poder calorífico do bagaço de cana, presente em outros trabalhos encontrados na literatura. A norma em questão refere-se à NBR 8633 (1984) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que aborda a determinação do poder calorífico superior para carvão vegetal. As amostras de folhas verdes, secas e ponteiros, destinadas à análise calorimétrica foram moídas, peneiradas com dimensão de 0.4391mm e acondicionadas em cápsula de aço, sem a necessidade de serem compactadas em pastilhas.

Para a operação da bomba foi respeitada a seguinte sequência:

1. Pesou-se 0,5 gramas do material moído e acondicionado em uma cápsula de aço;
2. Colocou-se a amostra na bomba conectada ao fio de ignição;
3. A bomba foi fechada para admissão de oxigênio a pressão de 30 atm;

4. Emergiu-se a bomba pressurizada na cuba do calorímetro contendo 2 litros de água, onde se conectaram os pinos de contato ao fio condutor de eletricidade, fechou-se a cuba e iniciou-se a queima;
5. Após a queima, os dados foram obtidos automaticamente e a leitura foi feita. Todos os procedimentos descritos foram feitos em seis repetições.

Considera-se a bomba calorimétrica, portanto, como sendo um sistema fechado, contendo o material de prova a ser testado. O calor gerado pela queima do material combustível no interior da bomba de aço inox é absorvido pela água contida na cuba. Por sua vez, a variação da temperatura da água será proporcional ao calor liberado pela combustão. Os valores obtidos com a queima podem ser lidos após a emissão automática dos mesmos.

A título de complementação dos dados, além da determinação do poder calorífico do palhiço foi possível realizar, também, a determinação do poder calorífico para amostras de bagaço de cana-de-açúcar, utilizando-se a mesma metodologia e os procedimentos descritos anteriormente.

#### 3.2.3.4 Determinação do teor de materiais voláteis

Para determinação do teor de materiais voláteis utilizou-se como norma a NBR 8112 (1986) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Foram utilizados cadinhos tarados e tampados, pesados em balança analítica. Em seguida, pesou-se cerca de 1,0 grama da amostra das folhas constituintes do palhiço (folha seca, folha verde e folhas do ponteiro), com granulometria de 0,4391 mm. Os cadinhos tampados foram conduzidos para o forno mufla regulado à  $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , onde permaneceram por 10 minutos em contato com o calor, sendo inicialmente, 3 minutos sobre a porta da mufla aberta, em seguida os cadinhos tampados foram conduzidos para o interior da mufla, com a porta fechada, por 7 minutos. Todos os procedimentos descritos foram feitos em seis repetições.

Transcorrido o tempo, os cadinhos foram retirados da mufla, colocados em um dessecador com sílica por 20 minutos para resfriamento das amostras e em seguida, foram pesados em uma balança analítica.

O teor de materiais voláteis foi determinado pela equação 8.

$$TMV = (M2 - M3)/M_s * 100 \quad (8)$$

Sendo que:

TMV = teor de materiais voláteis (%);

M2 = massa inicial do cadinho + amostra, em g;

M3 = massa final do cadinho + amostra, em g;

Ms = massa seca da amostra, em g.

### 3.2.3.5 Determinação do teor de cinzas

A execução do ensaio foi baseada nos procedimentos da ASTM (E1755 – 01) - Standard Test Method for Ash in Biomass, norma específica para a determinação do teor de cinzas para o bagaço da cana-de-açúcar. O método baseia-se na determinação da massa do resíduo mineral, resultante da combustão dos componentes orgânicos e oxidação dos inorgânicos da amostra em forno mufla, sob controle de massa, temperatura, tempo e atmosfera.

Para a determinação do teor de cinzas utilizaram-se cadinhos calcinados e tarados, em que se colocou 1 grama de amostra com precisão de 0,0001 g, com seis repetições. Os cadinhos contendo as amostras foram colocados no forno mufla a temperatura de  $600 \pm 10$  °C. Decorridos o tempo de 6 horas, os cadinhos foram retirados e as amostras revolvidas cuidadosamente para verificar se houve combustão completa (ausência de pontos pretos na amostra). Após a combustão, os cadinhos foram mantidos sobre placa de amianto até perder a coloração rubra e em seguida, foram destinados ao dessecador. Assim que a temperatura dos cadinhos tornou-se próxima a temperatura ambiente, efetuaram-se as pesagens.

O teor de cinzas da amostra é calculado pela equação (9).

$$TC = (M3 - M0) / M * 100 \quad (9)$$

Sendo que:

TC = teor de cinzas, em %;

M3 = massa do cadinho + resíduo após calcinar na mufla, em g;

M0 = massa do cadinho, em g;

M = massa da amostra, em g.

### 3.2.3.6 Determinação do teor de carbono fixo

Após a determinação dos teores de umidade, de material volátil e de cinzas das amostras, o teor de carbono fixo é obtido por diferença, representada pela equação 10.

$$TCF = 100 - (TC + TMV) \quad (10)$$

Sendo que:

TCF = teor de carbono fixo (%);

TC = teor de cinzas (%);

TMV = teor de materiais voláteis (%).

### 3.2.4 *Caracterização complementar da biomassa*

#### 3.2.4.1 Análise termogravimétrica (ATG)

As técnicas de ATG e DTG foram utilizadas com a finalidade de avaliação da estabilidade e decomposição térmica das amostras lignocelulósicas em função da perda de massa, sendo as mesmas submetidas a uma variação de temperatura. O equipamento utilizado na análise termogravimétrica é basicamente constituído por uma microbalança, um forno, termopares e um sistema de fluxo de gás. O equipamento empregado para realizar as análises termogravimétricas neste trabalho foi uma microbalança SHIMADZU, modelo TGA 50, e os resultados foram obtidos na forma de um termograma. As condições de análise foram as seguintes:

Taxa de aquecimento: 10 °C /minuto

Atmosfera: N<sub>2</sub> (20 mL/minuto)

Programação de temperatura: temperatura inicial: 20 °C e temperatura final: 1200 °C

#### 3.2.4.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura foi utilizada com o objetivo de verificação da estrutura morfológica das amostras de palhiço. Esta análise foi realizada na COMCAP, na qual as amostras foram conduzidas ao microscópio eletrônico de varredura Philips XL30. Pelo fato das amostras não serem condutoras de eletricidade, a superfície das mesmas foi recoberta com ouro para que pudessem ser observadas. As micrografias das superfícies recobertas com ouro foram feitas utilizando-se feixes de elétrons secundários de 15 kV.

#### 3.2.4.3 Espectroscopia no infravermelho (FTIR)

As amostras também foram submetidas à análise de espectroscopia de absorção na região do infravermelho empregando-se pastilhas de KBr. A finalidade

desta caracterização foi a determinação dos grupos funcionais presentes nos resíduos de biomassa.

Esta análise foi conduzida em um espectrômetro da marca Varian série 7000 e as condições de determinação do espectro foram modo ATR (Reflexão Total Atenuada) e intervalo espectral: 1500 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ .

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a realização de toda a caracterização do material de interesse (palhiço) foram utilizados materiais da cultura da cana-de-açúcar referentes às variedades RB835054 e RB867515. Serão apresentados, portanto, os resultados referentes à caracterização das variedades de cana-de-açúcar, feita a campo e, em sequência, os resultados referentes à caracterização físico-química da biomassa, feita em laboratório.

### 4.1 Caracterização das variedades de cana-de-açúcar

#### 4.1.1 Determinações ponderais da matéria prima e do material remanescente da colheita

A seguir serão apresentados os resultados obtidos a partir das amostragens feitas a campo das variedades de cana-de-açúcar, a fim de caracterizar os materiais para determinar proporcionalmente as frações correspondentes à folha seca, folha verde e ponteiro, do total da planta (Tabela 10).

**Tabela 10:** Caracterização da matéria prima colhida manualmente (percentual em massa)

Variedades	% Frações da planta			
	Folha Verde	Folha Seca	Folha Ponteiro	Colmo*
<b>RB835054</b>	5,7	8,3	6,0	80
<b>RB867515</b>	3,7	6,9	5,4	84

\*Não foram consideradas as raízes da planta durante a caracterização

A partir dos dados obtidos infere-se que, 20% do total da planta de cana-de-açúcar, correspondem à matéria prima de interesse que poderá ser disponibilizada a campo, manejada, recolhida e reutilizada como combustível sólido complementar à caldeira.

Os dados podem ser comparados com aqueles apresentados na Tabela 1 – *Revisão da Literatura*, demonstrando que, apesar das diferenças entre os materiais vegetais e das diferentes condições de cultivo, os valores encontrados como resultados dos dois trabalhos são semelhantes.

Após a colheita mecânica das variedades da cultura, sem queima prévia, foi efetuada a segunda amostragem com a finalidade de estimar a quantidade de massa vegetal remanescente no solo (Tabela 11).



**Tabela 11:** Dados obtidos com o recolhimento de palhiço

<b>Variedades</b>	<b>Palhiço (t ha<sup>-1</sup>)</b>
<b>RB966928</b>	15,8
<b>RB835054</b>	16,4
<b>RB867515</b>	24,4*

\*Material úmido pós-colheita

Por meio dos dados apresentados conclui-se que após a colheita da cana crua, permanece no campo uma quantidade significativa de palhiço, em média, 18 ha<sup>-1</sup>. Esse material remanescente deverá passar por secagem natural no solo antes de ser manejado, recolhido e transportado até a indústria. As informações referentes ao material RB966928, mencionadas na Tabela 11, referem-se a uma variedade de cana-de-açúcar de maturação precoce que também foi colhida mecanicamente (nas mesmas condições que as demais), como teste para a execução das demais amostragens. Como a amostragem foi bem sucedida e o valor correspondeu ao esperado, optou-se por mencioná-lo no presente trabalho.

Em relação à quantidade de palhiço determinada para a variedade RB867515, apesar de a variedade diferir das demais e de também se esperar valores relativamente diferentes de massa vegetal remanescente pós-colheita, justifica-se o alto valor obtido pelo fato de, à data de colheita da cana crua, previamente estabelecida pela usina, ter coincidido com dia chuvoso, resultando, portanto, em um valor discrepante dos demais devido à presença de maior umidade no material.

