



João Paulo Soto Veiga

Caracterização de resíduos de colheita da mandioca (*Manihot esculenta* CRANTZ) e avaliação do potencial de co-geração de energia no processo de produção de etanol

102/2012

Campinas
2012



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

João Paulo Soto Veiga

Caracterização de resíduos de colheita da mandioca (*Manihot esculenta* CRANTZ) e avaliação do potencial de co-geração de energia no processo de produção de etanol

Orientador: Prof. Dr. Waldir Antonio Bizzo

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Térmica e Fluidos.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A VERSÃO
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO
ALUNO JOÃO PAULO SOTO VEIGA E ORIENTADA
PELO PROF. DR. WALDIR ANTONIO BIZZO



ASSINATURA DO ORIENTADOR

Campinas, 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

V533c Veiga, João Paulo Soto
Caracterização de resíduos de colheita da mandioca
(Manihot esculenta CRANTZ) e avaliação do potencial
de co-geração de energia no processo de produção de
etanol / João Paulo Soto Veiga. --Campinas, SP: [s.n.],
2012.

Orientador: Waldir Antonio Bizzo.
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Biomassa. 2. Energia. 3. Combustão. I. Bizzo,
Waldir Antonio. II. Universidade Estadual de Campinas.
Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Cassava's (Manihot esculenta Crantz) crop residues evaluation
and characterization and the potential for energy co-generation
in the production process of ethanol

Palavras-chave em Inglês: Biomass, Energy, Combustion

Área de concentração: Térmica e Fluidos

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Arnaldo César da Silva Walter, Thiago Libório Romanelli

Data da defesa: 10-09-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E FLUIDOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

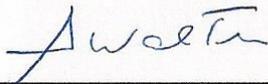
**Caracterização de resíduos de colheita da
mandioca (*Manihot esculenta* CRANTZ) e
avaliação do potencial de co-geração de
energia no processo de produção de etanol**

Autor: João Paulo Soto Veiga
Orientador: Waldir Antonio Bizzo

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação



Prof. Dr. Waldir Antonio Bizzo, Presidente
Instituição: FEM-UNICAMP



Prof. Dr. Arnaldo César da Silva Walter
Instituição: FEM-UNICAMP



Prof. Dr. Thiago Libório Romanelli
Instituição: ESALQ-USP

Campinas, 10 de setembro de 2012

Dedico este trabalho aos meus pais,
Tobias Leão Veiga e Ilda Soto Veiga.
Que sempre me apoiaram e incentivaram
à estudar, vendo no saber e na educação
seu grande e verdadeiro valor.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. Dr. Waldir Antonio Bizzo por todo o apoio, paciência, ensinamentos, conversas, e orientação (efetiva) não somente na vida acadêmica, mas também como ser humano.

Aos professores que tanto me ensinaram no começo desta caminhada. Assim como aos colegas de departamento, em especial à Rafael Piatto Berton e Danilo Carvalho.

Ao IAC nas pessoas da Dra. Tereza Losada Valle e do Dr. José Carlos Feltran pelo imprescindível apoio para a realização deste trabalho.

A equipe de funcionários da FEM pelo auxílio nas análises e total apoio durante todo o período em que estive na Unicamp, em especial a Claudenete por atender a todos os meus pedidos de intermináveis amostras.

A todos o que moraram comigo durante este tempo em Campinas, Patrick e Alexandre e posteriormente na república CG, Cirano, Tomé, Tião, Megeto e ao grande irmão Bacani. Assim como a todas as respectivas que frequentavam o aconchego do nosso lar, Mariana, Sheila, Dani Lins e Fernanda. Assim como ao Gaúcho e Cajuru, que embora fossem poucas vezes em casa sempre tiveram presença marcante e agradável.

A Natália, por toda a amizade, paciência e momentos alegres vividos, não somente nesses dois curtos anos, mas desde a época do colegial, assim como a sua irmã, Mariana.

A todo o coral Zíper na Boca na pessoa da nossa maestrina Vivian Nogueira Dias, sem o qual esses anos não teriam a mesma doçura, alegria e sentido. Deixa-lo foi muito doloroso, porém terei sempre a satisfação de ter participado de um grupo tão talentoso e onde fiz amigos tão especiais para toda a vida.

Por fim, a minha namorada, amiga e companheira, Juliana P. S. Santos que faz com que eu veja o mundo de forma mais alegre e me sinta uma pessoa completa.

“É tudo um sonho,
tudo uma sombra
uma ideia.
Autor, ator e plateia.
Espero que o pano caia
pra sair batendo palmas
ou romper na maior vaia
ou dizer, muito ao contrário,
que espetáculo mais frouxo
nem merece comentário”

Samba Abstrato (trecho)
Dr. Paulo Vanzolini

Resumo

Este trabalho caracterizou os resíduos de campo da cultura de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) para sua utilização energética através de análises de produtividade em campo, umidade em campo, análise elementar e análise imediata, análise de extrativos, hemicelulose, celulose e lignina, poder calorífico, análise dos componentes das cinzas e análise termogravimétrica, para três diferentes variedades de mandioca (IAC-90; IAC-14; Clone 48/98) colhidas em três diferentes períodos após o plantio (12, 18 e 24 meses). Além disso, foi elaborado um fluxograma do processo de produção de etanol de raízes de mandioca e a energia fornecida pelos resíduos de campo foi comparada à energia necessária para o suprimento da fase industrial. Foi então calculada a produção de energia elétrica excedente de um ciclo de co-geração de energia térmica e elétrica. Os resíduos analisados provêm de um plantio comercial situado na cidade de Echaporã-SP e foram divididos em três partes distintas da planta: cepa, ramos grossos e ramos finos. Cada amostra foi cominuída com a finalidade de homogeneizá-la para realização das análises. Os resíduos de mandioca apresentaram-se com os parâmetros tecnológicos análogos aos de biomassas analisadas anteriormente por outros autores, pressupondo baixo ponto de fusibilidade das cinzas e possibilidade de depósitos e incrustações nos equipamentos de combustão, baseando-se na análise dos componentes das cinzas. O ciclo térmico proposto gera vapor a 45 bar e 460°C, com extração a 2,5 bar e 127°C para suprir a energia térmica do processo. Foi selecionada a variedade IAC 14 com colheita em 12 meses por apresentar os melhores resultados. Obtiveram-se os montantes de 451 kg de resíduo (b.s.) para cada Mg de raiz (b.u.) os quais geram 1.387 kg de vapor total, destes, 735 são extraídos para o processo. A energia elétrica obtida com estes resíduos é de 871,6 MJ dos quais são utilizados 148,5 MJ para a autossuficiência da usina, disponibilizando-se 723,2 MJ à comercialização na rede distribuída por tonelada de mandioca processada. Para uma usina com produção de 600.000 l por dia de etanol 95,6°GL pode ser produzido um excedente de 2.097 GJ por dia (equivalente a 24 MW de potência elétrica).

Palavras Chave: Biomassa; Energia; Combustão.

Abstract

This study characterized the cassava (*Manihot esculenta* Crantz) waste field for their energy use through analysis of field productivity and moisture, elemental and proximate analysis, analysis of extractives, hemicellulose, cellulose and lignin, low and high heat values, ash components and thermogravimetric analysis, for three different cassava varieties (IAC-90, IAC-14, Clone 48/98) harvested in three different periods after planting (12, 18 and 24 months). In addition, we designed an ethanol process flowchart of producing ethanol from cassava roots and the energy provided by waste field was compared to the energy needed to supply the industrial phase. It was also calculated the co-generation power cycle surplus of thermal and electrical energy. Analyzed residues came from a commercial plantation located in the city of Echaporã-SP and were divided into three distinct parts of the plant, cepa, thick branches and thin branches. Each sample was comminuted in order to homogenize it for analyzes. The cassava residue showed technological parameters similar to previously biomasses analyzed by other authors, assuming low point of ash fusion and possibility of deposits and incrustations on the combustion equipment, based on analysis of the components of the ash. The thermal cycle proposed generates steam at 45 bar and 460 ° C, with extraction at 2.5 bar and 127 ° C to supply heat energy in the process. IAC 14 variety with harvest in 12 months was selected by presenting the best results. Were obtained 451 kg of residue (b.s.) for each root Mg (b.u.) which generate 1,387 kg of, and them, 735kg of steam are extracted for the process. The electrical energy obtained with these residues is 871.6 MJ of which are used 148.5 MJ for plant self-sufficiency, providing 723.2 MJ to marketing network distributed per ton of cassava roots processed. For a plant with production of 600,000 liters per day of ethanol 96.6 ° GL it's produced a surplus of 2,170 GJ per day (equivalent at 25 MW of electric energy).

Keywords: Biomass, Energy, Combustion.

Lista de figuras

Figura 2.1: Planta de mandioca	8
Figura 2.2: Exemplo de curvas de TGA para diferentes taxas de aquecimento para bagaço de cana-de-açúcar, adaptado de Garcia-Pères et al. (2000).....	16
Figura 2.3: Exemplo de curvas de DTG para bagaço de cana-de-açúcar com taxa de aquecimento de 10°C por minuto e influência dos seus principais constituintes, adaptado de Garcia-Pères et al. (2000)	16
Figura 3.1: Temperatura de fusibilidade de cinzas e o índice B/A (Adaptado de Kupka et al. 2008).....	27
Figura 3.2: Fluxograma simplificado da produção de etanol de mandioca com os processos, temperaturas e fluxo de massa.....	31
Figura 3.3: Fluxograma de produção de energia	38
Figura 4.1: Distribuição granulométrica do material cominuído	43
Figura 4.2: Gráfico de TGA e DTG dos resíduos de mandioca em atmosfera inerte	54
Figura 4.3: Gráfico de TGA e DTG dos resíduos de mandioca em atmosfera oxidante.....	55
Figura 4.4: TGA do material em atmosfera inerte e oxidante.....	56
Figura 4.5: Curvas de DTG inerte e oxidante e indicação do ponto de ignição.....	57
Figura 4.6: Fluxo de energia elétrica e térmica para uma tonelada de mandioca processada	61

Lista de tabelas

Tabela 1.1: Maiores produções de mandioca em 2010	2
Tabela 1.2: Produção brasileira das cinco maiores culturas agrícolas em 2011 e 2012 (estimada)	3
Tabela 1.3: Produção nacional de mandioca por região	3
Tabela 2.1: Relação entre produção de raízes e resíduos (b.u.).....	12
Tabela 2.2: Análise imediata da algumas biomassas (% em massa)	14
Tabela 2.3: Análise elementar de algumas biomassas (% em massa).....	14
Tabela 2.4: Poder calorífico superior de algumas biomassas.....	15
Tabela 2.5: Composição das cinzas e índice alcalino de algumas biomassas	18
Tabela 2.6: Consumo de energia por etapa de produção de etanol de mandioca	20
Tabela 2.7: Produtividade de etanol de mandioca.....	21
Tabela 2.8: Produtividade e rendimento de etanol de algumas culturas	22
Tabela 3.1: Etapas e eficiências utilizadas para o cálculo do fluxo de massa.....	33
Tabela 3.2: Potências dos motores instalados nas etapas de produção de etanol de mandioca (60.000 L dia-1).....	34
Tabela 4.1: Parâmetros agronômicos da primeira colheita.....	39
Tabela 4.2: Teor de matéria seca (%) em massa (colheita após 12 meses).....	40
Tabela 4.3: Parâmetros agronômicos da segunda colheita.....	40
Tabela 4.4: Teor de matéria seca (%) em massa (colheita após 18 meses).....	40
Tabela 4.5: Parâmetros agronômicos da terceira colheita,	40
Tabela 4.6: Teor de matéria seca (%) em massa (colheita após 24 meses).....	40
Tabela 4.7: Síntese dos parâmetros agronômicos da produção de raiz e resíduos	42
Tabela 4.8: Resultados obtidos na análise imediata para resíduos de mandioca de três variedades, três partes da planta em três colheitas	44
Tabela 4.9: Comparação entre dados obtidos por Pattiya (2011) e este trabalho para análise imediata de diferentes partes de resíduos de mandioca	44
Tabela 4.10: Resultados obtidos na análise elementar para resíduos de mandioca de três variedades, três partes da planta em três colheitas	46

Tabela 4.11: Comparação entre dados obtidos por Pattya (2011) e este trabalho para análise elementar de diferentes partes de resíduos de mandioca.....	47
Tabela 4.12: Análise elementar das cinzas geradas de cepa e ramas finas e grossas de mandioca	49
Tabela 4.13: Valores da relação entre óxidos (básicos e ácidos) e Índice Alcalino.....	50
Tabela 4.14: Composição de celulose, hemicelulose, lignina e extrativos da planta de mandioca	51
Tabela 4.15: Comparação entre dados obtidos por Pattya (2011) e este trabalho para análise de celulose, hemicelulose e lignina de diferentes partes de resíduos de mandioca.....	52
Tabela 4.16: Poder calorífico superior para as diferentes partes da planta analisadas.....	52
Tabela 4.17: Comparação entre dados obtidos por Pattya (2011) e este trabalho para poder calorífico superior de diferentes partes de resíduos de mandioca	53
Tabela 4.18: Resumo das condições sugeridas de vapor nos processos de fabricação de etanol de mandioca para uma planta de capacidade de 600.000 l por dia	58
Tabela 4.19: Valores de consumo energético específico por tipo de energia e etapa do processo	58
Tabela 4.20: Energia total (elétrica e térmica) consumida por etapa	59
Tabela 4.21: Índices de produtividade por ha-1ano-1 para as culturas da mandioca e cana-de-açúcar	62

Lista de Abreviaturas e siglas

Abreviações

PCS – Poder calorífico superior

PCI – Poder calorífico inferior

TGA – Análise termogravimétrica

DTG – Derivada da curva de análise termogravimétrica

b.u. – Base úmida

b.s. – Base seca

B/A – Relação entre óxidos básicos e ácidos

AI – Índice alcalino

DSC – Análise diferencial termogravimétrica

FC – Fora de correlação;

M – Valor médio de possibilidade de formação de deposição e incrustação;

A – Valor alto de possibilidade de formação de deposição e incrustação.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Situação atual da cultura da mandioca no Brasil e no mundo.....	2
1.2	Produção de etanol a partir de mandioca.....	4
1.3	Utilização da parte aérea da mandioca.....	5
1.4	Justificativa e objetivo.....	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1	Utilização de resíduos culturais para geração de energia.....	6
2.2	Descrição da planta.....	7
2.3	Caracterização fitotécnica, de tratos culturais e colheita da mandioca.....	9
2.4	Restrições tecnológicas.....	10
2.5	Produtividade da parte aérea e de raízes.....	11
2.6	Caracterização da biomassa.....	13
2.6.1	Imediata e elementar.....	13
2.6.2	Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI).....	14
2.6.3	Análise termogravimétrica (TGA).....	15
2.6.4	Fusibilidade de cinzas.....	17
2.7	Processo de produção de etanol por fontes amiláceas.....	18
2.7.1	Utilização de energia no processo de produção de etanol de mandioca.....	20
2.7.2	Produção de etanol de algumas culturas.....	21

2.8	Etanol de material celulósico.....	23
3	METODOLOGIA.....	24
3.1	Plantio.....	24
3.2	Caracterização dos resíduos.....	25
3.2.1	Análise elementar.....	25
3.2.2	Análise imediata.....	25
3.2.3	Composição de Cinzas e Fusibilidade.....	25
3.2.4	Poder Calorífico Superior (PCS).....	28
3.2.5	Análise de Extrativos, Lignina, Celulose e Hemicelulose.....	28
3.2.6	Análise Termogravimétrica em Ambiente Oxidante e Inerte (TGA).....	29
3.3	Balço de energia na fábrica de etanol de mandioca.....	29
3.3.1	Preparação das raízes.....	32
3.3.2	Sacarificação do amido.....	32
3.3.3	Fermentação e destilação do etanol.....	33
3.3.4	Energia elétrica necessária.....	34
3.3.5	Energia térmica necessária.....	35
3.3.6	Quantidade de combustível necessário e energia disponível.....	35
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1	Análise da produção no campo.....	39
4.2	Granulometria.....	43
4.3	Análise imediata.....	43

4.4	Análise elementar	45
4.5	Composição de cinzas e fusibilidade.....	49
4.6	Análise de Extrativos, Lignina, Celulose e Hemicelulose.....	50
4.7	Poder calorífico superior	52
4.8	Análise termogravimétrica	53
4.9	Balço de energia em uma fábica de etanol de mandioca.....	57
4.10	Fluxo de energia na indústria.....	59
4.11	Produção de etanol e energia por área	62
5	CONCLUSÃO.....	63
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

A sociedade atual apresenta crescente consumo de energia, a qual atualmente provém, em sua maioria, de fontes ditas não renováveis (combustíveis fósseis como petróleo e carvão mineral) principais responsáveis pelo aumento da concentração de CO₂ na atmosfera e consequentemente do aquecimento global (IPCC, 2007).

Resíduos da produção de culturas agrícolas, resíduos de madeira, culturas exclusivamente energéticas e resíduos sólidos residenciais são considerados como biomassa (Easterly e Burnham, 1996), neste trabalho foram denominados de biomassa os resíduos da colheita da mandioca.

Dentro dessa realidade vem-se buscando fontes alternativas para suprimento energético e a utilização da biomassa mostra-se como uma opção, e, segundo Berndes et al. (2003), tem despertado novo interesse a partir da década de 90 como forma de mitigação das mudanças climáticas globais.