## 4.2 Caracterização físico-química da biomassa

A caracterização físico-química da biomassa foi feita em laboratório por meio da realização da análise Imediata, envolvendo a obtenção dos teores de umidade, materiais voláteis, cinzas, carbono fixo e do poder calorífico. A caracterização, como um todo, permite concluir se a biomassa de interesse apresentará potencial energético para uso como combustível sólido.

### 4.2.1 Análise Granulométrica

O Quadro 2 apresenta os dados para o cálculo de  $M_{amostra}$  retida na peneira (g), do  $D_{médio}$  (cm), do  $D_{peneira}$  (cm), do  $\Delta\phi$ , do  $\phi<$ , do  $\phi>$ , do  $\Delta\phi/D_{médio}$  (1/cm) e do  $D_{médio}$  de Sauter (cm) da folha seca da variedade RB 867515, seca a 105 °C em estufa por 24 horas.

**Quadro 2:** Distribuição granulométrica e valor calculado do diâmetro médio de Sauter da fração folha seca de cana-de-açúcar

Sistema Tyler (Mesh)	Massa retida (g)	$D_{\text{médio}}$ (mm)	$D_{\text{médio}}$ (mm)	$\Delta\phi$	$\phi<$	$\phi>$	$\Delta\phi/D_{\text{med}}$
16	6,21	0,9910	1,0795	0,2167	0,7833	0,2167	0,2007
20	3,57	0,8330	0,9120	0,1246	0,6588	0,3413	0,1366
28	3,11	0,5890	0,7110	0,1085	0,5502	0,4498	0,1526
32	4,23	0,4950	0,5420	0,1476	0,4027	0,5974	0,2723
35	4,58	0,4170	0,4560	0,1598	0,2428	0,7572	0,3504
Fundo	6,96	0,0000	0,2085	0,2428	0,0000	1,0000	1,1647
<b>Total</b>	28,66					<b><math>D_{\text{médio de sauter}}</math> (mm)</b>	0,4391

Em que:

Mesh Tyler: Especificação da peneira;

$M_s$  (g): Massa de folha seca contida no interior da peneira, em gramas;

$D_{\text{peneira}}$  (cm): Diâmetro de abertura da peneira, em centímetros;

$D_{\text{médio}}$  (cm): Diâmetro médio da peneira, em centímetros;

$\Delta\phi$  = Fração das partículas retidas na peneira;

$\phi<$  = Fração das partículas que apresentam um diâmetro menor que o diâmetro da peneira;

$\phi>$  = Fração das partículas que apresentam um diâmetro maior que o diâmetro da peneira;

$\Delta\phi/D_{\text{médio}}$  (1/cm): Fração das partículas retidas na peneira dividida pelo diâmetro médio da peneira, em um sobre centímetros;

$D_{\text{médio de Sauter}}$  (cm): Diâmetro médio de Sauter, em centímetros.

De acordo com o Quadro 2 observa-se que o diâmetro de sauter obtido é de 0,4391 milímetros, que correspondem à peneira de Tyler 35, sendo essa, portanto, a peneira adequada para o preparo das amostras a serem utilizadas nas demais análises de caracterização.

#### 4.2.2 Análise Imediata

Por meio dos dados apresentados na Tabela 12, nota-se que os valores dos respectivos teores obtidos com a análise imediata das duas variedades de cana-de-açúcar, apresentam coerência.

**Tabela 12:** Resultados para a Análise Imediata

Teores	% UMIDADE	% VOLÁTEIS	% CINZAS	% C. FIXO
<b>Frações</b>		<b>Variedade RB835054</b>		
F. SECA	10,6	83,3	2,2	14,4
F. VERDE	49,8	80,1	3,4	16,4
PONTEIRO	62,2	77,9	3,9	18,2
<b>Frações</b>		<b>Variedade RB867515</b>		
F. SECA	10,4	84,6	1,9	13,3
F. VERDE	46,9	80,0	3,1	16,6
PONTEIRO	59,1	78,7	4,2	16,9

\*Base seca

Observa-se que as frações referentes à folha verde, folha seca e folha do ponteiro apresentam diferenças importantes em relação ao teor de umidade, teor de álcalis e outras características.

Em relação ao teor de umidade, os valores obtidos são diferentes em cada fração da planta justamente por serem fragmentos vegetais de idades diferentes, ou seja, as folhas secas, cujos teores de umidade são de 10,6% e 10,4%, referem-se às folhas mais velhas e, portanto, as primeiras folhas a secarem, tanto por maturação natural, como por uso de indutores de amadurecimento. Em seguida, as folhas verdes, cujos teores de umidade são de 49,8% e 46,9%, ainda não passaram pelo processo total de maturação, o que justifica os teores de umidades significativos e, por fim, as folhas do ponteiro com 62,2% e 59,1% de umidade, são as folhas mais novas da planta que contém quantidade significativa de água do vegetal.

Quanto ao teor de materiais voláteis, os valores são equivalentes a 80% para folhas verdes, 84% para folhas secas e 78% para folhas do ponteiro, para as duas variedades, demonstrando que não há expressiva variação nos diferentes teores em relação às variedades de cana-de-açúcar.

Para o teor de cinzas, os valores também se apresentam de forma semelhante, estando entre 3,1% e 3,4% para folhas verdes, 1,9% e 2,2% para folhas secas e 3,9% e 4,2% para folhas do ponteiro.

Valores semelhantes podem ser observados da mesma forma para o teor de carbono fixo, em que os valores ficam por volta de 16% para folhas verdes, de 13% a 14% para folhas secas e 16% a 18% para folhas do ponteiro.

De acordo com a Tabela 12, é possível inferir que os valores obtidos já eram esperados quando se confronta com os dados da literatura apresentados na Tabela 13, mesmo sendo dados oriundos de variedades distintas de cana-de-açúcar (RB72454, SP791011 e SP801842), demonstrando certa correlação.

**Tabela 13:** Análise Imediata para biomassa de cana-de-açúcar (%)

Teores	UMIDADE*	VOLÁTEIS*	CINZAS	CARBONO FIXO*
F. SECA	11,3	85,8	3,3	10,8
F. VERDE	66,7	85,2	3,2	11,7
PONTEIRO	82,5	84,1	4,3	11,6

\*Base seca

Fonte: COPERSUCAR 03 (1998); adaptado pela Autora

#### 4.2.3 Poder Calorífico

O valor do poder calorífico é um dos mais importantes e expressivos no estudo de combustíveis, por representar o potencial energético da biomassa.

A princípio foram feitas análises referentes ao bagaço da cana-de-açúcar para que fosse possível relacionar com o poder calorífico do palhico. Nas análises realizadas foram consideradas amostras úmidas e isentas de umidade para identificar a influência da mesma no poder calorífico. O valor médio do poder calorífico obtido a partir de amostras úmidas (53% de umidade) foi equivalente a  $8 \text{ MJ kg}^{-1}$  (ou  $1800 \text{ kcal kg}^{-1}$ ), enquanto que, após a secagem, o valor médio do poder calorífico das amostras correspondeu ao valor de  $18 \text{ MJ kg}^{-1}$  ( $4300 \text{ kcal kg}^{-1}$ ), ou seja, a umidade presente na biomassa combustível de fato compromete a eficiência nos processos de conversão de energia.

Para as análises de poder calorífico referentes ao palhico, biomassa de interesse, foram feitas análises considerando também tanto a umidade da biomassa (Tabela 14), quanto o material seco (Tabela 15).

**Tabela 14:** Valores médios de poder calorífico, em base úmida ( $\text{MJ kg}^{-1}$ )

Variedades	Frações da planta		
	Folha Verde*	Folha Seca*	Folha Ponteiro*
<b>RB835054</b>	9,1	16,8	7,2
<b>RB867515</b>	9,2	17,1	5,8

\*Base úmida

Considerando a umidade média de 48,3% para a fração folha verde, os resultados são de  $9,1 \text{ MJ kg}^{-1}$  ( $2179 \text{ kcal kg}^{-1}$ ) e  $9,2 \text{ MJ kg}^{-1}$  ( $2191,8 \text{ kcal kg}^{-1}$ ) para as variedades, respectivamente. Considerando a umidade média de 10,5% para a fração folha seca, os resultados são de  $16,8 \text{ MJ kg}^{-1}$  ( $4029,8 \text{ kcal kg}^{-1}$ ) e  $17,1 \text{ MJ kg}^{-1}$  ( $4086 \text{ kcal kg}^{-1}$ ). Por fim, considerando a umidade de 60,65% para a fração folha do ponteiro, os resultados são de  $7,2 \text{ MJ kg}^{-1}$  ( $1733,9 \text{ kcal kg}^{-1}$ ) e  $5,8 \text{ MJ kg}^{-1}$  ( $1404,6 \text{ kcal kg}^{-1}$ ) para cada variedade.

De acordo com a Tabela 14, pode-se observar igualmente a influência da umidade nos resultados de poder calorífico. Conforme as frações de folhas e seus respectivos teores de umidade, nota-se o quanto esses dados podem ser úteis a campo para auxiliar a identificar o tempo desejável de secagem natural no solo, ao ambiente, antes do material ser recolhido e destinado até a indústria.

Os resultados de poder calorífico levando-se em conta as amostras da biomassa isentas de umidade (base seca) estão apresentados na Tabela 15.

**Tabela 15:** Valores médios de poder calorífico, em base seca ( $\text{MJ kg}^{-1}$ )

Variedades	Frações da planta		
	Folha Verde*	Folha Seca*	Folha Ponteiro*
<b>RB835054</b>	17,1	17,4	16,7
<b>RB867515</b>	17,9	17,9	17,8

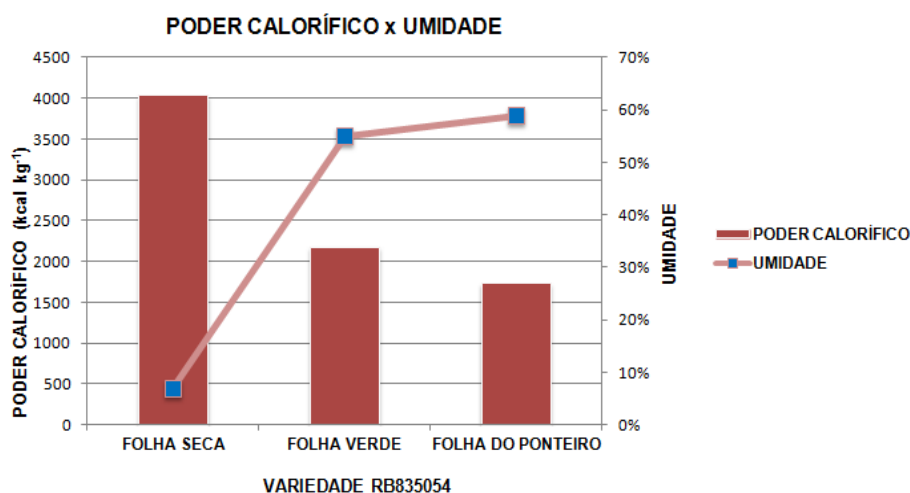
\*Base seca

Analisando agora os resultados do poder calorífico para o material sem umidade, observa-se que, os valores encontrados são de  $17,1 \text{ MJ kg}^{-1}$  ( $4090,2 \text{ kcal kg}^{-1}$ ) e  $17,9 \text{ MJ kg}^{-1}$  ( $4279,6 \text{ kcal kg}^{-1}$ ) para folhas verdes,  $17,4 \text{ MJ kg}^{-1}$  ( $4170,8 \text{ kcal kg}^{-1}$ ) e  $17,9 \text{ MJ kg}^{-1}$  ( $4286,9 \text{ kcal kg}^{-1}$ ) para folhas secas e  $16,7 \text{ MJ kg}^{-1}$  ( $4013,4 \text{ kcal kg}^{-1}$ ) e  $17,8 \text{ MJ kg}^{-1}$  ( $4277 \text{ kcal kg}^{-1}$ ) para folhas do ponteiro.

De acordo com a Tabela 15 e considerando-se a média de poder calorífico de  $17 \text{ MJ kg}^{-1}$  ( $4052 \text{ kcal kg}^{-1}$ ) encontrada na literatura (CTC, 2012), conclui-se que, para os dados de poder caloríficos obtidos do material isento de umidade, os valores encontram-se de acordo

com a média esperada. Dessa forma, a biomassa do palhicho produzida a partir de variedades de cana-de-açúcar cultivadas na região Noroeste do Paraná, também apresentam potencial energético significativo para uso como combustível sólido em caldeiras.

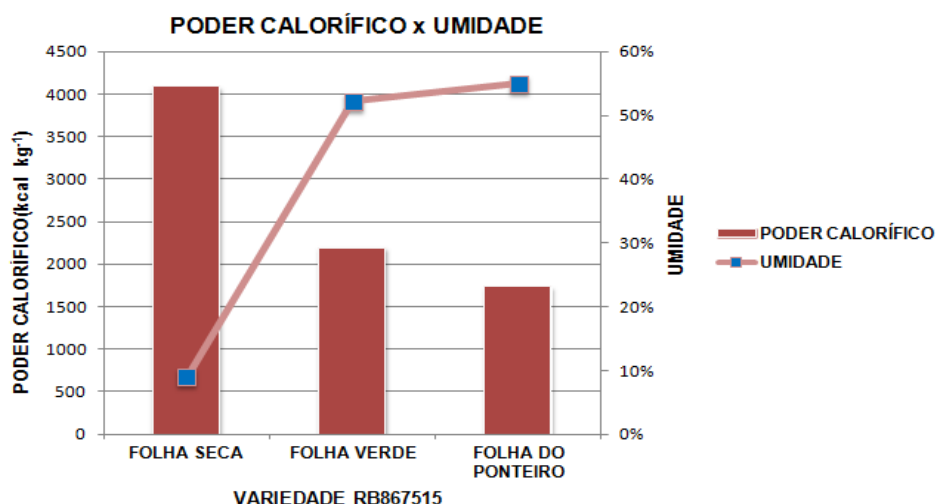
Diante dos valores expostos é possível compreender que quanto maior a umidade presente no material utilizado, menor o poder calorífico do combustível, o que também pode ser visualizado por meio de gráfico (Figura 27).



**Figura 27** – Influência da umidade no poder calorífico para a Variedade RB835054

A partir da Figura 27, verifica-se que, de acordo com a variedade RB835054, para a fração folha seca, enquanto a umidade do material encontra-se com teor de 10%, o valor correspondente ao poder calorífico é de aproximadamente 4000 kcal kg<sup>-1</sup>. Para a fração folha verde, enquanto a umidade é de 55%, o valor correspondente ao poder calorífico é de 2200 kcal kg<sup>-1</sup> e para a fração folha do ponteiro, enquanto a umidade aproximada é de 60%, o poder calorífico correspondente é de 1700 kcal kg<sup>-1</sup>.

Valores semelhantes são observados na Figura 28, em que estão representados os resultados referentes à variedade RB867515.



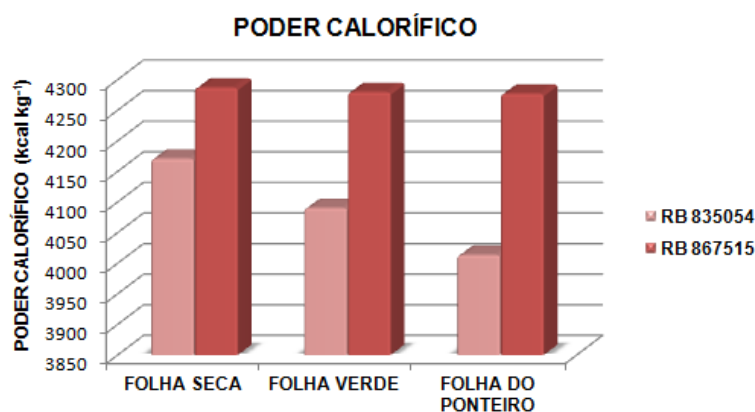
**Figura 28** – Influência da umidade no poder calorífico para a Variedade RB867515

Para a fração folha seca, enquanto o valor de umidade é por volta de 10%, o valor correspondente ao poder calorífico é de 4100 kcal kg<sup>-1</sup>, para folha verde, com umidade aproximada de 55%, o valor correspondente ao poder calorífico é de 2200 kcal kg<sup>-1</sup> e para folha do ponteiro, com umidade de 57%, o valor correspondente ao poder calorífico é de 1700 kcal kg<sup>-1</sup>.

Portanto, para as duas variedades de cana-de-açúcar mencionadas, quanto maior a umidade presente no material utilizado, menor o poder calorífico e conseqüentemente, menor quantidade de energia será liberada na queima do combustível. Assim, parte da energia liberada será destinada para a evaporação da água presente no material, reduzindo, assim, a eficiência energética do combustível, resultando em maior consumo da biomassa.

Logo, ao se comparar os dados obtidos com a caracterização da biomassa do palhiço da cana-de-açúcar, por meio dos resultados de poder calorífico, com os dados referentes ao bagaço descritos na literatura e com os aqueles obtidos experimentalmente, compreende-se que o palhiço apresenta-se como biomassa com potencial energético significativo, que poderá ser destinado como combustível sólido complementar ao bagaço, para uso na indústria sucroalcooleira.

Ainda a título de se identificar e comparar a diferença entre os valores de poder calorífico obtido para as duas variedades de cana-de-açúcar estudadas, o gráfico representado pela Figura 29 abaixo, ilustra diferenças entre as variedades (base seca).



**Figura 29** – Valores de poder calorífico entre as Variedades RB835054 e RB867515

O poder calorífico para a variedade RB867515 apresenta valores maiores em relação aos valores da variedade RB835054, mesmo que relativamente pequena a diferença. Provavelmente, essa diferença entre os valores de poder calorífico pode ter ocorrido devido à presença de lignina nas fibras que compõem o material vegetal da variedade. A lignina é um polímero estrutural importante, responsável pela resistência mecânica de vegetais e sua composição elementar é constituída exclusivamente por carbono, hidrogênio e oxigênio, que influenciam diretamente no poder calorífico. Sendo importante, neste caso, além de qualificar a presença da lignina, quantificá-la também.

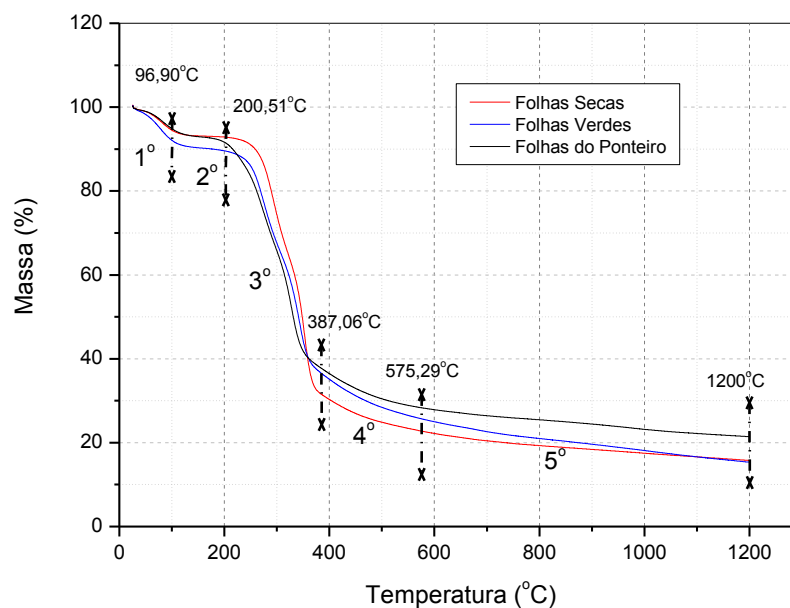
### 4.3 Análises complementares

#### 4.3.1 Análise Termogravimétrica

As frações de folha verde, seca e do ponteiro da cana-de-açúcar foram submetidas à análise termogravimétrica (ATG), a fim de verificar o comportamento da biomassa relativamente à perda de massa durante o processo de aquecimento, bem como sua estabilidade térmica.

Os principais picos de perdas de massa para as amostras referentes à variedade RB835054 foram registrados e representados na Figura 30.





**Figura 30:** Curva termogravimétrica das frações de folhas da variedade RB835054, com as regiões de perda de massas registradas

Basicamente verificou-se a existência de cinco regiões de perda de massa para os perfis analisados. A primeira região tem início na temperatura ambiente ( $\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) até  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  proveniente da perda de água e  $\text{CO}_2$ . Em seguida, há uma perda até  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , que pode ser atribuída a água e início da degradação da biomassa. A partir daí ocorre o princípio da eliminação de compostos orgânicos mais voláteis até a temperatura em torno de  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Na quarta região, prossegue a eliminação de semi-fixos até a temperatura  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Após esta temperatura os compostos orgânicos fixos são degradados.