A biomassa pode ser utilizada em diversas formas, desde a queima direta em fornos e caldeiras, gaseificação e pirólise ou ainda a transformação biológica de açúcares em etanol para fins energéticos e a digestão anaeróbia para geração de biogás.

Tal prática já é encontrada no setor de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) que é largamente cultivada no Brasil e utilizada para a produção de açúcar e etanol. O resíduo da moagem da cana, o bagaço, é utilizado como fonte de energia em todo o processo industrial de produção de açúcar e etanol e, em alguns casos, comercializa-se a energia elétrica excedente.

Atualmente no Brasil a cana-de-açúcar é amplamente utilizada como matéria prima para a produção de etanol para fins de abastecimento da frota nacional de veículos, tanto para sua utilização plena assim como aditivo na gasolina utilizada nacionalmente.

Dentro do processo de adoção de novas matérias primas e sua utilização como combustível, devem-se analisar diversos aspectos. Dentre eles, o impacto ambiental, assegurando-se de que tal combustível não é mais prejudicial ao ambiente e à sociedade do que os combustíveis já utilizados (emissão de CO₂, NO_x, SO_x, entre outros poluentes). Assim como se faz necessária a análise do balanço energético da produção deste combustível.

Desta forma, potenciais fontes de energia foram avaliadas anteriormente demonstrando em alguns casos que a forma como o etanol é produzido atualmente pode ser energeticamente inviável como no caso do etanol de milho (Pimentel, 2003).

Dentro de tal cenário, hoje, a maioria dos países, desenvolvidos ou não, promove ações para a redução do consumo de combustíveis fósseis tanto para a redução de emissão de CO₂ quanto para a redução da dependência energética de países produtores de petróleo (Cortez et al., 2009).

Sendo assim, demais fontes de combustível devem ser estudadas para a verificação de sua viabilidade para que se possa firmar um mercado mais sólido e não dependente somente de uma matéria prima, utilizando, por exemplo, a mandioca, objeto deste estudo.

1.1 Situação atual da cultura da mandioca no Brasil e no mundo

A mandioca é uma planta domesticada a cerca de sete mil anos pelos povos pré-colombianos. Dentre suas principais características favoráveis estão a capacidade de armazenar grandes quantidades de amido em suas raízes e a fácil propagação vegetativa (Valle et al., 2009).

O Brasil apresenta-se como o segundo maior produtor mundial desta cultura com 10% de toda a produção mundial, atrás somente da Nigéria. Além destes, Indonésia e Tailândia apresentam-se como os quatro maiores produtores mundiais (FAO, 2012), como pode ser observado na Tabela 1.1, e dentro das culturas agrícolas brasileiras esta é a quarta maior em volume de produção logo após cana-de-açúcar, soja e milho (*Zea mays* L.) Tabela 1.2.

Tabela 1.1: Maiores produções de mandioca em 2010

País	Produção (Mg)
Nigéria	37.504.100
Brasil	24.354.000
Indonésia	23.908.500
Tailândia	22.005.700
Congo	15.049.500

FAOSTAT, 2012

Tabela 1.2: Produção brasileira das cinco maiores culturas agrícolas em 2011 e 2012 (estimada)

Cultura	Produção (Mg)	
	2011	2012
Cana	715.143.562	743.312.874
Soja(grão)	74.941.773	66.410.069
Milho(grão)	56.272.440	67.256.210
Mandioca	25.329.667	25.882.940
Arroz	13.444.425	11.589.424

IBGE, 2012.

A cultura da mandioca no Brasil é, em sua maioria, realizada por pequenos agricultores e tradicionalmente voltada para a alimentação humana, tanto na forma *in natura*, amido e seus derivados quanto como em farinha.

Os maiores produtores de mandioca do Brasil são os estados do Para, Paraná e Bahia que respondem por aproximadamente 50% da produção nacional. Na Tabela 1.3 são mostrados os dados de produção nacional por região.

Tabela 1.3: Produção nacional de mandioca por região

Região	Produção (Mg)	
	2009	2010
Nordeste	8.178.392	8.055.084
Norte	7.147.034	6.810.636
Sul	5.488.778	5.857.229
Sudeste	2.236.280	2.410.832
Centro	1.353.497	1.390.537
Oeste		

IBGE, 2012.

Os índices de produtividade variam conforme a tecnificação empregada no manejo da lavoura e oscilam entre 15 e 23 Mg ha⁻¹, contudo alguns produtores alcançam níveis de 55 Mg ha⁻¹ (Valle et al. , 2009).

1.2 Produção de etanol a partir de mandioca

Atualmente a produção de etanol a partir de raízes de mandioca encontra-se em desenvolvimento e sem grande expressividade no mercado brasileiro e mundial. A maioria das usinas utilizam principalmente milho (USA) e cana-de-açúcar (Brasil) (OECD/FAO, 2011), contudo, estudos realizados desde a década de 1980 demonstram o potencial da utilização de mandioca para tal fim.

Em países da Ásia como China e Tailândia, já está em fase de implantação e adoção o uso dessa matéria prima para a produção de etanol. Atualmente na Tailândia a mandioca é utilizada em 10% da produção de etanol. Este número deve aumentar para 90% após a implantação e funcionamento de usinas que utilizem somente raízes de mandioca na fabricação de etanol (APEC, 2008).

Na China, a política de segurança alimentar está inibindo a implantação de mais usinas que produzam etanol a partir de milho onde, atualmente, aproximadamente 80% da produção de etanol do país utiliza tal matéria prima. Para tal restrição ao uso do milho outras fontes são estudadas como mandioca, sorgo sacarino (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) e batata doce (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) (APEC, 2008).

Salla et al. (2010) mostraram que na produção de etanol a partir de raiz de mandioca, para cada unidade de energia consumida na produção agrícola e processamento desta são obtidas 1,76 unidades de energia no etanol produzido. Este índice pode ainda ser melhorado através da utilização de resíduos de campo da mandioca para produção total ou parcial da energia consumida no processamento industrial. Dai et al. (2006) encontraram uma relação de 9,8 J produzidos para cada 1 J utilizado na produção de etanol de mandioca utilizando no sistema a produção de energia por biogás dos resíduos do processamento da raiz de mandioca.

1.3 Utilização da parte aérea da mandioca

Resíduos da agricultura são uma substancial fonte de energia para várias aplicações e podem ser utilizados no estabelecimento para autossuficiência ou distribuir energia regionalmente (Easterly e Burnham, 1996).

Estes podem ser utilizados parcialmente para a manutenção das propriedades agronômicas do solo, contudo, em muitos casos, tal material é queimado evitando-se a proliferação de pragas, doenças ou para facilitar os tratos culturais.

Em geral aproveita-se comercialmente somente a raiz da mandioca, seja para consumo *in natura* ou fabricação de farinha ou fécula, 20% dos ramos produzidos são utilizados como maniva (maniva é um ramo de mandioca apto a ser usado para a multiplicação da planta através do brotamento de uma gema deste ramo) para o plantio, o restante dos ramos, 80%, e a cepa (maniva utilizada no plantio da lavoura que se está colhendo, a qual apresenta aspecto mais lenhoso e engrossamento em relação ao material que foi plantado) são totalmente descartados contribuindo para a ciclagem de nutrientes ou são utilizados para alimentação animal no caso dos ramos.

Estudos anteriores demonstraram o potencial da utilização deste material como fonte de energia (Serra et al. 1978, Brasil, 1980, Boog et al., 2007 e Pattiya, 2011), a qual pode ser utilizada na produção de etanol de mandioca com a produção da energia térmica necessária no processo.

Estudos realizados na década de 1970 e 1980 já analisaram a viabilidade da produção de etanol por raízes de mandioca (Silva et al., 1976; Serra et al., 1978; Brasil 1980). No entanto, as conclusões obtidas não indicavam a mandioca como uma matéria-prima atraente dado a sua baixa produtividade em campo, admitida como aproximadamente $12 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ sendo que atualmente é possível obterem-se médias superiores a $30 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ou mais, justificando uma nova avaliação da produção de etanol por raízes de mandioca.

Utilizando como exemplo o setor canavieiro, neste trabalho estuda-se a possibilidade de suprimento energético de uma planta de fabricação de etanol de mandioca por seus resíduos e a caracterização desta biomassa para sua utilização como fonte de energia.

1.4 Justificativa e objetivo

Tendo em vista a grande produção de material remanescente em campo devido a grande produção nacional, e a atual busca pela utilização de fontes renováveis de energia, como a biomassa, juntamente com a necessidade de informações sobre o material combustível para o desenvolvimento e modelagem dos processos de termoconversão, são necessários estudos detalhados sobre as diversas matérias-primas disponíveis em cada região.

Este trabalho teve como objetivo a avaliação da produtividade dos resíduos da colheita de mandioca e a caracterização destes como combustível sólido analisando sua possível utilização como fonte de energia para autossuficiência energética de uma usina de produção de etanol por raízes de mandioca.

Foi ainda estimado o potencial de produção de energia elétrica excedente em um ciclo a vapor de co-geração de energia térmica e elétrica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Utilização de resíduos culturais para geração de energia

A biomassa é a terceira maior fonte de energia utilizada no planeta após o carvão e o petróleo (Werther et al., 2000 e Vamvuka e Zografos 2004) e teve especial interesse nos anos 70 pela busca de autossuficiência energética e novamente a partir da metade da década de 90 como forma de mitigação da emissão de CO₂ e gases de efeito estufa (Lal, 2005).

Embora muitos destes resíduos sejam deixados em campo e tenham a sua importância para a manutenção da qualidade do solo em muitos casos a remoção destes é necessária em função de controle de pragas, doenças ou tratos culturais necessários à cultura. Em tais casos, estes resíduos poderiam ser usados localmente para a geração de energia (Easterly e Burnham, 1996).

Werther et al. (2000) disserta sobre a importância da análise da biomassa a ser utilizada em combustores pelo relativo baixo ponto de fusão de suas cinzas, sendo que, este deve ser projetado a fim de reduzir-se problemas com deposição e corrosão. No mesmo trabalho explica-se sobre a emissão de particulados que pode tornar-se um problema ambiental, contudo, baixas emissões de NO_x e SO_x são esperadas devido a baixa presença desses elementos nos resíduos da agricultura em geral.

Resíduos culturais tornam-se também interessantes para sua queima concomitante com carvão (Werther et al., 2000) e tem sido estudadas as influências no processo de combustão de carvão com diferentes biomassas (Heikkinen et al., 2003; Pronobis, 2005 e 2006).

Silva et al. (1976), Serra et al. (1978), Brasil (1980), Conceição (1987), Vilpoux (2002), Leal et al. (2008), Salla (2010) e Pattiya (2011) discorrem sobre a possibilidade de utilização de resíduos da cultura da mandioca para geração de energia e sobre a não existência de informações de tal material caracterizando-o como combustível, seja para combustão direta, pirólise ou gaseificação.

2.2 Descrição da planta

A mandioca é uma planta da família Euphorbiaceae, pertencente ao gênero *Manihot*. A espécie de maior importância econômica é a *Manihot esculenta* Crantz (sinonímia *Manihot utilíssima* Pohl). Conhecida mundialmente pelos nomes de cassava, manioc, tapioca, yuca, mandioca, macaxeira e aipim tendo seu provável centro de origem no Brasil tropical, de onde se espalhou para toda a América latina (Graner et al., 1973).

É um arbusto perene com resistência a seca e adaptada a diversas condições de clima e solo (Phillips, 1974). As raízes acumulam grandes quantidades de amido, servindo assim de grande fonte de energia para a alimentação humana na forma de carboidratos, com cerca de 58% da produção mundial de raízes destinada a esta finalidade, apesar de algumas variedades apresentarem altos teores de HCN, sendo necessário algum prévio tratamento para sua utilização (Embrapa, 2003).

Para fins práticos a planta pode ser dividida em duas partes ilustrado na Figura 2.1:

- aérea: contendo ramos grossos (em parte utilizados para o próximo plantio) e finos, pecíolos e folhas;
- subterrânea: contendo raízes e cepas (ramos de mandioca cortados com 20 cm utilizados para o plantio, manivas, com aspecto semelhante à madeira).

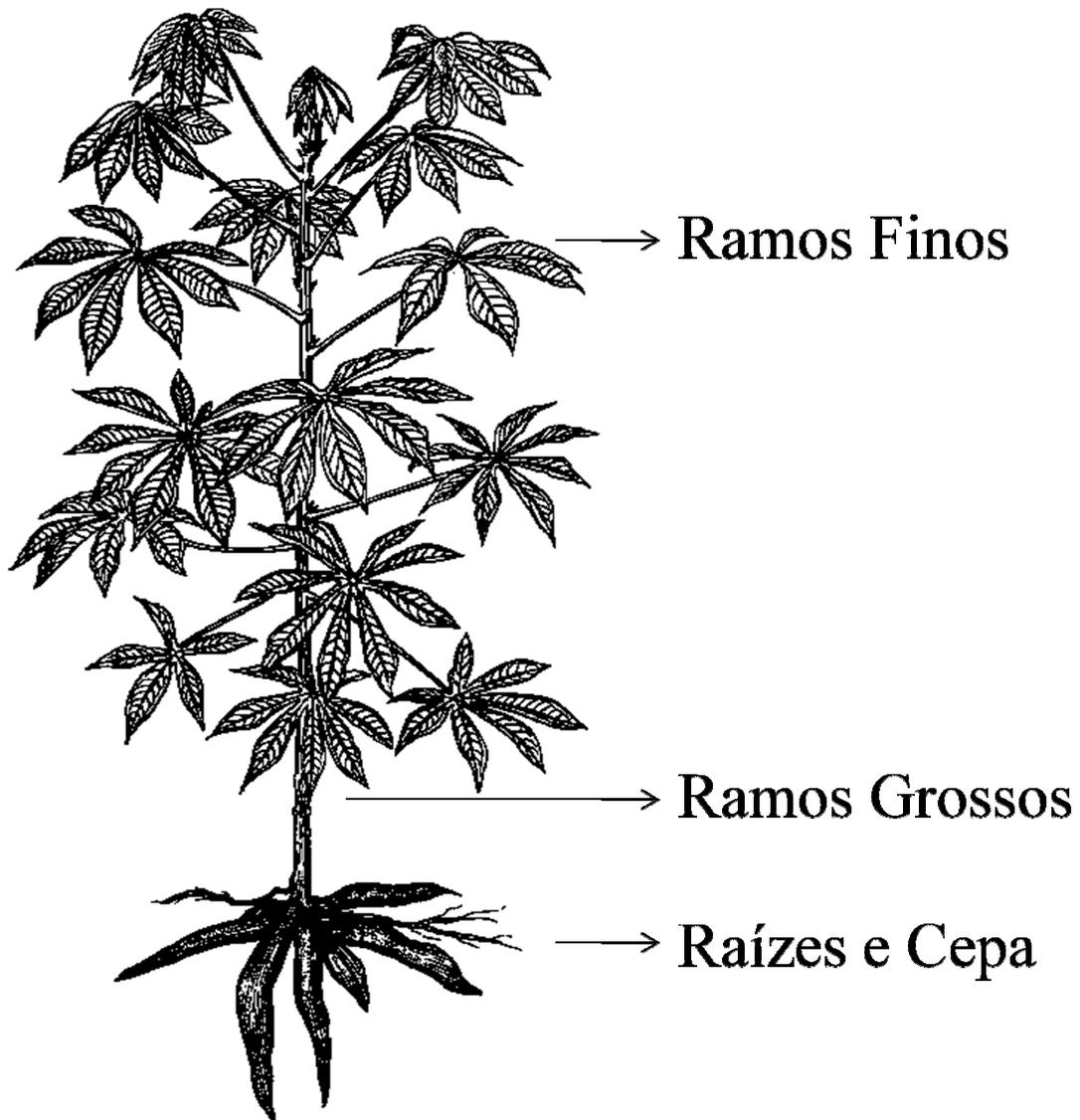


Figura 2.1: Planta de mandioca

2.3 Caracterização fitotécnica, de tratos culturais e colheita da mandioca

Pelo seu centro de origem encontrar-se próximo aos trópicos a mandioca apresenta seu melhor desempenho a temperaturas entre 25 e 30°C, requer grandes quantidades de luz e possui resistência à seca, apresentando problemas quanto a sua sanidade justamente em solo úmidos e, obtém-se também bons resultados em solos com baixa fertilidade, acidez relativamente alta, profundos e aerados (Lorenzi et al. 2002).

O solo deve ser bem preparado e, em casos de terrenos inclinados ou muito arenosos técnicas de conservação devem ser utilizadas evitando-se problemas com erosão.

O material a ser utilizado no plantio constitui-se de ramos sadios com idade, tamanho e preparo adequados, além da escolha de uma variedade apropriada às condições da região e a finalidade da lavoura. O plantio é realizado em sua maioria colocando-se a maniva na posição vertical no sulco entre 5 e 10 cm de profundidade, durante praticamente o ano todo, podendo ser utilizado inclusive o plantio direto na palha de alguma cultura instalada previamente para a formação da cobertura morta (Embrapa, 2003).

Os tratos culturais compreendem basicamente o controle de plantas daninhas através de capina ou herbicidas e quando necessário, o controle de pragas. Também noticia-se o emprego de poda em alguns casos (Embrapa, 2003).

A colheita pode realizar-se a partir do 8º mês após o plantio, contudo produções mais econômicas têm sido encontradas em plantações com 16 a 20 meses. O período mais adequado para tal é o de repouso fisiológico da planta em que suas raízes encontram-se com maior concentração de amido e depende preponderantemente das condições ambientais. Atualmente a colheita é em sua maioria realizada manualmente após a operação de desagregação do solo próximo as raízes (Embrapa, 2003).