Ao comparar as curvas é possível observar pequenas diferenças de perdas de massas entre as frações de folhas. A fração folha verde, representada pela curva de cor azul, inicia a perda de massa antes das demais frações e a partir de temperatura inferior as demais ( $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), com perda de massa maior que as demais frações; seguida pela fração folha do ponteiro, representada pela curva de cor preta, com perda de massa menor que a anterior; e por fim, a fração folha seca, representada pela curva vermelha, que apresenta o início de perda de massa com temperatura pouco maior que as demais frações. Tal fato se justifica pela presença de água em maior quantidade nas frações de folhas verdes e do ponteiro que caracterizam a perda inicial de massa e com maior evidência, em relação à fração folha seca, que começa a perda de fato, com temperatura superior as demais ( $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

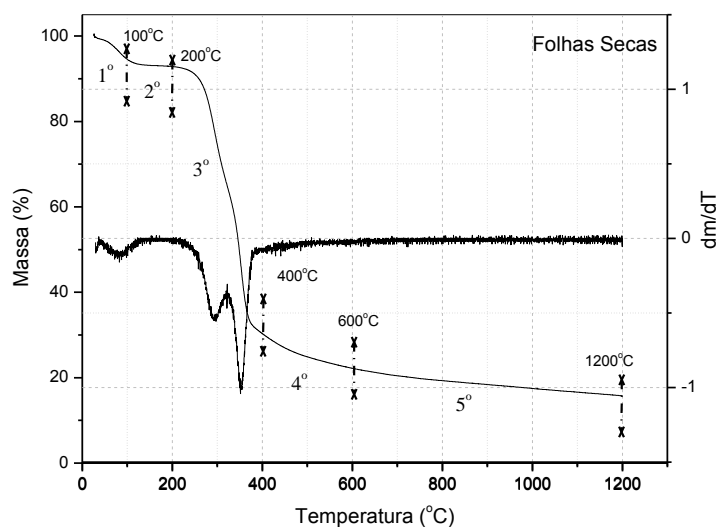
A Tabela 16 apresenta as principais perdas dos componentes da biomassa de acordo com suas respectivas regiões e intervalos de temperaturas.

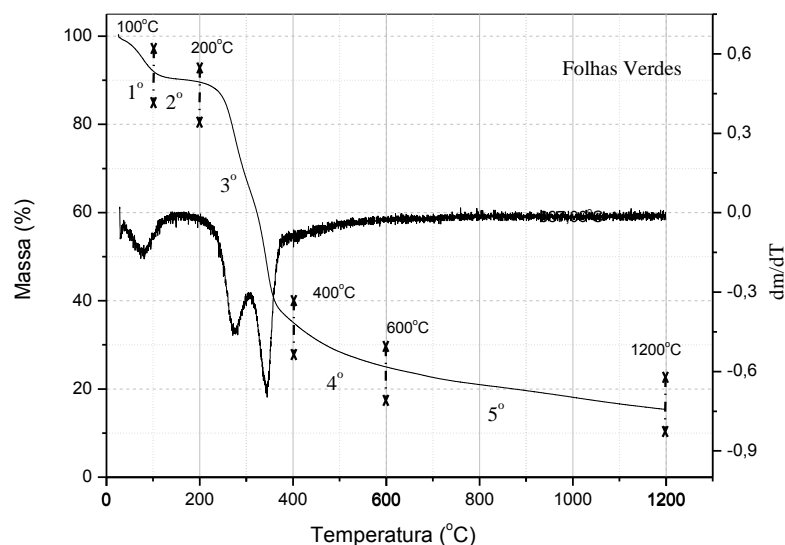
**Tabela 16** – Análise termogravimétrica (variedade RB835054)

Região	T <sub>inicial</sub> (°C)	T <sub>final</sub> (°C)	Justificativa
1	25	100	CO <sub>2</sub> e Água
2	100	200	Água
3	200	400	Orgânicos voláteis
4	400	600	Orgânicos semi-fixos
5	600	1200	Orgânicos fixos Carvão e cinzas (inorgânicos)

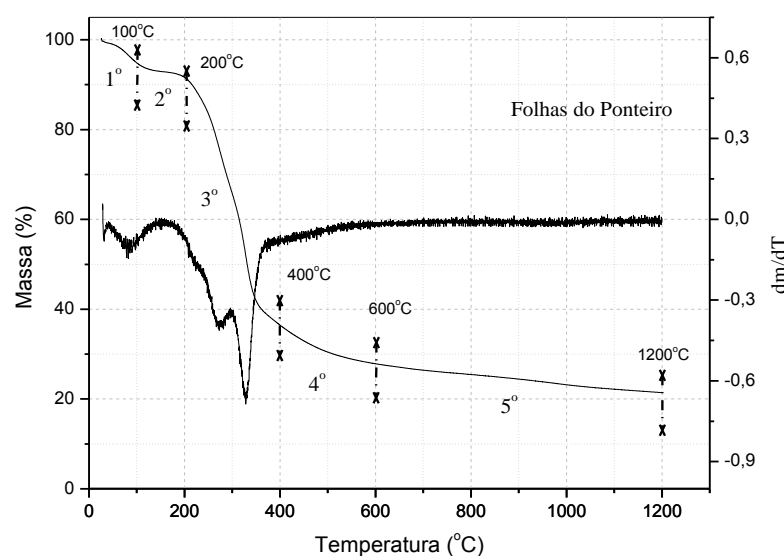
Pode-se observar que as perdas que ocorrem na região 3, caracterizadas pelas perdas de orgânicos voláteis entre 200 e 400 °C, correspondem ao percentual obtido com a análise imediata (cerca de 80%), assim como, os 15% que correspondem à massa residual de carvão e cinzas (inorgânicos). Estão, portanto, de acordo com os resultados obtidos com a análise imediata descritos na Tabela 12.

Os perfis TGA e dm/dT para as amostras de folhas secas, folhas verdes e folhas do ponteiro também estão indicadas nas Figuras 31, 32 e 33.

**Figura 31** - Perfil ATG/DATG - Folhas Secas da Variedade RB835054



**Figura 32** - Perfil ATG/DATG - Folhas Verdes da Variedade RB835054



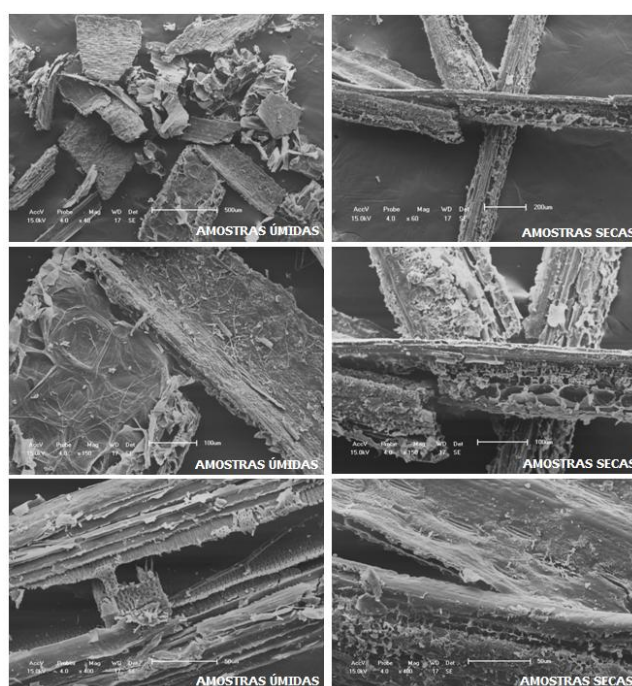
**Figura 33** - Perfil ATG/DATG - Folhas do Ponteiro da Variedade RB835054

Com a finalidade de uma interpretação mais eficiente utilizou-se as derivadas em função do tempo desta curva. Estes perfis apontam as regiões de perdas de massa em função da temperatura.

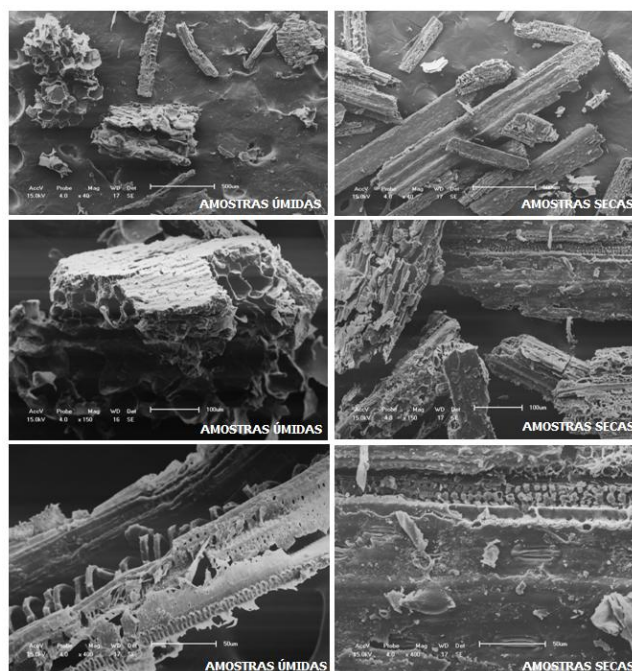
Os dados obtidos com a análise termogravimétrica são semelhantes aos resultados da análise imediata, apesar de terem sido utilizadas condições, temperaturas e metodologias diferentes, são observadas perdas de massa semelhantes nas duas análises imediatas, conforme a Tabela 12 e a Figura 30. Acredita-se que, dessa forma, é possível definir uma metodologia para a caracterização do palhiço da cana-de-açúcar.

#### 4.3.2 *Microscopia Eletrônica de Varredura*

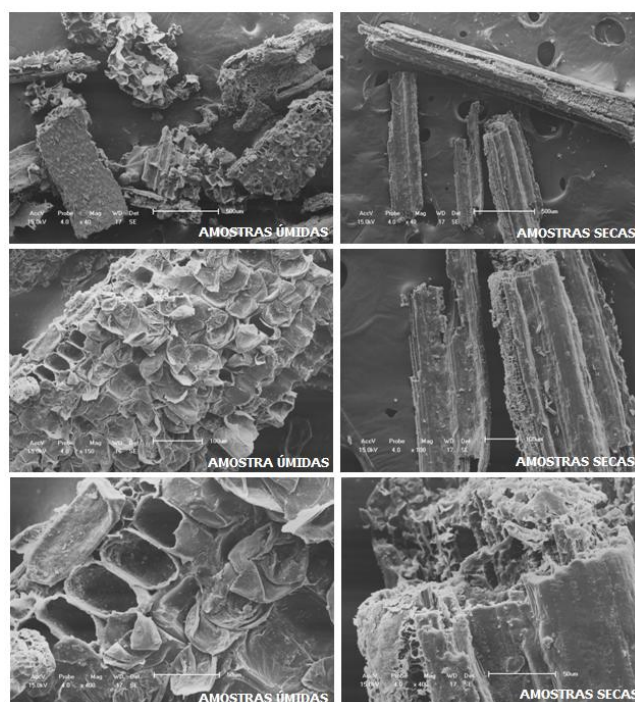
Foram obtidas imagens por microscopia eletrônica de varredura para as frações de cana-de-açúcar constituídas de folha verde, folha seca e folha do ponteiro, para as variedades RB835054 e RB867515. As análises foram feitas com a finalidade de observar possíveis diferenças estruturais por ocasião da secagem, entre as frações quando úmidas e isentas de umidade. As imagens foram registradas com as resoluções de 40, 150 e de 400 vezes tanto para amostras úmidas e sem umidade e estão ilustradas nas Figuras 34, 35 e 36, respectivamente, para folhas secas, folhas verdes e folhas do ponteiro para a variedade RB835054.



**Figura 34:** Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da fração folha seca de cana-de-açúcar da variedade RB835054



**Figura 35:** Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da fração folha verde de cana-de-açúcar da variedade RB835054



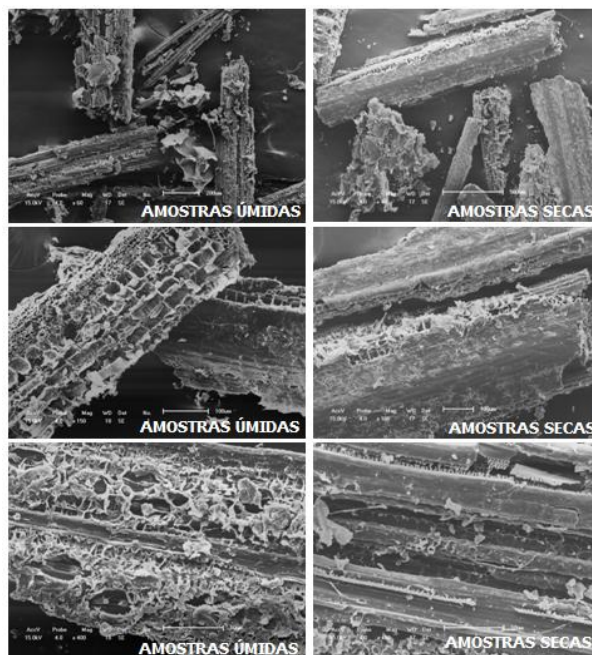
**Figura 36:** Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da fração folha do ponteiro de cana-de-açúcar da variedade RB835054

Conforme as imagens apresentadas nas figuras acima, em todas as frações de folhas (seca, verde e ponteiro), as amostras úmidas apresentam morfologia heterogênea (células, estômatos, vasos condutores), com regiões de textura macroporosa íntegra e outras de textura fibrosa. Já para as frações isentas de umidade (secas), não se pode observar o mesmo, uma vez

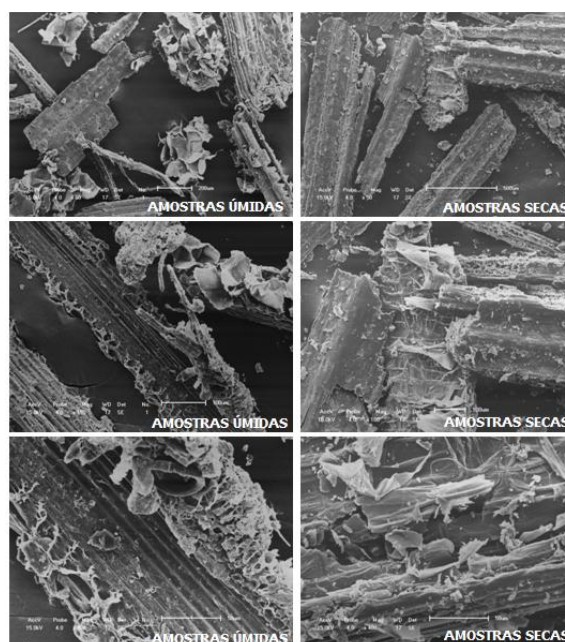


que as estruturas não se mantêm íntegras, não visualiza-se textura macroporosa e por vezes, apresentam-se como maciços de células compactas ou estilhaçadas.

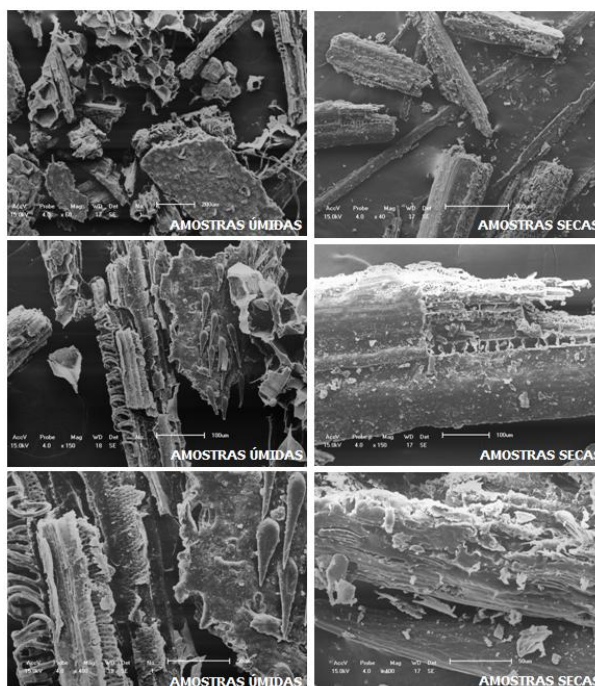
As mesmas características descritas podem ser observadas também nas imagens referentes à variedade RB867515, por meio das Figuras 37, 38 e 39, para folhas secas, folhas verdes e folhas do ponteiro, respectivamente.



**Figura 37:** Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da fração folha seca de cana-de-açúcar da variedade RB867515



**Figura 38:** Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da fração folha verde de cana-de-açúcar da variedade RB867515



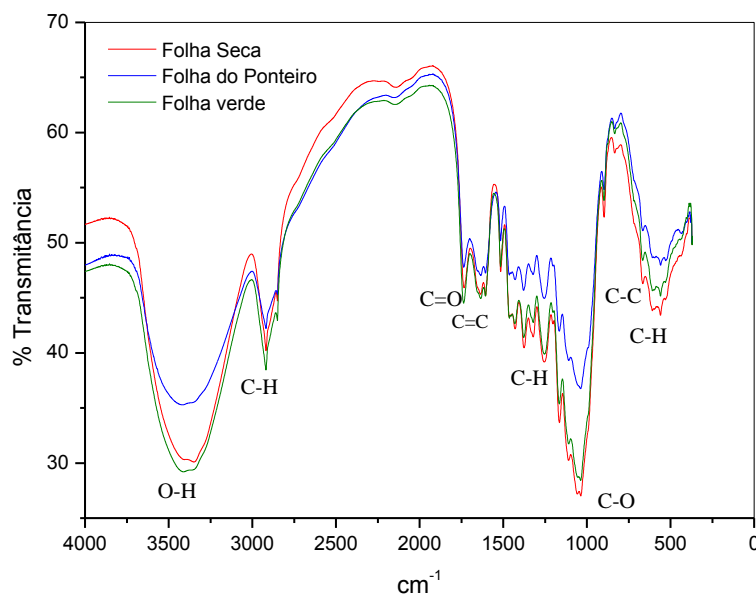
**Figura 39:** Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da fração folha do ponteiro de cana-de-açúcar da variedade RB867515

Ao verificar as imagens de microscopia eletrônica de varredura é possível observar a distribuição das fibras de maneira clara e simples e o efeito de degradação da secagem sobre as estruturas das células.

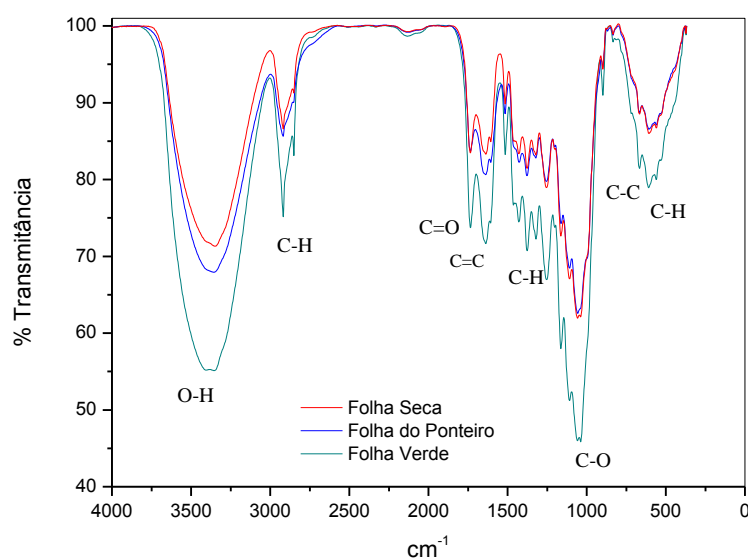
#### 4.3.3 Espectroscopia no Infravermelho

Devido à complexidade da lignina e à sua susceptibilidade de alteração durante os procedimentos de isolamento, o uso de técnicas espectroscópicas na região do infravermelho e visível tem sido de grande importância na elucidação da estrutura.

As Figuras 40 e 41 apresentam os espectros de absorção na região do infravermelho característicos para as amostras da folha do ponteiro, folha seca e folha verde para as duas variedades de cana-de-açúcar, RB835054 e RB867515, estudadas.