2.4 Restrições tecnológicas

Cardoso (2003) aponta a necessidade de maior desenvolvimento e utilização do sistema de plantio direto para redução nos impactos do plantio de mandioca, principalmente em áreas mais inclinadas e discorre sobre o problema da compactação com o advento da mecanização e tráfego de tratores e caminhões na lavoura.

O avanço quanto ao desenvolvimento de novas variedades almeja por cultivares com maior teor de amido, maior período propício à colheita, resistência à bacteriose, fácil desprendimento do solo (raízes mais lisas), baixos teores de glicosídeos cianogênicos, raízes de porte médio e planta com arquitetura ereta (Cardoso, 2003).

A cultura da mandioca caracteriza-se em sua maioria por pequenos agricultores e em muitos casos para subsistência ou em pequena escala. Não apresenta altos índices de mecanização, ao contrário das culturas de grãos, florestais ou a cana-de-açúcar. O índice de mecanização apresentou uma evolução substancial a partir dos anos 90 (Valle et al. 2009), quando muitas etapas começaram a ser realizadas por máquinas como o plantio, uso de herbicidas para o controle de ervas daninhas e a possibilidade de parte da colheita.

Dentre os processos atualmente mecanizados o plantio tem se destacado (Carvalho, 2009), já sendo amplamente utilizado por produtores do Paraná, São Paulo e Mato Grosso do Sul, porém necessita ainda de máquinas mais adaptadas ao sistema de plantio direto na palha e com mais linhas de plantio para redução do tráfego e consequente compactação (Cardoso, 2003).

Os altos custos e a falta de disponibilidade de mão de obra, aliadas à praticidade da utilização de herbicidas tem feito os agricultores optarem pela utilização destes apesar da pouca opção de produtos registrados para esta cultura, acarretando no uso de produtos não recomendados e manejo inadequado.

Dentre as doenças, a bacteriose (*Xanthomonas campestris* pv *manihotis*) mostra-se como o principal problema da cultura. Quanto a pragas, a utilização do baculovírus para o combate do mandarová (*Erynnis ello*) vem se mostrando efetiva, principalmente no estado do Paraná (Cardoso, 2003).

A colheita na região centro-sul é realizada de forma manual com o auxílio de implementos como o afofador, arrancador (Embrapa, 2003) e com o transporte das raízes em big-bags dos pontos de recolhimento até os caminhões de transporte (Carvalho, 2009).

A colheita atualmente dá-se da seguinte maneira (Embrapa, 2003):

- Poda das ramas, efetuada a uma altura de 20 a 30 cm acima do nível do solo, realizada de maneira manual ou com auxílio de implementos;
- Passagem de implementos mecanizados como o afofador ou arrancador de raízes;
- Extração das raízes do solo, conhecido como “arranquio”, que pode ser executado de maneira manual, com a ajuda de ferramentas ou através de implementos mecanizados, como o arrancador;
- Separação manual das raízes da cepa da mandioca, também conhecida como "despinicar".

Observa-se que mesmo os atuais implementos utilizados na colheita semimecanizada não são bem estudados, não possuindo eficiência comprovada (Scalon F^o., 2005), tais averiguações mostram que esta é uma área para desenvolvimento a fim de se impulsionar e reduzir os custos de produção advindos da colheita. Tal processo ainda requer uma substituição de postos de trabalho, mudança de perfil e técnicas utilizadas pelos produtores (Cardoso, 2003).

2.5 Produtividade da parte aérea e de raízes

Poucos trabalhos na literatura relacionam a produtividade de raízes com a da parte aérea da mandioca, geralmente cada uma das produções são avaliadas separadamente pelas suas distintas finalidades.

Alguns trabalhos (Toledo, 1961; Serra et al., 1978; Moura e Costa, 2001; Lorenzi et al., 2002 e Pattiya 2011) buscaram averiguar tal relação, contudo, a variação encontrada em uma relação entre resíduo e raízes produzidos é muito ampla, devido à utilização de cultivares diversos e desenvolvimento diferenciado de cada cultivar em locais diferentes como mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Relação entre produção de raízes e resíduos (b.u.)

Autor	Cultivar	Raiz (Mg ha ⁻¹)	Parte aérea (Mg ha ⁻¹)	Resíduo/Raiz	
Toledo (1961)¹	-	16,69	16,30	0,98	
Serra et al. (1978)²	-	25,00	16,50	0,66	
Moura e Costa (2001)³	Metro III	54,14	66,94	1,24	
	Paxiúba II	62,50	57,77	0,92	
	Pretinha	59,16	52,22	0,88	
	Pirarucu	52,50	48,67	0,93	
	Paxiubão	38,89	34,16	0,88	
Lorenzi et al. (2002)⁴	Espeto	35,2	13,4	0,38	
	Fécua Branca	42,8	20,7	0,48	
	IAC 13	23,7	22,7	0,96	
	IAC 14	27,4	33,7	1,23	
	IAC 15	34,5	18,9	0,55	
Pattiya (2011)⁵	-	-	Cepa	0,49	0,58
			Ramos	0,09	

¹ Média de 5 variedades na cidade de Piracicaba – SP com colheita aos 12 meses.

² Média de produtividades no estado de São Paulo com colheita aos 22 meses.

³ Experimento realizado em Rio Branco – AC com colheita aos 18 meses.

⁴ Experimentos realizados em Dourados e Glória dos Dourados – MS com colheita aos 12 meses.

⁵ Média nacional da Tailândia.

Com base na importância local e grande produção de mandioca na Tailândia, Pattiya (2011) avaliou os resíduos de mandioca dividindo-os em duas partes: ramos e cepa. Caracterizou-os com: análise imediata, elemental, matéria inorgânica (nas cinzas), celulose, hemicelulose e lignina, poder calorífico superior e inferior e a análise termogravimétrica.

Carvalho (1986) discorre sobre o aproveitamento de resíduos industriais da fabricação do etanol de mandioca para a alimentação animal, dentre eles a película e a casca exterior da raiz, assim como sólidos de maiores dimensões presentes no mosto após a fermentação. Tal resíduo também recebe atenção de Dai et al. (2006) para a obtenção de biogás.

Em alguns casos, durante a produção da mandioca seus ramos são podados, tal material também pode ser transportado e utilizado como fonte de energia enquanto ainda não se realiza a colheita das raízes.

2.6 Caracterização da biomassa

José e Bork (2011) destacam a necessidade de conhecimento das propriedades e características físico-químicas de um combustível para a elaboração do projeto do sistema de combustão adequado assim como os processos necessários para a limpeza apropriada dos gases de exaustão e destinação adequada dos resíduos sólidos.

Cortez et al. (2008) definem que o material sólido poroso advindo da biomassa caracteriza-se por ser polidisperso (grandes quantidades de partículas com tamanhos, formas e características físico-químicas distintas). Sánchez (2010) diz que com a maior ênfase dada à utilização de combustíveis provenientes de biomassa, exige-se um maior cuidado em relação à caracterização que se faz dela e deve ser baseada no uso que se fará dessa biomassa, seja para queima direta, pirólise, gaseificação ou outro. Assim como, o projeto específico para utilização da biomassa como fonte de energia requer o pleno conhecimento das propriedades físico-químicas desse combustível.

Dentre as análises encontradas em literatura destacam-se os seguintes:

- Análise imediata e análise elementar;
- Poder Calorífico Superior (PCS);
- Análise termogravimétrica;
- Fusibilidade de cinzas;
- Cloro;
- Granulometria.

2.6.1 Imediata e elementar

Na análise elementar são determinados os valores relativos à quantidade dos principais elementos constituintes do combustível, isso inclui a determinação de C, H, N, S e O. Tal análise

mostra-se importante para cálculos do balanço de massa e energético dos processos de conversão termoquímicos.

A análise imediata determina o teor de umidade (para o cálculo do PCI do combustível), produtos voláteis (importantes nas etapas iniciais de combustão), carbono fixo e teor de cinzas.

A Tabela 2.2 e Tabela 2.3, mostram dados coletados por Jenkins et al. (1998) para algumas biomassas de análise imediata e elementar, respectivamente.

Tabela 2.2: Análise imediata da algumas biomassas (% em massa)

	Haste de alfafa	Palha de trigo	Casca de arroz	Palha de arroz	Switch- grass	Bagaço de cana-de- açúcar	Salgueiro Álamo	
Carbono fixo	15,81	17,71	16,22	15,86	14,34	11,95	16,07	12,49
Voláteis	78,92	75,27	63,52	65,47	76,69	85,61	82,22	84,81
Cinzas	5,27	7,02	20,26	18,67	8,97	2,44	1,71	2,70

Jenkins et al. (1998)

Tabela 2.3: Análise elementar de algumas biomassas (% em massa)

	Haste de alfafa	Palha de trigo	Casca de arroz	Palha de arroz	Switch- grass	Bagaço de cana-de- açúcar	Salgueiro Álamo	
Carbono	47,17	44,92	38,83	38,24	46,68	48,64	49,90	50,18
Hidrogênio	5,99	5,46	4,75	5,20	5,82	5,87	5,90	6,06
Oxigênio (dif.)	38,19	41,77	35,47	36,26	37,38	42,82	41,80	40,43
Nitrogênio	2,68	0,44	0,52	0,87	0,77	0,16	0,61	0,60
Enxofre	0,20	0,16	0,05	0,18	0,19	0,04	0,07	0,02
Cloro	0,50	0,23	0,12	0,58	0,19	0,03	<0,01	0,01

Jenkins et al. (1998)

2.6.2 Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI)

Tal parâmetro é importante por determinar a quantidade de calor liberada pelo material devido a combustão completa do mesmo. A determinação do PCS é realizada através de testes padronizados em laboratório.

Para a determinação do PCI deve-se descontar do PCS a energia necessária para evaporação da água presente no material e a água proveniente da oxidação do hidrogênio, com isso este valor depende da umidade na qual o material é utilizado e determina a real quantidade de energia fornecida pelo combustível.

Jenkins et al. (1998) mediu o PCS para algumas biomassas, estes valores encontram-se na Tabela 2.4.

Tabela 2.4: Poder calorífico superior de algumas biomassas

	Haste de alfafa	Palha de trigo	Casca de arroz	Palha de arroz	Switch- grass	Bagaço de cana-de- açúcar	Salgueiro Álamo
MJ kg ⁻¹	18,67	17,94	15,84	15,09	18,06	18,99	19,59 19,02

Jenkins et al. (1998)

2.6.3 Análise termogravimétrica (TGA)

Analisa a perda de massa em função do aumento da temperatura da amostra e pode ser realizada em atmosfera oxidante ou inerte, fornecendo subsídio para uma análise qualitativa da composição dos resíduos (José e Bork, 2011). Tal análise é útil para a avaliação das temperaturas de perda de material volátil, formação de carbono fixo, oxidação do carbono fixo e, como utilizado por Tognotti, et al. (1985) e Grotkjær et al. (2003) para a determinação do ponto de ignição do material. Tal técnica pode ser utilizada para prever o comportamento de misturas de biomassa e carvão como realizado por Heikkinen et al. (2003).

A Figura 2.2 exemplifica um gráfico de TGA, gerado pela perda de massa de bagaço de cana-de-açúcar submetido a diferentes temperaturas. A Figura 2.3 mostra um gráfico de DTG com taxa de aquecimento a 10°C por minuto e a influência dos diferentes materiais constituintes do material analisado (bagaço de cana-de-açúcar), ambas adaptadas de Garcia-Pères et al. (2000).

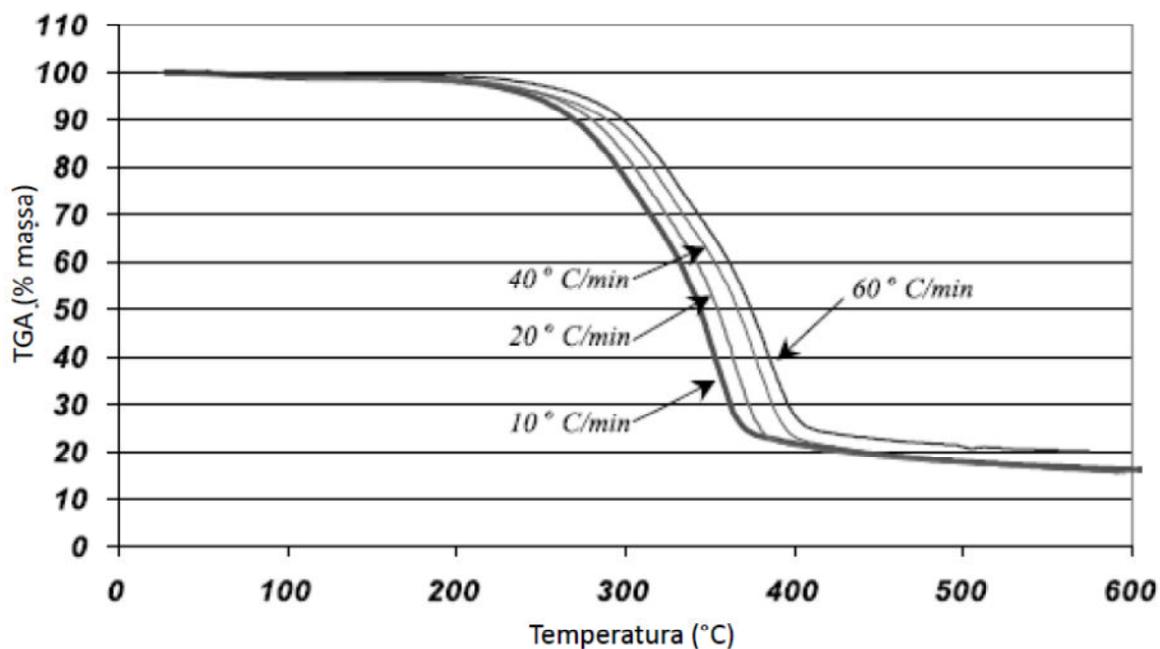


Figura 2.2: Exemplo de curvas de TGA para diferentes taxas de aquecimento para bagaço de cana-de-açúcar, adaptado de Garcia-Pères et al. (2000)

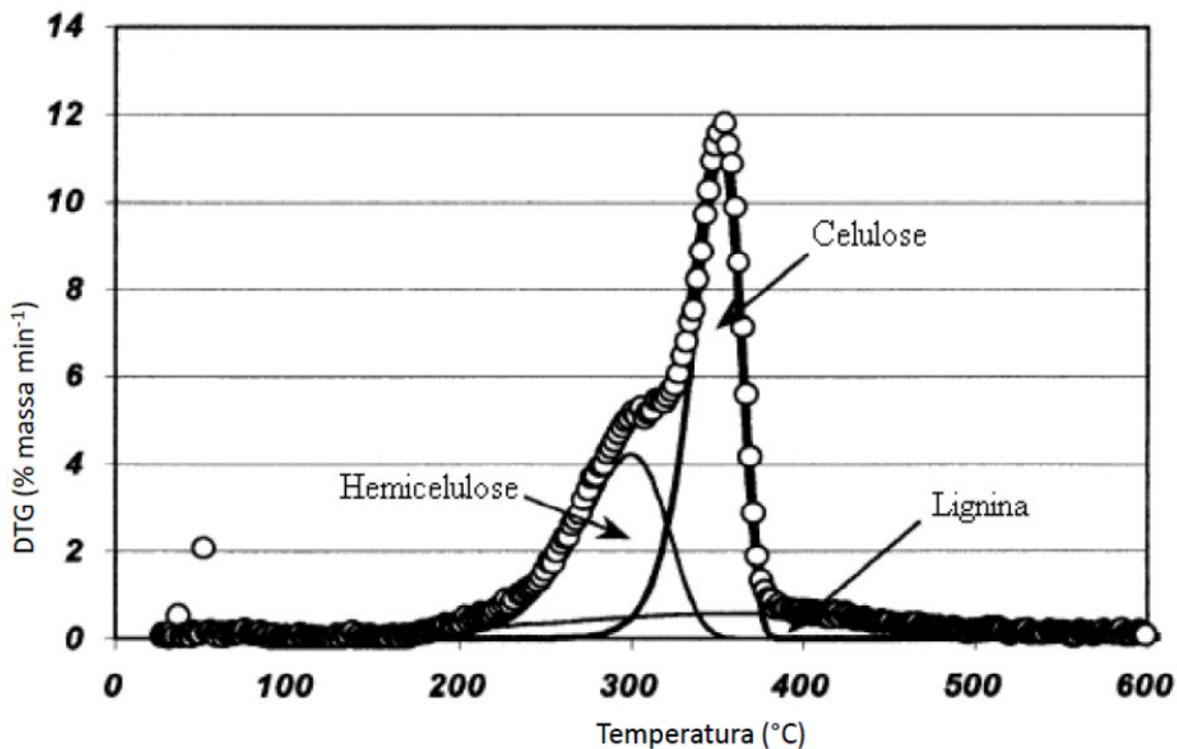


Figura 2.3: Exemplo de curvas de DTG para bagaço de cana-de-açúcar com taxa de aquecimento de 10°C por minuto e influência dos seus principais constituintes, adaptado de Garcia-Pères et al. (2000)

2.6.4 Fusibilidade de cinzas

É a temperatura na qual as cinzas iniciam o processo de amolecimento e fusão e podem aderir às superfícies dos fornos e caldeiras reduzindo sua eficiência e causando danos ao catalisar a corrosão de placas e tubos de transferência de calor. Tal característica pode ser estimada a partir da correlação de fração mássica entre óxidos básicos e ácidos constituintes das cinzas (Miles et al. 1996; Vamvuka e Zografos, 2004; Llorente e García, 2005 e 2006; Pronobis, 2005 e 2006; Kupka et al, 2008; José e Bork, 2011) assim como podem ser realizados testes específicos com a averiguação visual do derretimento das cinzas segundo as normas ASTM E 953 e ASTM D1857.