**Figura 40:** Espectros no infravermelho das frações de folhas de cana-de-açúcar (folha seca, ponteiro e verde) para a variedade RB835054



**Figura 41:** Espectros no infravermelho das frações de folhas de cana-de-açúcar (folha seca, ponteiro e verde) para a variedade RB867515

Os espectros no infravermelho revelaram uma banda larga na região entre 3300 e 3500  $\text{cm}^{-1}$ , sendo esta banda é atribuída aos grupos de fenóis, alcoóis e ácidos carboxílicos. Entre 2750 e 3000  $\text{cm}^{-1}$  o sinal é a indicação do estiramento C-H dos alcanos e aldeídos. Entre 2830 e 2695  $\text{cm}^{-1}$  está localizada a deformação axial da maior parte dos aldeídos. A deformação axial do grupo cetona foi observada na faixa de 1675 e 1750  $\text{cm}^{-1}$ . Uma possível deformação axial acoplada simétrica e assimétrica pode ser vista em 1650 e 1600  $\text{cm}^{-1}$  respectivamente, uma vez que a faixa de número de onda para este sinal situa-se entre 1550 e 1650  $\text{cm}^{-1}$ . O sinal ao redor de 1480 e 1240  $\text{cm}^{-1}$  pode-se visualizar a deformação axial de C-



H, entre 1000 e 1250  $\text{cm}^{-1}$  de C-O de alcoóis e fenóis e em 750  $\text{cm}^{-1}$ , a deformação angular fora do plano de C-H (SILVERSTEIN et al, 1979; WU, 2010).

Da mesma forma, a Tabela 17 abaixo indica os possíveis grupos funcionais identificados nos espectros no infravermelho da biomassa de acordo com o número de onda e a atribuição.

**Tabela 17:** Relação Grupo funcional no espectro infravermelho das amostras estudadas

Funções químicas	Número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ )	Atribuição
Aromáticos	500-750	C-C e C-H
Fenóis, alcoóis	1250-1000	C-O
Alcanos	1500-1250	C-H
Aromáticos, alcenos	1650-1550	C=C
Cetonas	1750-1675	C=O
Alcanos, aldeídos	3000-2750	C-H
Fenóis, alcoóis, ácidos	3500-3300	O-H

De acordo com os gráficos apresentados nas Figuras 40 e 41, observa-se, portanto, que a lignina está presente nas fibras das duas variedades de cana-de-açúcar, uma vez que as bandas identificadas são as mesmas e, possivelmente, com teores diferentes de lignina entre as variedades. Já as transmitâncias de cada gráfico indicam apenas que são amostras foliares com espessuras diferentes, sendo menor para a variedade RB835054 e maior para a variedade RB867515. Geralmente, a folha seca apresenta uma variação maior na transmitância, pelo fato de estar seca, o que poderia dificultar o processo de absorção, o que, provavelmente, não acontece com as folhas verdes e do ponteiro, mais fáceis de ocorrer absorção e menor a transmitância.

Para determinar a variedade de cana-de-açúcar ideal para a produção de energia, seria fundamental, a partir do FTIR, fazer o isolamento da lignina para então realizar a sua quantificação.

A composição das fibras de diferentes variedades de cana-de-açúcar se altera conforme o solo onde são cultivadas, as condições ambientais existentes e o material genético do vegetal, alterando, portanto, a qualidade e a quantidade de lignina presente, e consequentemente, o valor do poder calorífico. Por isso a necessidade de se identificar o melhor material lignocelulósico aliado ao ambiente de produção ideal para maximizar o processo de produção de cana-energia.

## 5 CONCLUSÕES

- ✓ A proposta metodológica desenvolvida se aplica ao estudo em questão e é viável para a utilização. Tanto as amostragens a campo como aquelas destinadas à realização das análises em laboratório, sem considerar as especificações técnicas das caldeiras e custos de transporte até a usina, foram úteis para identificar, quantificar e confirmar o potencial energético e as características físico-químicas existentes no palhiço da cana-de-açúcar;
- ✓ A análise granulométrica mostrou-se importante na definição da dimensão das partículas das amostras para padronizá-las na realização das demais análises e dessa forma, não interferir nos resultados;
- ✓ O teor de umidade presente na biomassa influencia significativamente na eficiência do combustível, sendo, portanto, essencial estabelecer o período ideal de secagem a campo;
- ✓ Os dados obtidos com a análise imediata são importantes, pois permitem a caracterização da biomassa e conseqüentemente, a avaliação do rendimento energético de um processo de combustão de materiais lignocelulósicos que dependem também da sua composição química;
- ✓ Os valores de poder calorífico da biomassa do palhiço das duas variedades de cana-de-açúcar apresentam semelhanças em relação aos dados de poder calorífico consultados e obtidos para o bagaço. Dessa forma, é possível complementar o uso do combustível sólido, bagaço, com o palhiço da cana, para uso na indústria sucroalcooleira;
- ✓ Os dados obtidos com a caracterização da biomassa do palhiço da cana-de-açúcar permitem afirmar que o uso do palhiço aumentaria em 20%, para cada variedade, a disponibilidade de material a campo. Além disso, com a média de produtividade estimada em 16 t ha<sup>-1</sup> de palhiço para complementar a atividade combustível, considerando o valor do poder calorífico obtido, por volta de 4000 kcal kg<sup>-1</sup>, poderá ocorrer um aumento direto da eficiência energética na indústria, em um acréscimo equivalente a 80 MWh de energia, depositados no solo. Sendo assim, fica mais uma vez evidente a potencialidade energética do palhiço e a necessidade de definir tecnologias que viabilizem a utilização desta biomassa como combustível sólido em caldeiras.

- ✓ A análise termogravimétrica apresentou-se como técnica fundamental devido às informações referentes ao perfil de queima do material quanto à perda de massa durante o processo de aquecimento, assim como na sua estabilidade térmica;
- ✓ Os espectros no infravermelho indicaram a presença de grupos funcionais como fenóis, álcoois, ácidos, alcanos, cetonas, aldeídos e aromáticos para as duas variedades de cana. No entanto, é preciso estudar metodologias específicas para quantificação e isolamento da lignina para obter melhor conhecimento a respeito da influencia deste componente presente nas fibras das variedades, em relação ao teor de poder calorífico;
- ✓ A microscopia eletrônica de varredura permitiu observar que após a secagem da amostra houve mudança visual na morfologia das células e fibras e da textura macroporosa, comprovando a textura fibrosa característica deste material;
- ✓ O palhiço da cana-de-açúcar, biomassa sólida de interesse para este trabalho, apresentou-se como matéria prima com potencial para aproveitamento energético e industrial. A biomassa encontra-se disponível no campo para ser utilizada e apresenta de fato, atributos físico-químicos relevantes que a caracterizam como combustível sólido importante que poderá ser destinado ao uso em caldeiras.

Portanto, o palhiço da cana-de-açúcar é biomassa sólida importante, com potencial energético relevante que poderá ser útil se aproveitado em caldeiras para complementar a função do bagaço, na indústria sucroalcooleira.

## 6 SUGESTÕES PARA FUTUROS ESTUDOS

- Utilização de metodologias que trabalhem com a possibilidade de estimar o tempo de secagem do palhiço a campo (na região noroeste do Paraná), em que poderá permanecer até atingir o teor de umidade desejável para o uso como combustível sólido;
- Continuidade ao estudo da influência da lignina no poder calorífico, por meio do seu isolamento e quantificação;
- Caracterização da biomassa do palhiço por meio de ensaios que trabalhem com diferentes variedades de cana-de-açúcar do mesmo grupo de maturação, cultivadas nas mesmas condições de solo e adubação, para observar a influência na composição das fibras lignocelulósicas;
- Caracterizar a biomassa do palhiço por meio de ensaios que trabalhem com as mesmas variedades de cana-de-açúcar do mesmo grupo de maturação em condições diferentes de solo e adubação, para observar a influência na composição das fibras lignocelulósicas;
- Estudo da viabilidade econômica para o recolhimento do palhiço no campo e transporte até à indústria;
- Ensaios com mecanismos diferentes de recolhimento do palhiço da cana-de-açúcar em diferentes condições de solo e com as variedades cultivadas na região.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2ª ed. – Brasília; ANEEL, 2005. 243p. Cap.05 p.77-92.

ANDREOLLI, C. **Convergência de Agricultura e Energia: I. Produção de Biomassa Celulósica para Biocombustíveis e Eletricidade**. Economia & Energia. Ano XI – N° 66, 2008.

ASSOCIAÇÃO DA INDÚSTRIA DE COGERAÇÃO DE ENERGIA - COGEN. São Paulo. Disponível em: [http://www.cogen.com.br/cog\\_conceito.asp](http://www.cogen.com.br/cog_conceito.asp). Acesso em: 09 mai. 2011.

ASSUMPÇÃO, R.M.V.; PINHO, M.R.R.; CAHEN, R.; PHILIPP, P. **Celulose e papel: tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. São Paulo, SP: IPT, v.1, 2.ed., 1988. p.169-319

ARONI, A. S. **Avaliação da biomassa e qualidade da madeira do híbrido Pinus tecunumannii x Pinus caribaea var. hondurensis pela técnica de atenuação da radiação gama do 241Am**. 2005. 136 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)- Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

BARROS, E. V. B. **A Matriz Energética Mundial e a Competitividade das Nações - Bases De Uma Nova Geopolítica**. Engevista, v. 9, n. 1, pp. 47-56, junho 2007.

BICCA, R.A. **Identificação Espectrométrica de Compostos Orgânicos**. Rio de Janeiro. Editora LTC, 1994. 387p.

BRASIL. **Lei N. 11.241, DE 19 DE SETEMBRO DE 2002**. Dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar e dá providências correlatas. Disponível em: [http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam2/Repositorio/24/Documentos/Lei%20Estadual\\_11241\\_2002.pdf](http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam2/Repositorio/24/Documentos/Lei%20Estadual_11241_2002.pdf). Acesso em: 29/07/2012.

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. **Relação das unidades produtoras cadastradas no departamento da cana-de-açúcar e agroenergia**. Brasília, 2012. Disponível em: [http://www.agricultura.gov.br/arq\\_editor/file/Desenvolvimento\\_Sustentavel/Agroenergia/Orientacoes\\_Tecnicas/Usinas%20e%20Destilarias%20Cadastradas/DADOS\\_PRODUTORES\\_22-10-2012.pdf](http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/Orientacoes_Tecnicas/Usinas%20e%20Destilarias%20Cadastradas/DADOS_PRODUTORES_22-10-2012.pdf). Acesso em: mar. 2013.