Hansen et al. (1999) utilizou a análise diferencial termogravimétrica (DSC) para determinar o ponto de fusão de cinzas de diferentes biomassas, carvão, e misturas de biomassa e carvão. O autor evidenciou a possibilidade de detecção do ponto de fusibilidade através de tal análise.

Jenkins et al. (1998) relatam a composição elementar das cinzas de determinadas biomassas e calcula seu índice alcalino, dado pela equação 2 e que indica a possibilidade de deposição e incrustação pelas cinzas deste combustível, apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Composição das cinzas e índice alcalino de algumas biomassas

	Haste de alfafa	Palha de trigo	Casca de arroz	Palha de arroz	Switch- grass	Bagaço de cana- de-açúcar	Salgueiro Álamo	
Análise elementar das cinzas (% massa)								
SiO ₂	5,79	55,32	91,42	74,67	65,18	46,61	2,35	5,90
Al ₂ O ₃	0,07	1,88	0,78	1,04	4,51	17,69	1,41	0,84
TiO ₂	0,02	0,08	0,02	0,09	0,24	2,63	0,05	0,30
Fe ₂ O ₃	0,30	0,73	0,14	0,85	2,03	14,14	0,73	1,40
CaO	18,32	6,14	3,21	3,01	5,60	4,47	41,20	49,92
MgO	10,38	1,06	<0,01	1,75	3,00	3,33	2,47	18,40
Na ₂ O	1,10	1,71	0,21	0,96	0,58	0,79	0,94	0,13
K ₂ O	28,10	25,60	3,71	12,30	11,60	0,02	15,00	9,64
SO ₃	1,93	4,40	0,72	1,24	0,44	2,08	1,83	2,04
P ₂ O ₅	7,64	1,26	0,43	1,41	4,50	2,72	7,40	1,34
Índice Alcalino								
kg óxidos alcalinos GJ ⁻¹ combustível	0,82	1,07	0,50	1,64	0,60	0,06	0,14	0,14

Jenkins et al. (1998)

2.7 Processo de produção de etanol por fontes amiláceas

A produção de etanol de mandioca segue em geral aspectos semelhantes aos da produção de etanol de milho exceto pela necessidade de tratamento mais imediato das raízes, seja o seu rápido processamento industrial para etanol ou a transformação em chips (cortar em fatias finas, aumentando a superfície de contato e perda de água) com secagem ao sol evitando a deterioração da raiz *in natura* (Ferreira-Leitão et al. 2010). Tais medidas devem ser realizadas preferencialmente em até 48 horas após a colheita, evitando-se assim a deterioração da matéria prima.

Cardoso (2009) descreve o processo de produção de etanol proveniente de mandioca *in natura* na etapa industrial:

- Pesagem, lavagem e descascamento – para a retirada de impurezas como terra, areia e da casca da raiz que não é processada;

- Desintegração – processo em que as raízes são moídas aumentando a eficiência dos processos que se seguem;
- Gelatinização – o grânulo de amido é quebrado e forma uma solução altamente viscosa de amilose e amilopectina suscetível à ação de enzimas;
- Sacarificação – pode ser ácida ou enzimática e objetiva a hidrólise das moléculas de amido em glicose;
- Fermentação – fase na qual leveduras (*Saccharomyces cerevisiae* Hansen) transformam a glicose em etanol e CO₂;
- Destilação – separação do etanol da água e demais produtos formados na fermentação;

Pode-se ainda acrescentar a estas etapas um processamento intermediário no qual as raízes são descascadas, cortadas em chips e dispostas ao sol para secarem. Tal etapa pode ser realizada tanto para facilitação do transporte das raízes do campo a indústria quanto para a organização de um estoque sem que haja depreciação da qualidade do amido para processamento em etanol.

Leal et al. (2008) dizem que para a utilização da mandioca como fonte para produção de etanol são necessários esforços no melhoramento genético da cultura, nos tratos culturais, mecanização da colheita, otimização do uso dos resíduos e aprimoramentos no processamento das raízes para tal finalidade e ainda frisa seu potencial uso como matéria-prima de etanol em regiões áridas e não propícias à cultura da cana-de-açúcar.

Macedo (2007) expõe que, para a cana-de-açúcar, dentre diversos fatores que tornaram tal cultura fornecedora de matéria-prima para a produção de etanol combustível, uma legislação específica, os subsídios iniciais e permanente negociação entre todos os setores envolvido foram condições importantes e devem ser adotadas em casos de desenvolvimento análogo para outros biocombustíveis.

Silva et al. (1976) registra que a cultura da mandioca por sua característica de produtores de baixa renda, possível em solos de baixa fertilidade e com baixa tecnologia empregada pode-se esperar bons resultados em pesquisas agrônômicas a fim de obterem-se maiores produtividades objetivando-se a produção de etanol combustível.

Conceição (1987) levanta como positivos os fatos desta cultura poder ser colhida em todos os meses do ano e a matéria-prima pode ser transformada em raspas secas para seu armazenamento e transporte.

2.7.1 Utilização de energia no processo de produção de etanol de mandioca

A mandioca já foi estudada como potencial fonte de matéria prima para produção de etanol, principalmente quando este combustível começou a ser empregado no Brasil na década de 1970. Desde então, foram realizados testes e experimentos para a sua utilização como fonte de insumo para a produção de etanol, contudo, devido principalmente à baixa produtividade averiguada na época, entre 12 e 14 Mg ha⁻¹, não se mostrou economicamente viável.

Entretanto, atualmente, produtividades médias superiores a 36 Mg ha⁻¹ são obtidas, como no caso da região de Mogi mirim, que a mais de 10 anos atinge tais níveis (IEA, 2012). Com uma produtividade, em algumas regiões, 3 vezes maior do que a utilizada anteriormente no computo da viabilidade deste material como insumo para a produção de etanol, uma nova análise mostra-se necessária para a reavaliação deste como matéria-prima para a produção de etanol combustível, ao menos localmente em que bons índices de produtividade sejam alcançados.

Para o caso do etanol de mandioca, a utilização de suas ramas como fonte de geração de energia no processo já foi estudada por alguns autores (Serra et al., 1978; Brasil, 1980; Valle et al., 2009) contudo tal prática ainda não é utilizada, não sendo encontrada inclusive em referências de países como Tailândia e China os quais já baseiam parte de sua produção de etanol em raízes de mandioca.

Seguem, na Tabela 2.6, os valores encontrados na literatura do consumo de energia na fase industrial da produção de etanol de mandioca.

Tabela 2.6: Consumo de energia por etapa de produção de etanol de mandioca

	MJ Mg ⁻¹			
	Salla et al. (2010)	Dai et al. (2006)	Serra et al. (1978)	Silva et al. (1976)
Desintegração	280	110	-	-
Hidrólise e sacarificação	8.365	1.605	-	-
Filtração	-	2.210	-	-
Fermentação	75	150	-	-
Destilação	6.145	5.115	-	-
Atividades Suplementares	40	-	-	-
Total	14.905	9.190	26.600	37.220

Verificam-se valores maiores nos estudo de Silva et al. (1976) e Serra et al (1978), ambos no início da adoção do etanol como combustível no Brasil, entre 37,2 e 26,6 GJ Mg⁻¹ de etanol produzido. Nestes dois trabalhos não foram encontrados detalhamentos sobre os gastos energéticos específicos de cada etapa do processo, mas somente o montante total.

Dai et al. (2006) e Salla et al. (2010) apresentam valores da ordem de 9 a 15 GJ Mg⁻¹ de etanol, valores médios aproximadamente 3 vezes menores de energia do que os encontrados nos trabalhos da década de 70. Nestes trabalhos também foram detalhados os valores de gasto energético em cada etapa conforme Tabela 2.6.

2.7.2 Produção de etanol de algumas culturas

Abaixo estão indicados os valores encontrados na literatura para a produção e rendimento de etanol por Mg de raiz de mandioca (Tabela 2.7) e produção de etanol por hectare por ano de algumas culturas (Tabela 2.8).

Tabela 2.7: Produtividade de etanol de mandioca

Autor	Etanol (L Mg⁻¹)
Silva et al. (1976)	174
Serra et al. (1978)	180
Conceição (1987)	150 a 200
Salla (2008)	188

Tabela 2.8: Produtividade e rendimento de etanol de algumas culturas

Autor	Cultura	Produtividade considerada (Mg ha⁻¹)	Etanol (L ha⁻¹ ano⁻¹)		
Silva et al. (1976)	Cana-de-açúcar	54	3.564		
	Sorgo sacarino	-	3.775		
	Mandioca	14,5	2.523		
Serra et al. (1978)	Cana-de-açúcar	52	4.590		
	Sorgo sacarino	35	2.080		
	Mandioca	12,5	3.775		
Açúcares e amidos					
Venkatasubramanian e Keim (1985)*	Cana-de-açúcar	6 - 12	3.600 - 7.200		
	Beterraba açucareira	5 - 7	3.000 - 4.200		
	Sorgo sacarino	2 - 7	1.500 - 4.400		
	Batata	3 - 7	1.800 - 4.200		
	Milho	2 - 4	1.200 - 2.400		
	Mandioca	3 - 12	1.800 - 7.200		
Leal et al. (2008)	Cana-de-açúcar	Ano		Ano	
		1980	2005	1980	2005
	Sorgo sacarino	45	72	3.015	6.000
	Batata-doce	35	50	1.925	6.000
	Milho	10	11,2	1.250	1.770
	Mandioca	1,5	3	580	1.200
Salla (2008)	Cana-de-açúcar	12	13,8	2.160	2.750
	Cana-de-açúcar	85		7.199	
	Milho	6		1.980	
	Mandioca	33		6.197	

* Foi considerada neste trabalho a produção de açúcares e amidos de cada cultura.

Leal (2008) diz que a mandioca é mais indicada para regiões de clima tropical semiárido em que se queira produzir etanol por ser melhor adaptada ao regime hídrico de tais locais, entre 600 e 800 mm anuais, sendo plausível o estudo de tal espécie para a produção de etanol onde atualmente a cultura da cana-de-açúcar não se mostra viável.

2.8 Etanol de material celulósico

Além do etanol produzido por dissacarídeos (ex. cana-de-açúcar) e amido (ex. milho), conhecidos como etanol de 1ª geração, também se pode utilizar material celulósico hidrolisado como fonte de açúcares (Finguerut et al., 2008 e Brethauer e Wyman, 2009) sendo assim, a parcela de celulose e hemicelulose que compõe os ramos da mandioca podem também serem hidrolisados para a fabricação de açúcares e utilizados para a fabricação de etanol.

Como benefícios advindos da utilização deste material para a produção de etanol estão a redução na emissão de CO₂, a possibilidade de utilização de uma diversa gama de materiais (Solomon et al., 2007), aumento da conversão da energia recolhida pela biomassa (Macedo, 2007) e aumento da produção de etanol sem a expansão de áreas agrícolas (Fingerut et al., 2008).

Tal processo encontra-se hoje com grande concentração de esforços da pesquisa e desenvolvimento para a redução de custos e aumento dos rendimentos buscando sua viabilização (Macedo, 2007).

3 METODOLOGIA

3.1 Plantio

O material caracterizado foi fornecido pelo Instituto Agronômico de Campinas (IAC) resultado de um experimento para desenvolvimento de variedades.

O experimento realizou-se na cidade de Echaporã – SP, situada nas coordenadas lat. 22°15', long. 50°07' a 700 metros de altitude, com predominância de argissolos de média fertilidade, total pluviométrico de 1.375,8 mm ao ano, concentrada entre os meses de outubro a março e classificação climática Koeppen Cwa.

Avaliaram-se três variedades de mandioca, sendo duas já comercialmente utilizadas (IAC 14 e IAC 90) e um clone varietal ainda em desenvolvimento (Clone 48/98).

O plantio foi realizado em 26/05/2009 com uma plantadora mecanizada de quatro linhas em espaçamento de 0,90 x 0,90 m, não houve adubação, pois o plantio ocorreu após colheita de soja e a área encontrava-se com níveis adequados de nutrientes.

O material foi colhido em três épocas distintas do desenvolvimento fenológico da planta, com 13 meses após o plantio (junho de 2010) quando a planta está com seu crescimento estagnado, 18 meses após o plantio (dezembro de 2010) quando a planta está novamente em desenvolvimento e 26 meses após o plantio (julho de 2011) quando novamente a planta está com o crescimento estagnado após dois ciclos de desenvolvimento.

Na ocasião das colheitas o material foi separado em raízes, cepa, ramos grossos e ramos finos. Cada um destes foi lavado para a retirada de impurezas (terra agregada), pesado com uma balança em campo para determinação da produtividade e suas umidades foram determinadas através da diferença de peso secando-se uma amostra em estufa a 60°C até peso constante.

3.2 Caracterização dos resíduos

O material foi cominuído em um moinho de facas Marconi MA 680 com tela de mesh 20 na saída.

3.2.1 Análise elementar

Foram realizadas análises de CHN com o analisador 2400 CHN Elemental Analyser que promove a combustão da amostra e quantifica os gases de escape CO₂, H₂O e N₂. A análise de S foi realizada por espectrometria de plasma ótico, a análise do teor de Cl foi feita por titulação e o O foi calculado por diferença. Todas estas análises foram feitas pelo Instituto de Química da Universidade de São Paulo.

3.2.2 Análise imediata

As análises foram realizadas segundo as normas ASTM E-1617-94 e ASTM E-1755-01 para biomassa, no laboratório de combustíveis do Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos, Faculdade de Engenharia Mecânica na Universidade de Campinas.

3.2.3 Composição de Cinzas e Fusibilidade

A análise de composição de cinzas foi realizada através de microanálise de energia dispersiva (EDS em inglês) pela detecção de raios-x característicos para cada elemento, variando conforme seu número atômico, emitidos pela amostra quando excitada por um feixe eletrônico.

Conforme a intensidade de cada emissão característica pode-se inferir a composição de tal material. Esta análise foi realizada pelo Laboratório Multiusuário de Caracterização de Materiais no departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica na Universidade de Campinas, em um microscópio eletrônico de varredura marca Zeiss, modelo EVO MA15.

Diversos autores (Miles et al. 1996; Vamvuka e Zografos, 2004; Llorente e García, 2005 e 2006; Pronobis, 2005 e 2006; Kupka et al, 2008) referem-se a influência que cinzas que contenham material básico em sua composição apresentam ponto de fusão a temperaturas mais baixas. Neste trabalho são brevemente apresentados dois métodos para predição de problemas com fusibilidade e incrustação de cinzas segundo a análise realizada da composição das cinzas.

Um parâmetro muito difundido é a correlação entre os percentuais em peso dos óxidos básicos e ácidos B/A dada pela equação 1:

$$B / A = \frac{\%(Fe_2O_3 + CaO + MgO + Na_2O + K_2O + P_2O_5)}{\%(SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2)} \quad (1)$$

Segundo Pronobis (2005) para valores de B/A menores que 0,15 são encontradas as maiores temperaturas de fusão das cinzas (acima de 1600°C) e com aproximadamente 0,75 apresentam-se as menores temperaturas (abaixo de 1200°C). Para relações acima de 0,75 apresenta-se novo aumento do ponto de fusibilidade até 2,0 a partir de onde não há mais relação entre tal parâmetro e a temperatura de fusibilidade conforme Figura 3.1.

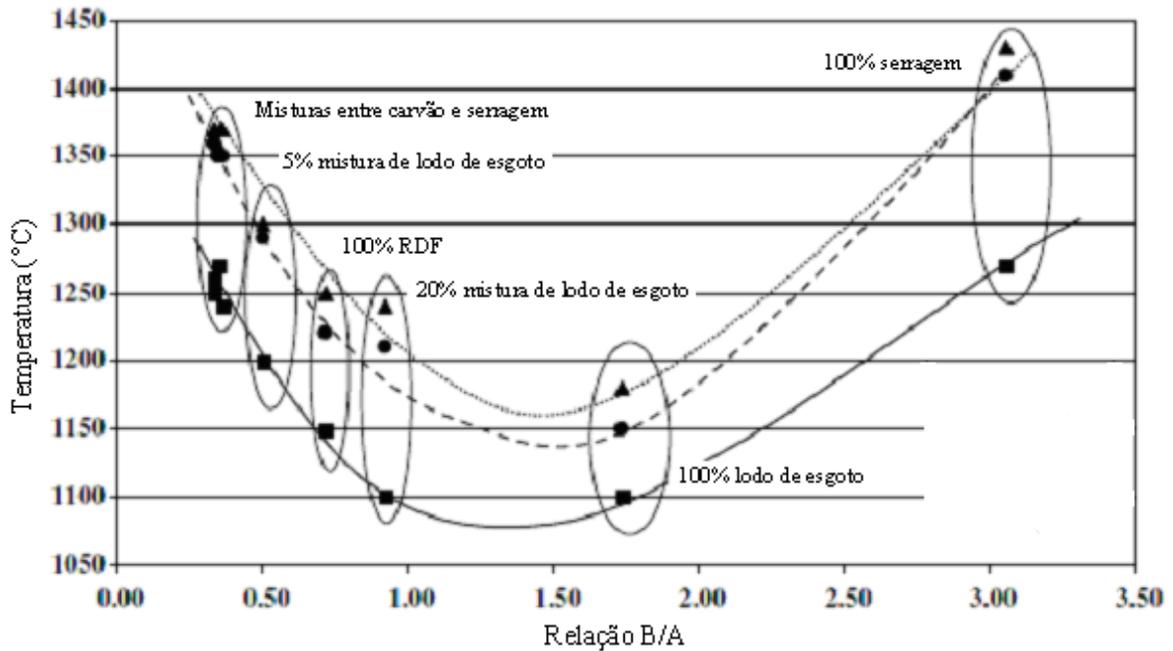


Figura 3.1: Temperatura de fusibilidade de cinzas e o índice B/A (Adaptado de Kupka et al. 2008)

Miles et al. (1996), Jenkins et al. (1998) e Vamvuka e Zografos (2004) apresentam o Índice Alcalino (AI), dado pela quantidade em massa de óxidos alcalinos formados quando queimado material suficiente para gerar 1 GJ de energia, seguindo a equação 2, sugerida por Jenkins (1998):

$$AI = (1/Q)Y_f^a (Y_{K_2O}^a + Y_{Na_2O}^a) \quad (2)$$

Onde:

- AI – Quantidade de óxido alcalino no combustível por unidade de energia deste;
- Q – PCS do combustível;
- Y_f^a – Fração mássica de cinzas no combustível;
- $Y_{K_2O}^a$ e $Y_{Na_2O}^a$ - Fração mássica dos óxidos de potássio e de sódio nas cinzas.