BRAUNBECK, O.A.; CORTEZ, L.A.B. O cultivo da cana-de-açúcar e o uso dos resíduos. In: ROSILLO-CALLE, F; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Uso da biomassa para a produção de energia na indústria brasileira**. Campinas: Unicamp, 2005. p. 215-246.

BRIGHENTI, C. R.F. **Integração do cogenerador de energia do setor sucroalcooleiro com o sistema elétrico**. São Paulo, 2003. 169p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

BUCKERIDGE, M. S.; SANTOS, W. D.; SOUZA, A. P. **As rotas para o etanol**

**celulósico no Brasil.** Departamento de Botânica – IBUSP, 2008. Disponível em: <<http://www.apta.sp.gov.br/cana/coletanea/Buckeridge%5B1%5D.doc>>. Acesso em: 16 ago. 2009.

**CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil:** situação atual, oportunidades e desenvolvimento. CGEE, 2001. Disponível em: <http://www.cgee.org.br>. Acesso em: 15 abr. 2012.

CHEN, W. H.; KUO, P. C. **A study on torrefaction of varios biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by thermogravimetry.** Energy, n.35, p.2580-2586, Taiwan. 2010.

COICEV, L. **Tendências para o uso da palha da cana-de-açúcar.** 08 dez 2008. Disponível em: [http://www.canaldacana.com.br/novo/view/ciencia\\_pesquisa/?act=listar&pag=2&noticia\\_id=466](http://www.canaldacana.com.br/novo/view/ciencia_pesquisa/?act=listar&pag=2&noticia_id=466). Acesso em: 03 jan 2011.

COPERSUCAR 03, 1998, **Economia de Vapor em Usinas de Açúcar; Qualidade de Palha; Enfardamento da Palha; Recuperação e Transporte dos Fardos.** In: Geração de Energia por Biomassa - Bagaço da Cana-de-açúcar e Resíduos, Informativo do Centro de Tecnologia Copersucar, Projeto BRA/96/G31, Piracicaba, São Paulo, Brasil.

CORDEIRO, A. **Etanol para alimentar carros ou comida para alimentar gente?** In: PLATAFORMA BNDES. **Impactos da indústria canavieira no Brasil: poluição atmosférica, ameaça a recursos hídricos, riscos para produção de alimentos, relações de trabalho atrasadas e proteção insuficiente à saúde de trabalhadores.** [S.I.]: Instituto Brasileiro de Análises Sociais e Econômicas, 2008. Cap. 1, p. 9-22.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana 2012/2013:** Disponível em: <http://www.conab.org.br>. Acesso em: 20 nov 2012.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMES, E. O. **Biomassa para energia.** Campinas: Ed. da Unicamp, 2008. 728 p.

COSTA NETO, J. D. da. **A cana em tempo bom.** Revista CREA-PR, Curitiba, n. 41, p. 16-19, out. 2006. Disponível em: <http://issuu.com/creapr/docs/revistacrea41>> Acesso em: 12/09/2012.

COSTA, M.C.G.; VITTI, G.C.; CANTARELLA, H. **Volatilização de N-NH<sub>3</sub> de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.27, n.4, p.631-637, 2003.

CUNHA, M.P.S.C.; PONTES, C.L.F.; CRUZ, I. A.; CABRAL, M. T. F. D.; CUNHA NETO, Z.B.; BARBOSA, A.P.R. **Estudo químico de 55 espécies lenhosas para geração de energia em caldeiras.** In: 3º encontro Brasileiro em madeiras e em estruturas de madeira: Anais, v.2, p. 93-121, São Carlos, 1989.

DANTAS, D. N.; MAUAD, F. F.; OMETTO, A. R. **Potential for generation of thermal and electrical energy from biomass of sugarcane: a exergetic analysis.** In: 11th International Conference on Advanced Material. Anais... Rio de Janeiro, RJ, 2009.

DANTAS, D. N. **Uso da biomassa da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista.** 2010. Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2010.

DEDAVID, B.A.; GOMES, C.I; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura : aplicações e preparação de amostras : materiais poliméricos, metálicos e semicondutores [recurso eletrônico]** – Porto Alegre : EDIPUCRS, 2007.

DUARTE, L. C.; JUCHEM, P. L.; PULZ, G. M.; BRUM, T. M. M.; CHODUR, N.; LICCARDO, A.; FISCHER, A. C.; ACAUAN, R. B. **Aplicações de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Sistema de Energia Dispersiva (EDS) no Estudo de Gemas: exemplos brasileiros.** Pesquisas em Geociências, v. 30, n. 2, p. 3-15, 2003.

EARL, D.E. **Forest Energy and Economic Development.** Clarendon Press Oxford, 1975, 128p.

ELETOBRÁS. **Plano decenal de expansão 2000-2009.** Brasília: Eletrobrás/GCPS Disponível em: <http://www.eletobras.gov.br>. Acesso em 27 de ago. 2012.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Zoneamento Agorecológico da cana-de-açúcar,** 2009. Disponível em: [http://www.cnps.embrapa.br/zoneamento\\_cana\\_de\\_acucar/ZonCana.pdf](http://www.cnps.embrapa.br/zoneamento_cana_de_acucar/ZonCana.pdf). Acesso em: 20 de nov. 2012.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Ampliação da Oferta de Energia através da Biomassa.** São Paulo: FIESP/CIESP, 2001. Disponível em: [http://www.fiesp.com.br/publicacoes/pdf/ambiente/relatorio\\_dma.pdf](http://www.fiesp.com.br/publicacoes/pdf/ambiente/relatorio_dma.pdf). Acesso em 01 nov. 2011.

FENGEL, D.; WENEGER, G. **Wood Chemistry, Ultrastructure, Reactions.** Walter de Gruyter Publisher. New York, p. 613, 1989.

FERREIRA, O. C. **Teor de carbono em combustíveis da biomassa.** Economia e Energia, Rio de Janeiro, n. 57, p. 41-47, 2006.

FURLANI N., V.I.; RIPOLI, T.C.C., VILLA NOVA, N.A. **Biomassa de cana-de-açúcar: energia contida no palhiço remanescente de colheita mecânica.** Revista STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos, Piracicaba, v.15, n.4, p. 24-27, mar./abr.1997.

GARCIA-PEREZ, M. **Fuel Properties of Vacuum Pyrolysis Oils derived from Wood industry residues.** Ph. D. Thesis. Université Laval, 2006.

GEORGES, F. **Caracterização da palha da cana-de-açúcar do Rio Grande do Sul e de seus produtos da pirólise.** Dissertação. Pós-graduação em Ciência dos materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). 120p.2011.

- GOLDEMBERG, J. **Biomassa e Energia**. Química Nova, São Paulo, v. 32, n. 3, p.582-587, 20 fev. 2009.
- GOLDSCHMID, O. Ultraviolet Spectra. In: K.V. Sarkanen e C.H. Ludwig. **Lignins: Occurrence, Formation, Structure and Reactions**. New York: Wiley-Interscience, 1971. p. 241-266.
- GOMIDE, R. **Operações unitárias**, v. 4. São Paulo: Gomide, 1980.
- GRIOULI, NAJLA.; HALOUANI, K.; ZOULALIAN, A.; HALOUANI, F. **Thermogravimetric analysis and kinetics modeling of isothermal carbonization of olive wood in inert atmosphere**. Thermochemica Acta, v. 440, p. 23–30, 2006.
- HASSUANI, S. J.; LEAL, M. R. L. V.; MACEDO, I. C. **Biomass power generation: sugar cane bagasse and trash**. Piracicaba: PNUD Brasil, Centro de Tecnologia Canavieira. 2005. 216 p.
- HAINES, J. P. **Thermal Methods of Analysis: principles, applications and problems**. Blackie Academic Professional, p. 30-35, 1995.
- HENRÍQUEZ, R. J. **Combustíveis** - Departamento de Engenharia Mecânica – Centro de Tecnologia e Geociências (CTG), Universidade Federal de Pernambuco – UFPE. Disponível em: <http://www.ufpe.br/daee/material/maquinasprimarias1/combustao.pdf> Acesso: 10/10/2011.
- HILSDORF, J. W. et al. **Química tecnológica**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004. 340 p.
- INSTITUTO EUVALDO LODI. **Álcool combustível**. Série Indústria em Perspectiva – Brasília: IEL/NC, 2008. 163 p.
- JANK, M.S. **A velha cana-de-açúcar**. Revista Opiniões. Ribeirão Preto: Editora WDS, p.12-16, out-dez. 2007. Disponível em: <http://www.revistaopinioes.com.br/aa/materia.php?id=68>. Acesso em: 25/08/2012.
- JAYARAMAN K. **Manufacturing sisal-polypropylene composites with minimum fibre degradation [J]**. Compos Sci Technol, 2003, 63: 367–374.
- JOSÉ, H. J. **Combustão e combustíveis**. Santa Catarina: Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2004. (Apostila Química Tecnológica Geral).
- KOBLITZ, L.O. **Contra fatos não há argumentos**. Jornal de Piracicaba. Caderno Opinião, 22 de jul. 2004. Citado por GERMEK, H.M. et al. Análise de decisão sobre o aproveitamento da biomassa Canavieira, para fins de cogeração (s/d). In: XLIII CONGRESSO DA SOBER “Instituição, eficiência, Gestão e Contratos no Sistema Agroindustrial.