Miles et al. (1996) sugere que a partir de 0,17 kg GJ⁻¹ até 0,34 kg GJ⁻¹ aumenta-se o risco de incrustações e para valores acima de 0,34 kg GJ⁻¹ estas são praticamente certas de ocorrerem.

3.2.4 Poder Calorífico Superior (PCS)

A análise foi realizada seguindo a norma ASTM D-2015 por bomba calorimétrica no laboratório de combustíveis do Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos, Faculdade de Engenharia Mecânica na Universidade de Campinas.

3.2.5 Análise de Extrativos, Lignina, Celulose e Hemicelulose

Parte de cada amostra já cominuída foi classificada em peneiras entre 40 e 60 mesh, dentre o material que passou pela peneira de 40 mesh e ficou retido na peneira de 60 mesh, aproximadamente 10 gramas foram separados para as análises.

Inicialmente são quantificados os extrativos, norma TAPPI 264 cm-97, através da dissolução de resinas, ácidos graxos e ceras com uma solução de etanol/tolueno (1:2) seguido da dissolução de taninos, gomas, açúcares, amidos e corantes primeiramente com etanol seguido de água quente.

Para a determinação do teor de lignina, do material já livre de extrativos, são empregadas duas etapas, uma segundo a norma TAPPI UM 250 dissolvendo-se parte da lignina em solução de ácido sulfúrico com quantificação da lignina por espectrofotometria e outra pela norma TAPPI 222 om-98 para lignina insolúvel em ácido sulfúrico, determinada por gravimetria do material não solubilizado.

Realizou-se a hidrólise da holocelulose com ácido sulfúrico e então foram analisados os carboidratos totais segundo Wallis et al. (1996) através de HPLC-PAD com determinação das quantidades de glicanas, glucanas, xilanas, galactanas, mananas e arabinanas formadas pela hidrólise do material celulósico também previamente livre de extrativos.

A relação em massa dos açúcares corresponde ao componente que a originou. A celulose forma glicana e a hemicelulose forma glucanas, xilanas, galactanas, mananas, arabinanas e parte das glicanas equivalente a 1:1 das mananas (Martino, 2011).

Esta análise foi realizada pelo Laboratório de Celulose e Papel do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa.

3.2.6 Análise Termogravimétrica em Ambiente Oxidante e Inerte (TGA)

Termogravimetria ou análise termogravimétrica avalia a perda de massa de uma substância em função da temperatura enquanto esta é submetida a uma programação controlada. O equipamento utilizado na análise termogravimétrica é basicamente constituído por uma microbalança, um forno, termopares e um sistema de fluxo de gás.

Aproximadamente 30 mg das amostras dos ramos e cepa foram aquecidos da temperatura ambiente até 1000 °C a uma taxa de 10 °C min.⁻¹. Realizaram-se testes em atmosfera oxidante (ar sintético) e inerte (Argônio).

Esta análise foi realizada pelo Laboratorio Multiusuário de Caracterização de Materiais no departamento de Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica na Universidade de Campinas em um TGA marca Netzsch modelo STA 409C.

3.3 Balanço de energia na fábrica de etanol de mandioca

Dentro desta etapa diversas informações foram obtidas de diferentes fontes sobre o processo de produção de etanol e seu consumo energético. As primeiras etapas do processo foram também averiguadas em uma visita a uma fecularia no município de Palmital-SP onde pode-se observar a sequencia dos processos de produção de fécula de mandioca, o qual é análogo ao processo constatado em literatura para a produção de etanol de mandioca.

Um fluxograma do processo de produção de etanol de mandioca foi elaborado com base em informações de Olsen (1995), IPT (1990), Leonel e Cereda (1999), Camacho e Cabello (2009), Marder et al. (1996), em visitas a Usina Colorado em Guáira-SP e a fecularia Tereos Syral em Palmital-SP e dados fornecidos pela fábrica de equipamentos EBS conforme Figura 3.2.

Os índices de demanda e produção de energia foram calculados com base em 1 Mg de raiz de mandioca processada. Uma estimativa da produção de vapor e energia elétrica foi feita para uma usina que produz $600.000 \text{ l dia}^{-1}$ de etanol hidratado 95,6°GL, considerando-se que seja uma usina típica de médio porte.

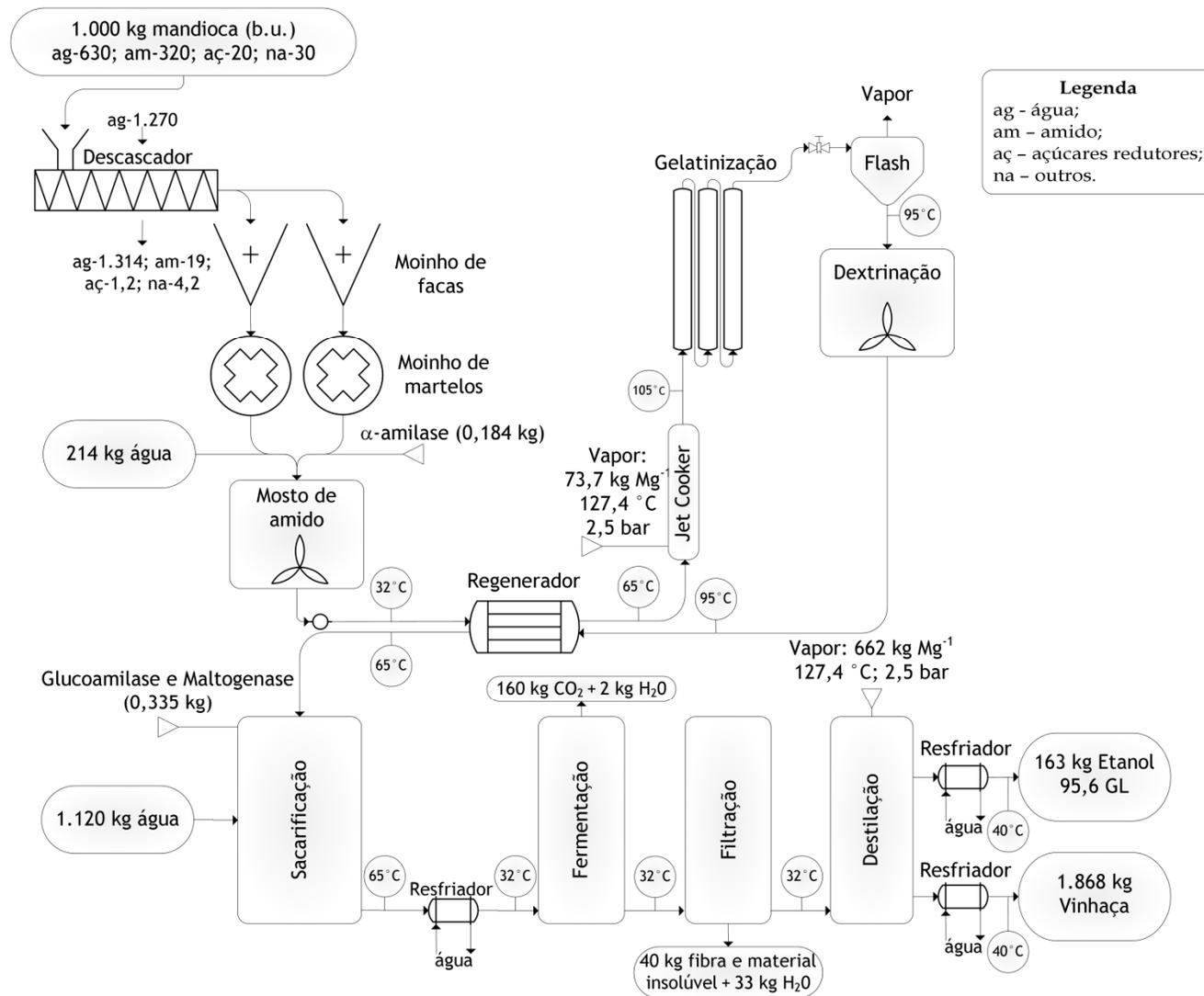


Figura 3.2: Fluxograma simplificado da produção de etanol de mandioca com os processos, temperaturas e fluxo de massa

O processo foi separado em três principais etapas:

- Preparação das raízes;
- Sacarificação do amido;
- Fermentação e destilação do etanol.

3.3.1 Preparação das raízes

Nesta etapa as raízes são limpas de terra agregada através de peneiras vibratórias, carregadas por esteiras a um lavador de raízes com rosca interna para lavagem e descascamento destas. As raízes são então trituradas em moinhos de facas e posteriormente desintegradas em moinho de martelos.

Para o consumo da energia nesta etapa foram utilizados dados cedidos pela indústria EBS através da avaliação das potências dos equipamentos utilizados.

3.3.2 Sacarificação do amido

Em um tanque é preparado o mosto de amido pela adição de água e enzima α -amilase às raízes moídas.

A quantidade de água foi calculada para se produzir um mosto com concentração de 30% de sólidos segundo Olsen (1995).

Este mosto é aquecido a 105°C por cinco minutos em um cozedor tipo Jet Cooker para a gelatinização do amido, em seguida este é resfriado a 95°C em um tanque flash a pressão ambiente e segue a um tanque de dextrinação com tempo de residência de 2 horas.

Deste tanque o mosto é resfriado a 65°C e bombeado ao tanque de sacarificação onde é então adicionado novamente água e uma segunda enzima (glucoamilase e maltogenase).

A quantidade de água é calculada para se produzir um mosto com 18,5°Brix, valor típico usado nas usinas de etanol de cana-de-açúcar, com tempo de residência de 24 horas.

Nesta etapa foi proposto um regenerador de calor que pré-aquece o mosto de amido saindo do tanque de preparação através da troca de calor com o mosto que sai do tanque de dextrinação.

As eficiências das diferentes etapas estão detalhadas na Tabela 3.1, abaixo.

Tabela 3.1: Etapas e eficiências utilizadas para o cálculo do fluxo de massa

Etapa	Fator de conversão	Proporção
Fator estequiométrico de conversão de amido em glicose (Serra et al. 1978)	1,3071	$\frac{kg\ glicose}{kg\ amido}$
Eficiência da hidrólise do amido em glicose (Leonel e Cereda 1999)	0,9000	$\frac{kg\ glicose\ (produzida)}{kg\ glicose\ (estequiométrica)}$
Fator estequiométrico de conversão de glicose em etanol (IPT, 1990)	0,6471	$\frac{L\ etanol}{kg\ glicose}$
Eficiência da fermentação (IPT, 1990)	0,8910	$\frac{L\ etanol\ (produzido)}{L\ etanol\ (estequiométrico)}$
Eficiência da destilaria (IPT, 1990)	0,9663	$\frac{L\ etanol\ (recuperado)}{L\ etanol\ (produzido)}$

3.3.3 Fermentação e destilação do etanol

Esta etapa é análoga ao processo utilizado nas usinas de etanol de cana-de-açúcar em que é adicionada a levedura (*Saccharomyces cerevisiae*) ao mosto com 18,5°Brix o qual é mantido a 32°C por aproximadamente 7 horas.

Em seguida este é filtrado e destilado em duas colunas para a produção de etanol 95,6° GL. Uma terceira coluna ou outro processo adicional pode produzir etanol anidro.

Foi considerado um consumo de vapor de 3,2 kg L⁻¹ de etanol hidratado produzido, conforme IPT (1990).

3.3.4 Energia elétrica necessária

A energia elétrica foi estimada com base em informações do fabricante de plantas de etanol EBS e, então, calculado um índice de consumo de energia necessária à produção de etanol em MJ Mg⁻¹ conforme resumido na Tabela 3.2.

Para todos os equipamentos elétricos, motores auxiliares e bombas usadas no processo foi utilizado 75% como fator de potência instalada. Tal valor foi escolhido em virtude dos motores serem, em sua maioria, de baixa potência.

Tabela 3.2: Potências dos motores instalados nas etapas de produção de etanol de mandioca (60.000 L dia⁻¹)

	Potencia instalada (kW)
Recepção e lavagem	87,52
Cominuição	248,60
Cozimento, liquefação e sacarificação	63,25
Fermentação	165,49
Destilação	84,58
Total	649,44

A previsão de produção desta fábrica é de 60.000 L de etanol hidratado por dia (47.340 kg). O valor obtido como gasto energético foi então dividido pela produção estimada para a obtenção de um índice em kJ Mg⁻¹ de energia elétrica por tonelada de etanol produzido.

3.3.5 Energia térmica necessária

A energia térmica necessária foi calculada com base nas condições dos processos descritos para cada etapa utilizando-se a equação 3 para o jet cooker, enquanto para a destilaria foram assumidos valores típicos para uma destilaria de etanol, segundo IPT (1990).

$$\dot{m}_{vapor}(h_2 - h_1) = \dot{m}_{mosto} Cp(T_2 - T_1) \quad (3)$$

Onde:

- \dot{m}_{vapor} é a vazão de vapor em kg s^{-1} ;
- $(h_2 - h_1)$ é a diferença de entalpias de entrada e saída do vapor no sistema, em kJ kg^{-1} ;
- \dot{m}_{mosto} é a vazão do mosto em kg s^{-1} ;
- Cp é o calor específico da mistura dado em $\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$;
- $(T_2 - T_1)$ é a diferença de temperatura da mistura na entrada e na saída do sistema, em K.

Neste caso, assim como no cálculo do consumo de energia elétrica, o valor obtido será dividido pela produção estimada para a obtenção de um índice de kJ Mg^{-1} de demanda de energia térmica para a produção de uma tonelada de etanol de mandioca.

3.3.6 Quantidade de combustível necessário e energia disponível

Resultados anteriores (Toledo, 1961; Moura e Costa, 2001; Lorenzi et al., 2002) indicam que a umidade média dos resíduos da colheita da mandioca é por volta de 60 a 70% (b.u.).

Biomassas com tal umidade não são adequadas para geração de energia por processo de combustão. Sendo assim, uma etapa prévia de secagem é necessária. Isto pode ser feito através da

estocagem dos resíduos em área aberta na indústria ou mesmo no campo de cultivo com posterior recolhimento.

O consumo de combustível para suprimento da demanda de energia elétrica e térmica foi calculado tomando por base o PCI dos resíduos considerando-se uma umidade média de 30% (b.u.). Este valor de umidade é possível de ser obtido por secagem natural após algumas semanas de armazenamento do resíduo de campo.

O PCI foi estimado segundo Bizzo (2003) na equação 4, onde tal valor deve ser então multiplicado pela matéria seca do combustível.

$$PCI = PCS - 2440(9h + u) \quad (\text{b.s.}) \quad (4)$$

Onde:

- PCI - Poder Calorífico Inferior (kJ kg^{-1});
- PCS - Poder Calorífico Superior (kJ kg^{-1});
- h - Teor de hidrogênio constituinte do combustível (kg kg^{-1});
- u - Teor de umidade do combustível (b.s.).

A Figura 3.3 ilustra o fluxo de energia térmica e elétrica do sistema, indicando a possibilidade da produção de energia elétrica excedente.

Para o cálculo do combustível necessário à produção de energia para suprimento de uma planta de produção de etanol por raízes de mandioca foi proposto um ciclo térmico de co-geração de vapor e energia elétrica conforme o fluxograma da Figura 3.3.

Tais parâmetros refletem a atual prática de co-geração de vapor em tais usinas:

- Pressão do vapor de 45 bar;
- Temperatura do vapor de 460°C ;
- Extração do vapor para o processo a 2,5 bar absoluto;
- Eficiência do gerador de vapor de 85%
- Eficiência isoentrópica da turbina de 80%;
- Eficiência do gerador elétrico de 98%.

A escolha da pressão teve como base a pressão especificada em recentes projetos e instalações de usinas com geração de energia elétrica excedente.

A temperatura do vapor superaquecido foi limitada segundo recomendações de Michelsen et al. (1998) na combustão de biomassas com baixo ponto de amolecimento das cinzas.

A pressão de condensação a 0,2 bar (temperatura de saturação de 60°C) foi selecionada a fim de maximizar a produção de trabalho do ciclo térmico e é tecnicamente viável a condensação da água da torre de resfriamento em regiões tropicais e subtropicais onde temperaturas da água de resfriamento da ordem de 32 a 34°C são facilmente obtidas. A eficiência térmica de 85% é típica para geradores de vapor a biomassa.

Assim, foram calculadas duas condições:

- Consumo de combustível necessário para suprir as demandas de energia térmica e elétrica da fase industrial da produção de etanol de mandioca;
- A energia elétrica excedente, considerando que todo o resíduo de campo da plantação de mandioca, a 30% de umidade, fosse utilizado para a geração de energia.

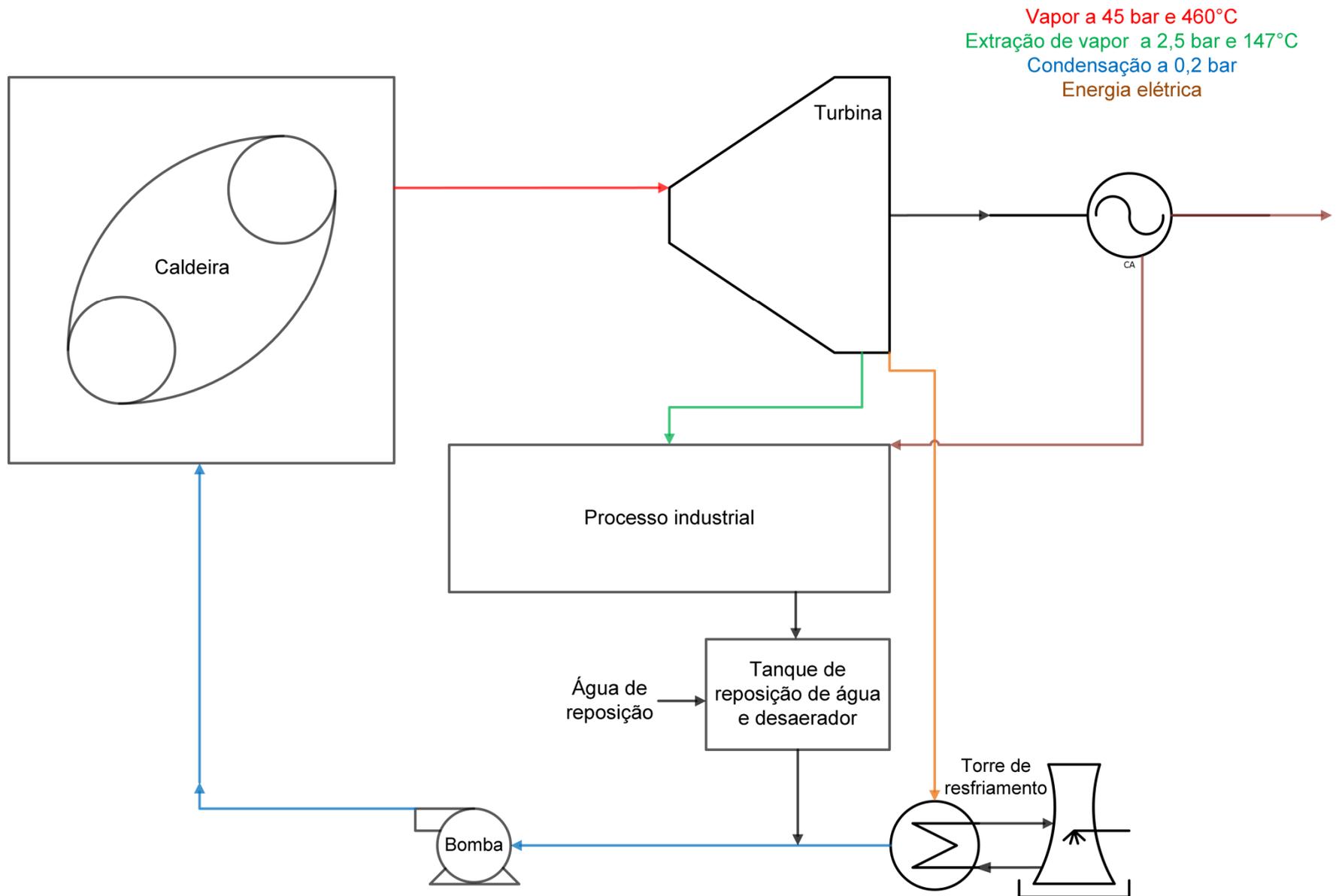


Figura 3.3: Fluxograma de produção de energia

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise da produção no campo

A média de produtividade para colheita com 12 meses das três variedades neste trabalho, 26,17 Mg ha⁻¹, mostrou-se próxima à averiguada para a região de Assis nos últimos 10 anos 27,75 Mg ha⁻¹ (IEA, 2012) e inferior a averiguada na região de Mogi-Mirim no mesmo período, 34,50 Mg ha⁻¹ (IEA, 2012).

A produtividade média de cepa das três variedades analisadas foi de 3,20 Mg ha⁻¹ e das ramas grossas e finas de 14,36 Mg ha⁻¹. Para a relação entre resíduo e raiz produzidos o valor obtido foi 0,66, menor do que a média obtida por Lorenzi et al. (2002): 0,72 (foi comparado somente a este trabalho por ter o mesmo tempo de colheita e variedades atualmente utilizadas).

Quando analisadas, separadamente, as produções de cepa e ramas em relação a produção de raízes os valores obtidos neste trabalho: cepa 0,12 e ramas 0,53, mostraram-se maiores do que os obtidos por Pattiya (2011): cepa 0,09 e ramas 0,49.

As Tabela 4.1 a Tabela 4.6, exibem, de forma mais detalhada, as informações obtidas em campo para as três variedades analisadas em três épocas de colheita.

Tabela 4.1: Parâmetros agronômicos da primeira colheita

Variedade	Raiz	Cepa	Rama grossa	Rama fina	Relação Resíduo/Raiz
	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	
IAC 90	20,62	2,98	5,06	3,37	0,55
IAC 14	30,12	3,34	8,52	11,56	0,78
48/98	27,77	3,28	6,64	7,94	0,64

Echaporã-SP. Junho de 2010 (colheita após 12 meses, b.u.).

Tabela 4.2: Teor de matéria seca (%) em massa (colheita após 12 meses)

Variedade	Raiz	Cepa	Rama grossa	Rama fina
IAC 90	41,14	46,02	34,67	31,39
IAC 14	43,28	47,64	40,19	36,29
48/98	42,99	45,45	38,23	31,37

Tabela 4.3: Parâmetros agrônômicos da segunda colheita

Variedade	Raiz	Cepa	Rama grossa	Rama fina	Relação Resíduo/Raiz
	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	
IAC 90	35,42	5,94	8,47	5,68	0,57
IAC 14	28,14	3,69	7,96	7,62	0,68
48/98	42,78	5,23	11,48	12,38	0,68

Echapora-SP. Dezembro- 2010 (colheita após 18 meses, b.u.)

Tabela 4.4: Teor de matéria seca (%) em massa (colheita após 18 meses)

Variedade	Raiz	Cepa	Rama grossa	Rama fina
IAC 90	37,51	37,10	36,44	31,39
IAC 14	40,92	41,98	36,06	33,44
48/98	39,19	37,24	33,95	31,47

Tabela 4.5: Parâmetros agrônômicos da terceira colheita,

Variedade	Raiz	Cepa	Rama grossa	Rama fina	Relação Resíduo/Raiz
	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	
IAC 90	33,89	5,73	7,19	2,86	0,47
IAC 14	42,81	4,50	8,96	5,13	0,43
48/98	38,94	4,64	7,99	4,07	0,43

Echapora-SP. Maio de 2011 (colheita após 24 meses, b.u.)

Tabela 4.6: Teor de matéria seca (%) em massa (colheita após 24 meses)

Variedade	Raiz	Cepa	Rama grossa	Rama fina
IAC 90	41,27	38,02	29,02	24,87
IAC 14	40,85	42,81	33,16	28,99
48/98	42,56	38,84	30,00	26,77

Na Tabela 4.7 os dados de produção de raízes estão apresentados em base úmida (b.u.) e base seca (b.s.) com a respectiva umidade em campo do material. Os resíduos foram apresentados somente em base seca e com a umidade apresentada em campo, tal forma de apresentação dos dados justifica-se pois os dados de colheita das raízes são, em geral, apresentados na forma úmida, e para os cálculos de energia disponível nos resíduos, a matéria seca é o parâmetro mais importante, à qual então pode ser estipulada uma umidade que se pretende trabalhar com este.

Neste caso uma análise econômica deve ser realizada para a tomada de decisão entre os diferentes tempos de colheita, visando uma otimização de retorno do investimento, optando por uma maior produção de etanol ou energia elétrica.

Tabela 4.7: Síntese dos parâmetros agrônômicos da produção de raiz e resíduos

Variedade	Época de colheita	Raiz (b.u.)	Umidade das raízes (b.u.)	Raiz (b.s.)	Cepa (b.s.)	Umidade da cepa (b.u.)	Rama grossa (b.s.)	Umidade das ramas grossas (b.u.)	Rama fina (b.s.)	Umidade das ramas finas (b.u.)	Relação Resíduo(b.s.)/Raiz (b.u.)
	Meses	Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹	%	Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹	Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹	%	Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹	%	Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹	%	
IAC 90	12	20,62	58,86	8,48	1,37	53,98	1,75	65,33	1,06	68,61	0,203
	18	23,61	62,49	8,86	1,47	62,9	2,06	63,56	1,19	68,61	0,200
	24	16,95	61,98	7,00	1,09	61,98	1,04	70,98	0,36	75,13	0,157
IAC 14	12	30,12	56,72	13,04	1,59	52,36	3,42	59,81	4,20	63,71	0,316
	18	18,76	59,08	7,68	1,55	58,02	2,87	63,94	2,55	66,56	0,372
	24	21,41	57,19	9,11	1,75	57,19	2,69	66,84	1,37	71,01	0,271
48/98	12	27,77	57,01	11,94	1,49	54,55	2,54	61,77	2,49	68,63	0,235
	18	28,52	60,81	11,18	1,95	62,76	3,90	66,05	3,90	68,53	0,342
	24	19,47	61,16	8,29	1,80	61,16	2,40	70,00	1,09	73,23	0,272

4.2 Granulometria

A distribuição granulométrica do material cominuído, e empregado nas análises, está apresentado na Figura 4.1 mostrando que a maior parte do material, cerca de 65% do material apresentou diâmetro médio entre 0,355 mm e 0,149 mm.

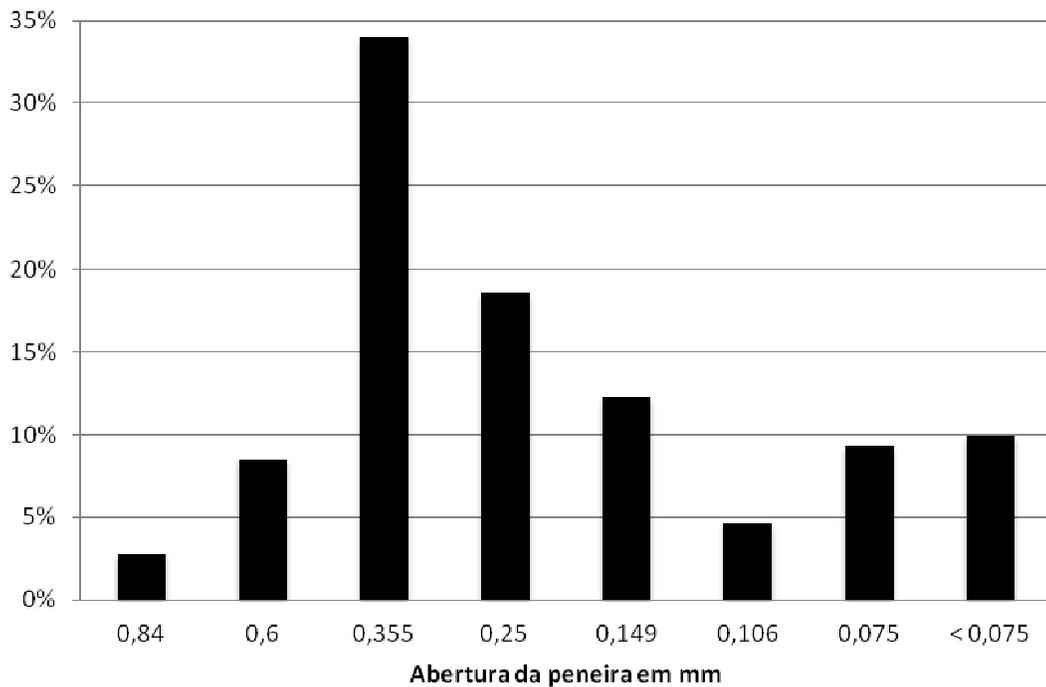


Figura 4.1: Distribuição granulométrica do material cominuído

4.3 Análise imediata

Os valores obtidos neste trabalho encontram-se na Tabela 4.8. O material analisado encontrava-se com umidade de equilíbrio média de 9,62% (b.u.) após ser cominuído e estocado. A relação em massa de produtos voláteis, cinzas e carbono fixo apresentam valores aproximados com os apresentados na Tabela 2.2, obtidos por Jenkins et al. (1998).

Tabela 4.8: Resultados obtidos na análise imediata para resíduos de mandioca de três variedades, três partes da planta em três colheitas

Colheita meses	Variedade	Parte da planta	%Cinzas (b.s.)	%Voláteis (b.s.)	%C Fixo (b.s.)	%Umidade (b.u.)
12	48/98		2,18	85,75	12,07	9,46
18	IAC 90	Cepa	3,41	86,49	10,10	9,74
24	IAC 14		2,76	87,33	9,91	9,60
Média			2,79	86,52	10,69	9,60
12	IAC 14		2,47	85,94	11,59	9,72
18	48/98	Rama fina	2,67	83,54	13,80	10,03
24	IAC 90		3,72	84,43	11,85	9,45
Média			2,95	84,63	12,41	9,73
12	IAC 90		3,06	85,99	10,95	9,45
18	IAC 14	Rama Grossa	2,28	87,00	10,72	9,43
24	48/98		3,62	86,36	10,01	9,69
Média			2,99	86,45	10,56	9,52
Média geral			2,91	85,87	11,22	9,62

Os resultados apresentados neste trabalho apresentam valores menores de cinzas, maiores de matéria volátil e menores de carbono fixo do que Pattiya (2011). As diferenças estão expostas na Tabela 4.9, abaixo.

Tabela 4.9: Comparação entre dados obtidos por Pattiya (2011) e este trabalho para análise imediata de diferentes partes de resíduos de mandioca

	Parte da planta	%Cinzas (b.s.)	%Voláteis (b.s.)	%C Fixo (b.s.)	%Umidade (b.u.)
Pattiya (2011)	Cepa	4,05	77,75	18,2	8,31
	Ramas grossas e finas	6,01	79,9	14,09	15,54
Autor	Cepa	2,79	86,52	10,69	9,60
	Ramas grossas e finas	2,97	85,54	11,49	9,63

Em uma segunda análise, foram averiguados teores de cinzas de 6,44% na cepa. Consta-se que neste caso o material enviado não foi previamente lavado e uma parte de solo agregado ao material foi então computado como cinzas. Trabalhos futuros devem tratar sobre tal assunto e a influência deste material na utilização de ramos e cepa de mandioca para fonte de energia ou ainda possíveis formas de limpeza de tal material.

4.4 Análise elementar

Os resultados para análise elementar seguem análogos aos já descritos na literatura para biomassa com médias de teor de carbono de 42,84%, hidrogênio de 6,25%, oxigênio (por diferença) de 47,21%, nitrogênio de 0,79%, enxofre < 0,2% e cloro < 0,3% aproximando-se mais dos resultados obtidos para madeiras e bagaço de cana do que de cascas, palhas e capim analisados por Jenkins et al. (1998). Os resultados obtidos seguem detalhados na Tabela 4.10.

Tabela 4.10: Resultados obtidos na análise elementar para resíduos de mandioca de três variedades, três partes da planta em três colheitas

Colheita meses	Variedade	Parte da planta	%Carbono	%Hidrogênio	%Oxigênio Por diferença	%Nitrogênio	%Cinzas	%Enxofre	%Cloro
12	48/98	Cepa	42,15	6,44	48,25	0,99	2,18	< 0,2	< 0,3
18	IAC90		41,45	6,28	48,27	0,59	3,41	< 0,2	< 0,3
24	IAC14		43,37	6,34	46,76	0,78	2,76	< 0,2	< 0,3
Média			42,32	6,35	47,76	0,78	2,79	< 0,2	< 0,3
12	IAC14	Rama fina	43,52	6,20	47,27	0,54	2,47	< 0,2	< 0,3
18	48 98		43,13	6,07	46,49	1,65	2,67	< 0,2	< 0,3
24	IAC90		44,07	6,35	45,07	0,79	3,72	< 0,2	< 0,3
Média			43,57	6,21	46,28	0,99	2,95	< 0,2	< 0,3
12	IAC90	Rama grossa	41,61	6,23	48,32	0,78	3,06	< 0,2	< 0,3
18	IAC14		42,68	6,24	48,09	0,73	2,28	< 0,2	< 0,3
24	48 98		43,65	6,12	46,35	0,26	3,62	< 0,2	< 0,3
Média			42,64	6,20	47,59	0,59	2,99	< 0,2	< 0,3
Média geral			42,84	6,25	47,21	0,79	2,91	< 0,2	< 0,3

Na Tabela 4.11, segue a comparação entre os resultados obtidos neste trabalho e Pattiya (2011).

Tabela 4.11: Comparação entre dados obtidos por Pattiya (2011) e este trabalho para análise elementar de diferentes partes de resíduos de mandioca.