- KOOPMANS, A.; KOPPEJAN, J. **Agricultural and forest residues: Generation, utilization a availability**. In: Regional consultation on modern applications of biomass energy, Kuala Lumpur, 1997. Paper. Kuala Lumpur: FAO, 1997. 23p.
- LAMONICA, H.M. **Geração de eletricidade a partir da biomassa de cana-de-açúcar**. 2005. Disponível em: <http://www.inee.org.br>. Acesso em: 13/09/2012.
- LANZOTTI, C. R. **Uma análise energética de tendências do setor sucroalcooleiro**. 2000. 95 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos)-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.
- LEME, R.M. **Estimativa das emissões de poluentes atmosféricos e uso de água na produção de eletricidade com biomassa da cana-de-açúcar**. 2005. 144f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005.
- LIMA, A. D. de. **Otimização do aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar**. 2009. 76f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2009.
- LORA, E. E. S. **Tecnologia e Aplicação Racional da Energia Elétrica e de Fontes Renováveis na Agricultura**. In: Odivaldo José Seraphim. (Org.). Tecnologia e Aplicação Racional de Energia Elétrica e de Fontes Renováveis na Agricultura. Campina Grande, Paraíba: UFPB, v. 1, pp. 97-134, 1997.
- LORA, E. E. S., Nogueira, L. A. H. **Dendroenergia Fundamentos e Aplicações**. Interciência, Rio de Janeiro, 2ª ed, 2003.
- MARTINS, R. **Energia produzida a partir do bagaço da cana é economicamente viável**. Agência USP: 2009. Disponível em: <<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=energiaproduzida-partir-bagacocana-economicamente-viavel&id>>. Acesso em: 18 jun. 2010.
- McCABE, W.L., SMITH, J. C., HARRIOTT, P., *Unit Operations of Chemical Engineering*, 4th Ed., McGraw-Hill International Book Co., Singapore, 1976.
- MCKENDRY, P., 2002. **Energy production from biomass** (part 1): overview of biomass. Bioresource Technology Vol. 83: 37-46.
- MANO, E. B. **“Polímeros como Materiais de Engenharia”**. São Paulo: Edgard Blücher, 1991.
- MARAFON, A. C. **Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar : uma introdução ao procedimento prático** / Anderson Carlos Marafon. – Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2012. 29 p. (Documentos / Embrapa Tabuleiros Costeiros, ISSN 1678-1953; 168). Disponível em [http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes\\_2012/doc\\_168.pdf](http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2012/doc_168.pdf)

MICHELAZZO, M. B; BRAUNBECK, O. A. **Análise de seis sistemas de recolhimento do palhiço na colheita mecânica da cana-de-açúcar.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, PB, v. 12, n. 5, p. 546-552, 2008.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional 2011 - Ano Base 2010: Resultados Preliminares.** Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Rio de Janeiro: MME/EPE, 2011.

MOHAN, D.; PITTMAN, C. U.; STEELE, P. H., **Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review;** Energy & Fuels, 2006, 20, p 848-889.

NETO, V.C., RAMON, D. **Análise de Opções Tecnológicas para Projetos de Cogeração no Setor Sucro-alcooleiro.** Winrock International Institute For Agricultural Development; SETAP Brazil Representation; maio, 2002.

OUAJAI, S.; SHANKS, A. **Composition, structure and thermal degradation of hempcellulose after chemical treatments.** Polymer Degradation and Stability, v. 89, p. 327-335, 2005.

PAOLIELLO, J. M. M. **Aspectos ambientais e potencial energético no aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira.** 2006. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial)-Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2006.

PELLEGRINI, M. C. **Inserção de centrais cogradoras a bagaço de cana no parque energético do estado de São Paulo:** exemplos de aplicações de metodologia para análise dos aspectos locacionais e de integração energética. 2002. 168 f. Dissertação (Mestrado em Energia)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

PEREIRA JR., V.P. **Alternativas para a cogeração de energia em uma indústria de chapas de fibra de madeira.** 2001. 100 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

PRIETO, M. G. **Alternativas de Cogeração na Indústria Sucro-Alcooleira,** Estudo de Caso. 2003. 280f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 2003.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. **Poder calorífico da madeira e de resíduos lignocelulósicos.** Biomassa & Energia, v.1, n.2, p.173-182, 2004.

RAMOS, L P. **The chemistry involved in the steam treatment of lignocellulosic materials.** Química. Nova, Vol. 26, No. 6, 863-871, 2003.

REDE INTERUNIVERSITÁRIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO SETOR SUCROALCOOLEIRO – RIDESA – **Catálogo nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar (Março 2010).** 136 p. Curitiba, 2010. Disponível em: <http://canaufv.com.br/catalogo/catalogo-2010.pdf>. Acesso: 12/11/11.

- RIPOLI, T.C.C. **Utilização do material remanescente da colheita da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) – Equacionamento dos balanços energético e econômico**. Piracicaba, 1991. 150p. Tese (Livre-Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- RIPOLI, T.C.C. Projeto Programa de Pesquisa em Políticas Públicas – **II Workshop Tecnológico sobre Colheita de Cana-de-açúcar e Palha para Produção de Etanol** - ESALQ – USP, 2001.
- RIPOLI, M. L. C. **Mapeamento do palhiço enfardado de cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) e do seu potencial energético**. Piracicaba, 2002. 91p. **Dissertação** (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. 2002.
- RIPOLI, M. L.; RIPOLI, T. C.; GAMERO, C. A. **Colheita integral: Retrocesso ou barateamento do sistema?** IDEANews, Ribeirão Preto, Ano 4; nº 28; p 66-67. Jan/2003.
- RIPOLI, M. L. C. **Ensaio de dois sistemas de obtenção de biomassa de cana-de-açúcar (*saccharum spp*) para fins energéticos**. 2004, 213 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrárias. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2004.
- RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar colheita, energia e ambiente**. Barros e Marques Ed. ELET. Piracicaba, Cap. 2. 2004. 302p.
- RIPOLI, T. C.; RIPOLI, M. L.C; CASAGRANDE, D. V.; IDE, B. Y. **Plantio de cana-de-açúcar: estado da arte**. Piracicaba: Livroceres, 2006, 216p.
- ROCHA, D. **Colheita de cana: mecanizar ou humanizar**. 2007. Disponível em: <http://www.zootecniabrasil.com.br/sistema/modules/wfsection/article.php?articleid=35>. Acesso em: 05 jun. 2011.
- RODRIGUES, L. D.; SILVA, I. T. da; ROCHA, B. R. P. da; SILVA, I. M. O. da. **Uso de briquetes compostos para produção de energia no Estado do Pará**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. Disponível em: <http://www.feagri.unicamp.br/energia/agre2002/pdf/0079.pdf>. Acesso em: 13 set. 2011.
- ROSA, A. V. **Energia derivada do aguapé**. Silvicultura, p.179-183, dez.1977. Edição especial. In: **Biomassa de cana-de-açúcar colheita, energia e ambiente**. Barros e Marques Ed. ELET. Piracicaba, Cap. 2. 2004. 302p.
- ROSSEL, C. E. V. **O Setor sucroalcooleiro e a produção de etanol**. Transformação após Protocolo de Kioto. Disponível em: [http://www.cori.unicamp.br/brasiljapao3/palestras/carlos\\_rossel.ppt](http://www.cori.unicamp.br/brasiljapao3/palestras/carlos_rossel.ppt). Acesso em:13/09/2012.
- ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Uso da Biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Tradução José Dilcio Rocha e Maria Paula G. D. Rocha.- Campinas-SP: Editora UNICAMP, 2005. Tradução de: Industrial uses of biomass energy: the example of Brazil.

SAAD, M. B. W.; GONÇÁLVES, A. R. **Estudo cinético da polpação solvente da palha da cana pré-tratada por *Ceriporiopsis subvermispora***. In: ANAIS DO VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA. 2005.

SANTIAGO, F. L. S. **Estudo da viabilidade técnica e econômica para aproveitamento de cascas de *Eucalyptus* gerados no processo de fabricação de painéis de madeira**. 2007. 89 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

SILVA, R., HARAGUCHI, S. K., MUNIZ, E. C., RUBIRA, A.F. **Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos**. In: Química Nova, v.32, nº3, 661-671, 2009.

SILVERSTEIN, R. M., BASSELER, G. C., MORRILL, T. C. Identificação espectrométrica de compostos orgânicos. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1979. 299p.

SOLOMONS, G.; FRYHLE, C. **Química orgânica**. V.2, 3ªed. Rio de Janeiro. Editora LTC, 2001.

SOUZA, Z. J. de; AZEVEDO, P. F.de. **Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas**. Rev. Econ.Sociol. Rural., Brasília, v. 44, n. 2, p.179-199, 2006a.

SJÖSTRÖM, E. **Wood Chemistry Fundamentals and Applications**, Orlando Academic Press, New York, p. 289, 1981.

TEIXEIRA, D. E.; COSTA, A. F.; SANTANA, M. A. E.; **Aglomerados de bagaço de cana-de-açúcar: resistência natural ao ataque de fungos apodrecedores**, Scientia Forestalis 1997, 52, 29.

TOLENTINO, G. **Programação linear inteira aplicada ao aproveitamento do palhiço da cana-de-açúcar**. 2007. 70 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

TOLMASQUIM, M. T.. As origens da crise energética brasileira. Ambiente e Sociedade, v. 6/7, p. 179-184, Campinas, SP, 2000.

TOMIYAMA, M. **Síntese e Caracterização de nanovidros de sílica para preforma de fibra ótica**. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia de Materiais. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

UNIAO DAS INDÚSTRIAS DE CANA-DE-AÇÚCAR - ÚNICA. **Cana-de-açúcar: o novo paradigma de energia limpa e renovável**. São Paulo, 2008b. Disponível em: <http://www.portalunica.com.br/files/estatisticas>. Acesso em: 02 set.2011.

VASCONCELOS, G. C. de; VERÍSSIMO, L. A. C.; SILVEIRA, A. A.; BIANCHINI, S. **Energia lignocelulósica da biomassa: uma perspectiva sustentável**. Revista Brasileira Agroecologia, Porto Alegre, v.2, n.1, p.1017-1020, 2007. Apresentado no CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROECOLOGIA, 2., 2007.

VIAN, C. E. F. **Energia Elétrica**. Agência de Informação EMBRAPA – Ministério da Agricultura. Disponível em: < [http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_131\\_22122006154842.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_131_22122006154842.html)>. Acesso em: 12/08/2012.

WACLAWOVSKY, A.J.; SATO, P.M.; LEMBKE, C.G.; MOORE, P.H.; SOUZA, G.M. **Sugarcane for bioenergy production: an assessment of yield and regulation of sucrose content**. Plant Biotechnology Journal (2010) 8, pp. 263–276.

WENDLANDT, W.W. **Thermal analysis**. 3.ed. New York: John Wiley & Sons, 1986. p.1. (Chemical analysis, v.19).

WU, Y. P.S., Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, **The structural and thermal characteristics of wheat straw hemicelluloses**, 88, 2010, p. 134-139.