	Parte da planta	%Carbono	%Hidrogênio	%Oxigênio Por diferença	%Nitrogênio	%Cinzas	%Enxofre	%Cloro
Pattiya (2011)	Cepa	51,59	6,69	40,45	1,27	4,05	< 0,1	-
	Ramas grossas e finas	51,12	6,87	41,34	0,67	6,01	< 0,1	-
Analisado	Cepa	42,32	6,35	47,76	0,78	2,79	< 0,2	< 0,3
	Ramas grossas e finas	43,11	6,20	46,93	0,79	2,97	< 0,2	< 0,3

4.5 Composição de cinzas e fusibilidade

Nas análises foram verificados altos índices de óxidos alcalinos o que, segundo a literatura, deve conferir baixo ponto de fusão às cinzas deste material, acarretando necessidade de especial atenção a tal problema no desenvolvimento de combustores que utilizem especificamente tal biomassa como combustível.

Dentre os óxidos alcalinos descritos como os que influenciam negativamente no ponto de fusão das cinzas o K_2O , P_2O_5 , CaO e MgO somam 87,39% (em massa) das cinzas geradas pelas ramas e cepa da mandioca.

Os dados acima estão descritos de forma detalhada na Tabela 4.12, abaixo.

Tabela 4.12: Análise elementar das cinzas geradas de cepa e ramas finas e grossas de mandioca

Óxido	Cepa (%)	Ramas finas (%)	Ramas grossas (%)	Média (%)
Na_2O	0,10	0,49	0,25	0,28
MgO	15,55	11,64	14,12	13,77
Al_2O_3	3,41	2,91	0,88	2,40
SiO_2	7,08	2,60	0,65	3,44
P_2O_5	23,83	27,85	24,61	25,43
SO_3^{2-}	3,65	2,48	4,50	3,54
ClO_2	0,52	0,84	0,72	0,69
K_2O	21,29	26,58	31,44	26,43
CaO	21,80	21,85	21,61	21,76
TiO_2	0,28	0,06	0,07	0,14
MnO_2	0,21	0,31	0,15	0,22
Fe_2O_3	1,66	1,65	0,67	1,32
Co_3O_4	0,09	0,04	0,02	0,05
NiO	0,02	0,01	0,02	0,02
CuO	0,28	0,39	0,17	0,28
ZnO	0,08	0,07	0,07	0,08
MoO_2	0,13	0,25	0,06	0,14

Na Tabela 4.13, são apresentados os resultados dos cálculos de relação entre óxidos básicos e ácidos (B/A) e índice alcalino (IA), utilizados para a predição de deposição e

incrustação segundo Miles et al. (1996); Vamvuka e Zografos, (2004); Llorente e García, (2005); Pronobis, (2005 e 2006); Kupka et al, (2008).

Tabela 4.13: Valores da relação entre óxidos (básicos e ácidos) e Índice Alcalino

Parte da planta	B/A		IA	
Cepa	7,82	FC	0,31	M
Rama fina	16,18	FC	0,49	A
Rama grossa	57,99	FC	0,58	A

FC: Fora de correlação;

M: Valor médio de possibilidade de formação de deposição e incrustação;

A: Valor alto de possibilidade de formação de deposição e incrustação.

Os valores obtidos para o indicador B/A estão acima da faixa de correlação proposta por Pronobis (2005) e não permitem a utilização deste parâmetro. No entanto o índice alcalino (IA) indica média possibilidade de formação de depósitos e incrustações na combustão de cepa e alta possibilidade de formação de depósitos e incrustações na combustão das ramas.

Tais dados mostram a necessidade de atenção a tal fator e necessidades de mais testes, inclusive a verificação em laboratório segundo norma ASTM E953/E953M - 08 Standard Test Method for Fusibility of Refuse-Derived Fuel (RDF) Ash no caso da utilização deste material como combustível.

4.6 Análise de Extrativos, Lignina, Celulose e Hemicelulose

As análises realizadas mostraram teores médios de celulose, hemicelulose e lignina (todos já livre de extrativos) de 40,59%, 12,22%, 20,76% respectivamente, assim como uma média de 26,42%, de extrativos. Na Tabela 4.14, os dados são apresentados de forma mais detalhada.

Tabela 4.14: Composição de celulose, hemicelulose, lignina e extrativos da planta de mandioca

Colheita	Variedade	Parte da planta	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Extrativos
12	48/98	Cepa	38,92	10,70	16,43	33,95
18	IAC 90		38,42	10,82	16,36	34,40
24	IAC 14		45,78	14,65	22,33	17,25
Média			41,04	12,06	18,37	28,53
12	IAC 14	Rama fina	41,67	13,83	24,40	20,10
18	48/98		34,62	10,55	25,03	29,80
24	IAC 90		40,05	11,97	20,37	27,60
Média			38,78	12,12	23,27	25,83
12	IAC 90	Rama Grossa	39,78	11,30	19,52	29,40
18	IAC 14		42,93	14,65	24,97	17,45
24	48/98		43,15	11,54	17,47	27,85
Média			41,95	12,50	20,65	24,90
Média geral			40,59	12,22	20,76	26,42

Os dados deste trabalho diferenciam-se quanto ao principal carboidrato estrutural da planta quando comparado com Pattiya (2011) que indica a hemicelulose como tendo teores maiores de 40% assim como menores índices de extrativos, conforme pode-se observar na Tabela 4.15.

Os valores diferentes podem ser explicados por se tratarem de variedades diferentes de mandioca, não referidas por Pattiya (2011), assim como metodologias de análise diferentes podem resultar em diferentes resultados.

Tabela 4.15: Comparação entre dados obtidos por Pattiya (2011) e este trabalho para análise de celulose, hemicelulose e lignina de diferentes partes de resíduos de mandioca

	Parte da planta	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Extrativos
Pattiya (2011)	Cepa	27,82	39,67	21,71	10,8
	Ramas	30,99	36,23	19,56	13,21
Analisado	Cepa	41,17	12,01	18,30	28,53
	Ramas	40,42	12,27	21,95	25,37

Com a futura viabilidade de produção de etanol por holocelulose, 53% da planta, segundo analisado neste estudo, são formados por holocelulose (celulose e hemicelulose) e fornece material passível de ser hidrolisado e processado em etanol.

4.7 Poder calorífico superior

Os valores obtidos nas análises por bomba calorimétrica estão na Tabela 4.16.

O poder calorífico superior dos resíduos de mandioca são próximos aos valores típicos de biomassas lenhosas, gramíneas e outras biomassas não oleaginosas conforme comparado com a Tabela 2.4.

Tabela 4.16: Poder calorífico superior para as diferentes partes da planta analisadas

Parte da planta	PCS (MJ kg ⁻¹)
Cepa	18,95
Rama fina	16,30
Rama grossa	16,38
Média	17,21

No entanto, tais valores encontram-se inferiores aos encontrados por Pattiya (2011) como visto na Tabela 4.17.

Tabela 4.17: Comparação entre dados obtidos por Pattiya (2011) e este trabalho para poder calorífico superior de diferentes partes de resíduos de mandioca

	Parte da planta	PCS (MJ kg⁻¹)
Pattiya (2011)	Cepa	23,67
	Ramas	17,58
Analisado	Cepa	18,95
	Ramas	16,34

4.8 Análise termogravimétrica

A análise termogravimétrica com gás inerte da cepa, variedade 48/98 colhida aos 12 meses, Figura 4.2, apresenta os pontos de evaporação da água a 95°C, e o início da devolatilização a 250°C, com uma taxa máxima de 300°C, seguida por um segundo pico, menor, a 345°C. Estas duas últimas temperaturas podem ser correlacionadas com a máxima degradação de hemicelulose (300°C) e celulose (345°C) conforme proposto por Garcia-Pèrez et al. (2001). O início da formação de carbono fixo pode ser identificado por volta de 370°C.

Tais resultados estão próximos dos valores encontrados por Garcia-Pèrez et al. (2001) em uma análise para bagaço de cana-de-açúcar para a degradação da matéria estrutural do material, a qual, segundo Raveendran et al. (1996) se dá pela adição do comportamento dos componentes constituintes isoladamente, e é mais influenciada pela quantidade dos componentes que pela forma pelos quais estes se apresentam.

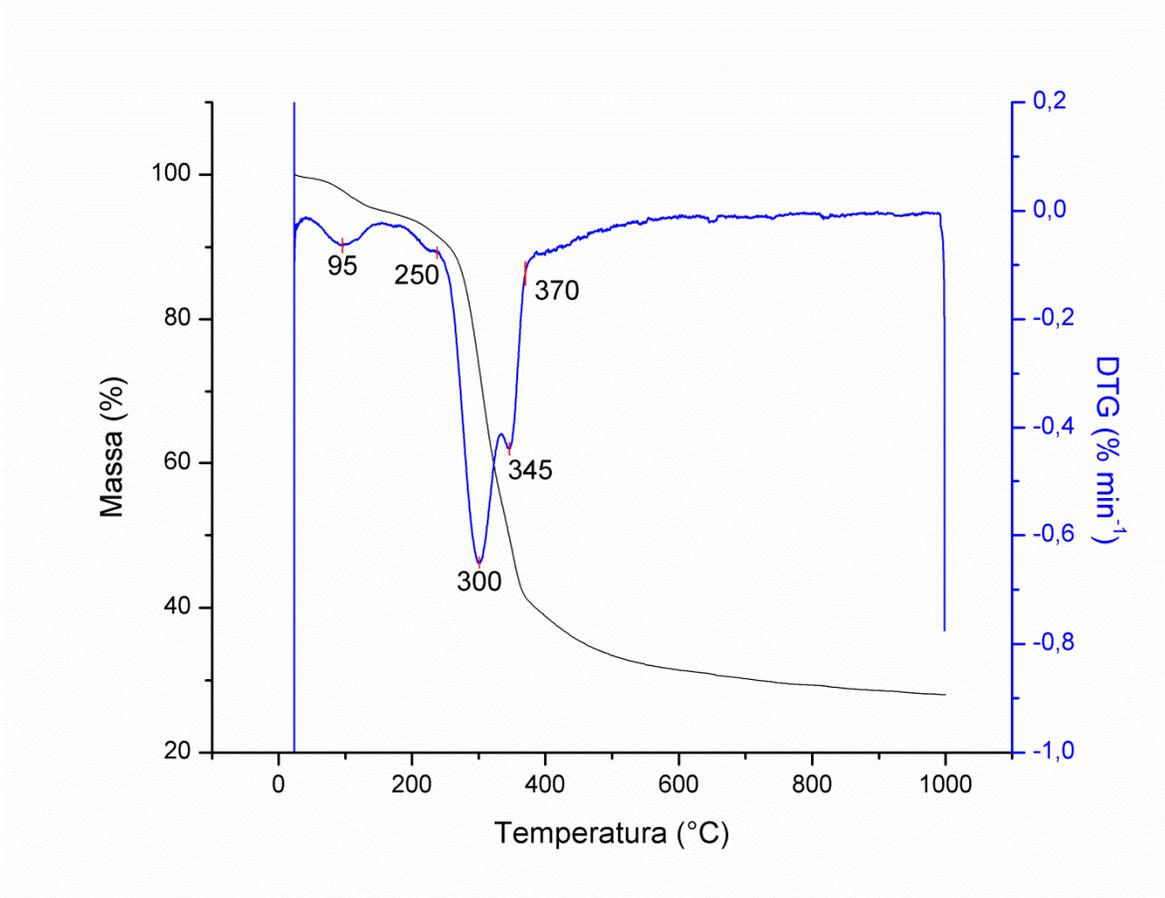


Figura 4.2: Gráfico de TGA e DTG dos resíduos de mandioca em atmosfera inerte

A Figura 4.3, mostra o TGA e DTG, com gás oxidante e identifica possíveis pontos de modificações que estão ocorrendo. Na temperatura de 85°C estima-se que seja a temperatura com maior perda de água. A 235°C provavelmente ocorre a ignição dos voláteis, com máxima taxa de perda de massa a 290°C, a uma taxa ligeiramente superior a de perda de massa em atmosfera inerte.

A 370°C, a taxa de perda de massa torna-se praticamente constante (combustão do carbono fixo) até finalizar por volta de 610°C.

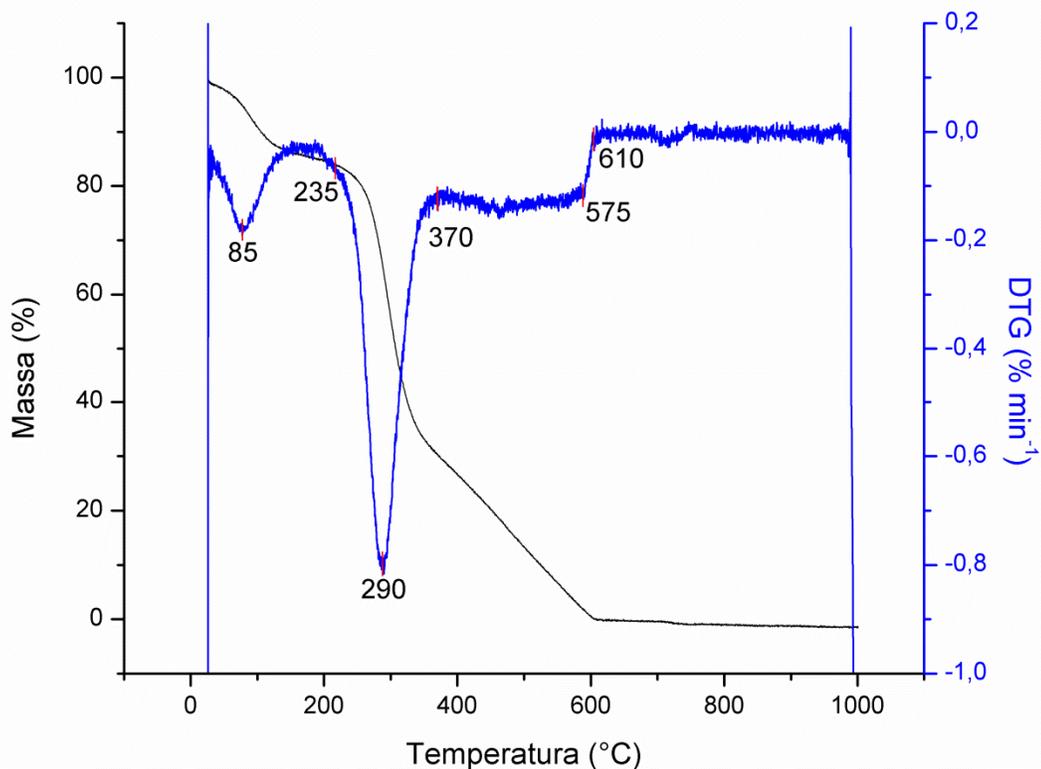


Figura 4.3: Gráfico de TGA e DTG dos resíduos de mandioca em atmosfera oxidante

O ponto de ignição do material pode ser determinado segundo a comparação das curvas de TGA inerte e oxidante e se dá quando a taxa de perda de massa em atmosfera oxidante torna-se maior do que a perda de massa da atmosfera inerte (Tognotti et al. 1985). Contudo na comparação das duas curvas não foi detectado tão claramente tal ponto conforme pode ser visto na Figura 4.4, onde são exibidas as curvas de TGA oxidante e inerte da amostra de cepa, variedade IAC 90, colhida com 18 meses.

Na Figura 4.4, é possível observar o ponto em que se inicia a combustão do carbono fixo, a aproximadamente 370°C, onde a curva de perda de massa em atmosfera inerte começa a se estabilizar enquanto que a perda de massa em atmosfera oxidante continua inalterada.

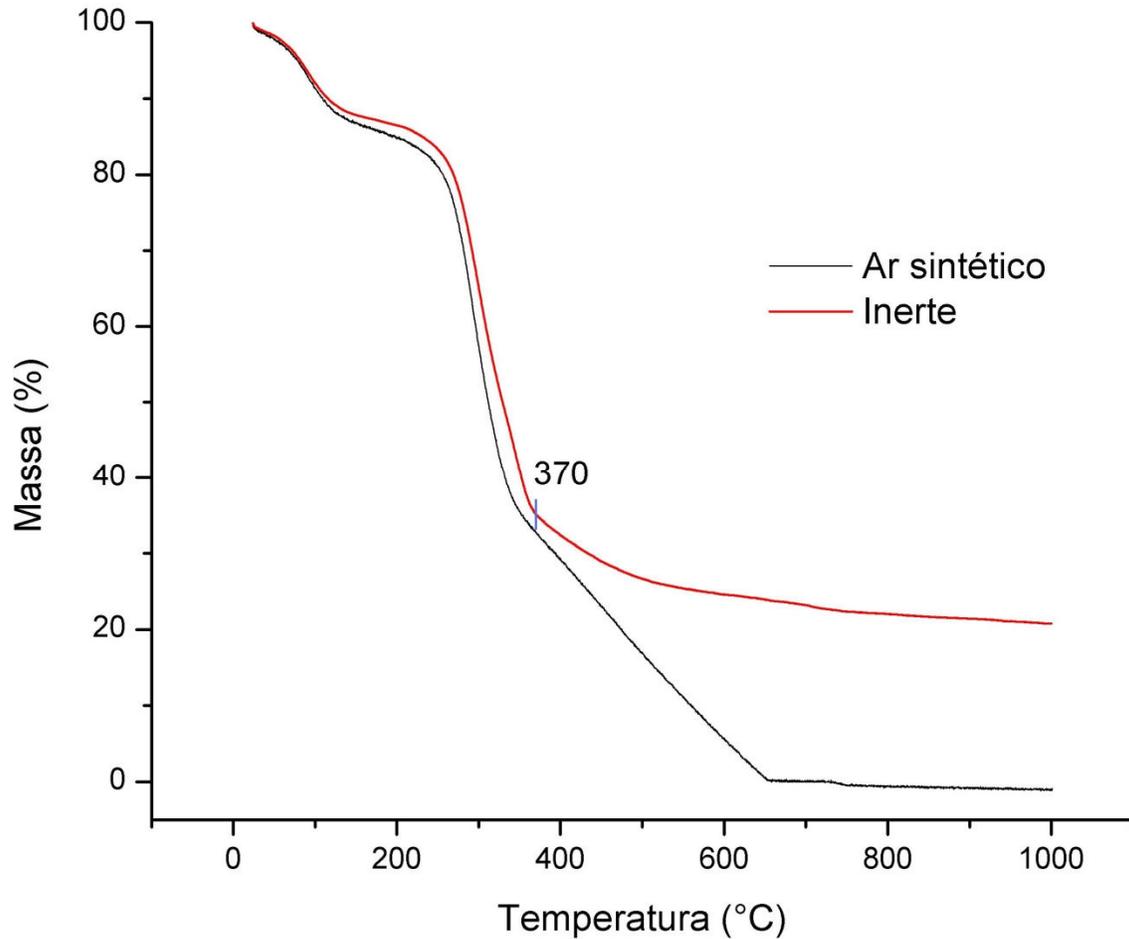


Figura 4.4: TGA do material em atmosfera inerte e oxidante

O observando as duas curvas de DTG, com atmosfera inerte e oxidante, de uma mesma amostra, Figura 4.5, verifica-se um ligeiro aumento na perda de massa em atmosfera oxidante em relação à atmosfera inerte a aproximadamente 235°C onde possivelmente ocorreu a ignição do material. Tal temperatura está próxima da encontrada por Grotkjær et al. (2003) para trigo (220°C) cujos autores argumentam que o alto teor de voláteis influencia na redução do ponto de ignição do material.

Esta baixa temperatura de ignição também pode ser explicada pelo alto teor de potássio presente na planta, assim como a forma na qual ele está presente, agindo como catalisador, não somente para a queima do carbono fixo, mas também na ignição do material (Lang e Hurt, 2002).

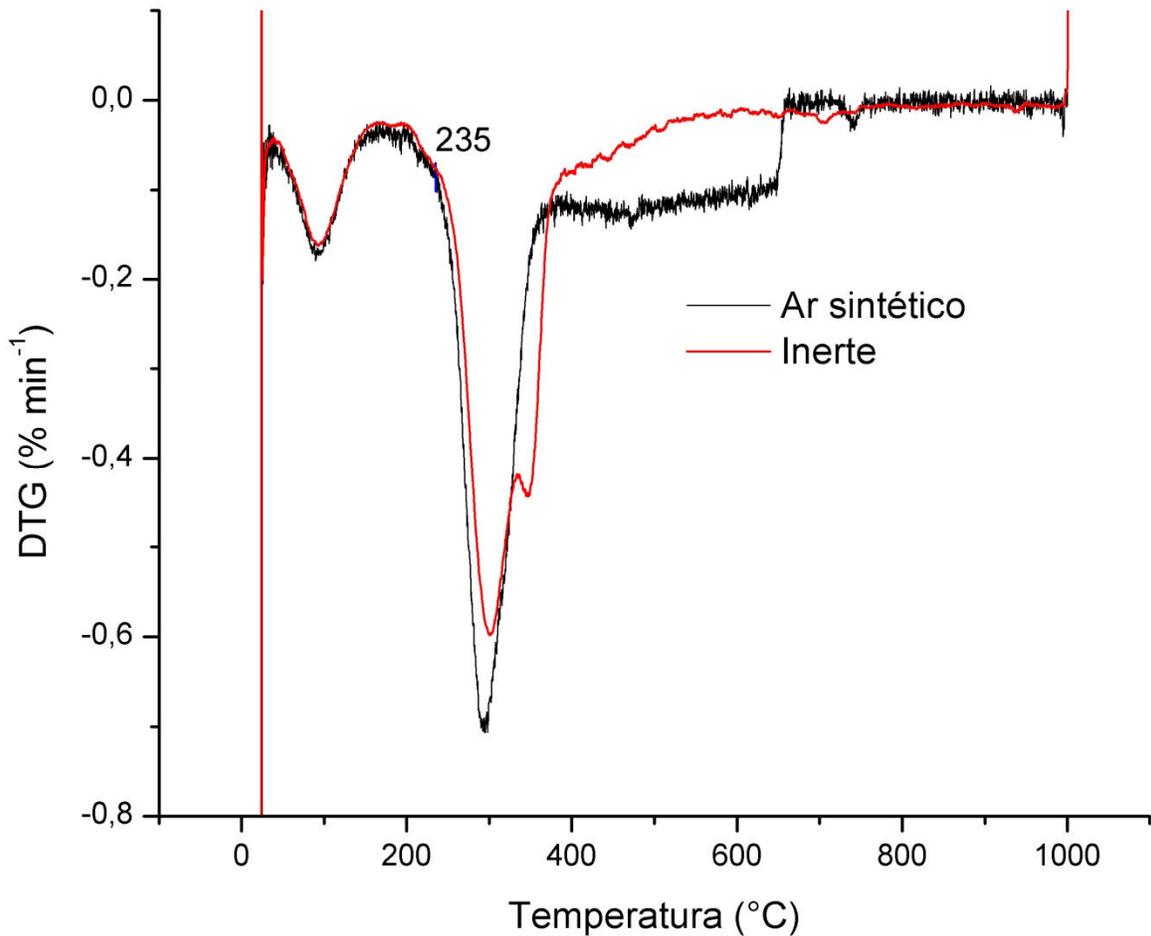


Figura 4.5: Curvas de DTG inerte e oxidante e indicação do ponto de ignição

4.9 Balanço de energia em uma fábrica de etanol de mandioca

Seguindo os parâmetros apresentados nas Tabela 3.2 e Tabela 4.18, são apresentados os valores adotados de temperatura, pressão e então calculada a demanda de vapor para os processos.

Na Tabela 4.19, é apresentada a síntese dos consumos de energia elétrica e térmica, por etapa, com um consumo total de 888 MJ de energia elétrica e de 9.789 MJ de energia térmica, ambos por Mg de etanol produzido. Totalizando 10.670 MJ Mg⁻¹ de etanol, um valor intermediário do apresentado pelos autores Daí et al. (2006) e Salla et al. (2010) e abaixo de Silva et al. (1976) e Serra et al. (1978).

Tabela 4.18: Resumo das condições sugeridas de vapor nos processos de fabricação de etanol de mandioca para uma planta de capacidade de 600.000 l por dia

	Pressão (bar)	Temperatura (°C)
Recepção e lavagem	-	-
Cominuição	-	-
Cozimento, liquefação e sacarificação	2,50	127,40
Fermentação	-	-
Destilação	2,50	127,40

Tabela 4.19: Valores de consumo energético específico por tipo de energia e etapa do processo

	Consumo elétrico (MJ Mg ⁻¹ etanol)	Consumo térmico (MJ Mg ⁻¹ etanol)
Recepção e lavagem	120	0,00
Cominuição	341	0,00
Cozimento, liquefação e sacarificação	86	982
Fermentação	225	0,00
Destilação	116	8.800
Total por tipo	888	9.782

A Tabela 4.20, mostra o consumo de energia total, térmica e elétrica, nas etapas de fabricação de etanol, assim como a somatória geral destas etapas.

Tabela 4.20: Energia total (elétrica e térmica) consumida por etapa

MJ Mg⁻¹ etanol	Este trabalho	Salla et al. (2010)	Dai et al.(2006)	Serra et al.(1978)	Silva et al. (1976)
Recepção e lavagem	120	-	-	-	-
Cominuição	341	280	110	-	-
Cozimento, liquefação e sacarificação	1.068	8.365	1.605	-	-
Filtração	-	-	2.210	-	-
Fermentação	225	75	150	-	-
Destilação	8.916	6.145	5.115	-	-
Suplementares	-	40	-	-	-
Total	10.670	14.905	9.190	26.600	37.220

Os valores calculados neste trabalho estão ligeiramente superiores aos relatados do Dai et al. (2006) e 25% menores que os obtidos por Salla et al. (2010). No entanto são cerca de 60% menor que os relatados em Serra et al. (1978) e 70% menores que Silva et al. (1976). Em relação a estes últimos, a tecnologia disponível a 30 anos pode explicar a discrepância. Tanto em Salla et al. (2010) como em Dai et al. (2006) não são apresentados detalhamento suficiente para se comparar com os resultados deste trabalho.

Esta avaliação deve ser examinada com reservas, pois consideram a soma do consumo de energia elétrica e energia térmica, as quais têm eficiências de conversão muito diferentes. No entanto, nem todos os autores fazem distinção entre as demandas elétrica e térmica.

4.10 Fluxo de energia na indústria

Calculou-se a produção de energia gerada para cada tonelada de raízes processadas, com a utilização de 100% dos resíduos em campo da variedade IAC 14 com colheita aos 12 meses. Esta foi escolhida devido a ter o melhor desempenho quanto à produção de raízes, tanto em base úmida quanto em base seca, e o segundo maior índice de relação entre resíduos e raiz.

A IAC 14 é uma variedade amplamente utilizada na indústria da mandioca e sua produtividade apresentou um valor representativo da região onde foi realizado o plantio.

Segundo a tabela Tabela 4.7 foram produzidos 30,12 Mg⁻¹ de raízes (b.u.) e 316 kg de resíduo (b.s.) por Mg de raiz, ou seja, 451 kg de resíduo a 30% de umidade.

As condições de funcionamento da caldeira foram definidas como 45 bar e 460°C para o vapor, gerando 1.387,6 kg de vapor por Mg de mandioca processada.

O fluxo total de vapor produzido segundo os cálculos é de 152,6 Mg h⁻¹ de vapor o qual é inteiramente utilizado na turbina para geração de energia elétrica produzindo um total de 871,6 MJ de energia elétrica por Mg de raiz de mandioca processada. Ao passar pela turbina, parte do vapor é então extraído para o processo industrial, o qual demanda 734,9 kg de vapor a 2,5 bar por Mg de raiz processada. O vapor de saída da turbina, expandido até a pressão de 0,2 bar absoluto, é condensado em um condensador resfriado a água na torre de refrigeração.

Do montante total de energia elétrica produzida, 1.387,6 MJ Mg⁻¹ de raiz processada, 148,5 MJ são empregados para o processamento de um Mg de raiz, gerando um excedente de 723,2 MJ Mg⁻¹ de raiz de mandioca processada para a fabricação de 163 kg de etanol hidratado (206,5 litros).

O processo acima descrito e o fluxo de energia específica para uma tonelada de raiz processada estão sintetizados na Figura 4.6.

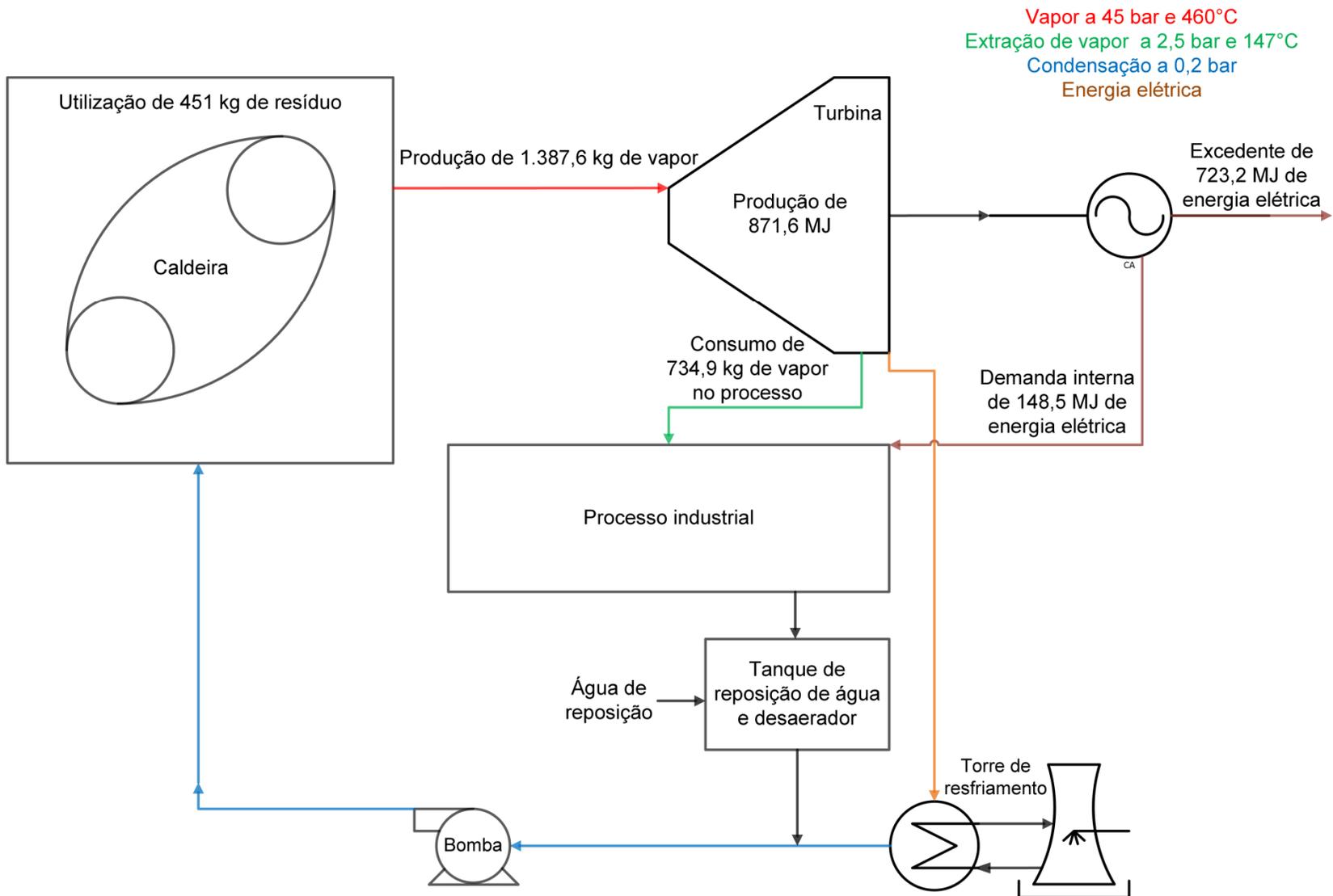


Figura 4.6: Fluxo de energia elétrica e térmica para uma tonelada de mandioca processada

Para uma usina com capacidade de produção de 600.000 L, seriam então processados 2.900 Mg de raízes por dia com a produção média de 1.300 Mg de resíduos a 30% de umidade. Gerando um total de aproximadamente 2.528 GJ por dia (29 MW), destes, 423 GJ por dia (5 MW) seriam empregados para a autossuficiência elétrica da usina enquanto que 2.097 GJ por dia (24 MW) podem ser destinados a comercialização na rede de distribuição.

4.11 Produção de etanol e energia por área

Na Tabela 4.21 abaixo, são expostos os índices de produção por hectare, por ano para a cultura da mandioca, variedade IAC 14, com colheita aos 12 meses, e a comparação aos mesmos índices para cana de açúcar.

Tabela 4.21: Índices de produtividade por hectare e por ano para as culturas da mandioca e cana-de-açúcar

Mandioca (neste estudo)		Cana-de-açúcar		Fonte
Raiz (b.u.)	30,12 Mg	Colmo (b.u.)	85,00 Mg	Brasil (2011)
Resíduos (b.s.)	9,52 Mg	Bagaço (b.s.)	11,05 Mg	CTC (2005)
		Palha (b.s.)	11,90 Mg	CTC (2005)
Etanol	6.220 L	Etanol	6.800 L	Seabra (2008)
Eletricidade excedente	21,8 GJ	Eletricidade excedente*	4,4 GJ	Conab (2011)

*Média para o estado de São Paulo na safra 2009-2010

Nas condições analisadas neste estudo, o potencial de produção de etanol de mandioca em $1 \text{ ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ foi próximo às médias atuais de produção do etanol de cana-de-açúcar.

A produção de resíduos da cultura da mandioca é um pouco menor que 50% dos resíduos da cana-de-açúcar (bagaço e palha). No entanto, a utilização dos resíduos de mandioca apresenta potencial de produção excedente de $21,8 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de energia elétrica, da ordem de seis vezes a energia elétrica necessária ao processo de produção de etanol.

Esta energia é aproximadamente 5 vezes maior do que a média de energia gerada por hectare das usinas de cana-de-açúcar do estado de São Paulo ($4,4 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e ainda 2,4 vezes maior do que as usinas de cana-de-açúcar com melhor desempenho de geração de energia do país, as quais atingem índices de cerca de $9 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Conab, 2011).

5 CONCLUSÃO

A variedade que mostrou o melhor desempenho, neste estudo, foi a IAC 14 colhida aos 12 meses após o plantio, pois apresentou tanto alta produção de raízes, $30,12 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (b.u.) quanto uma das maiores relações de produção de resíduos, 316 kg (b.s.) por tonelada de raiz (b.u.) colhida, entre as três variedades e nas três épocas de colheita avaliadas.

A caracterização dos resíduos da colheita de mandioca como combustível produziu informações importantes para a utilização destes como fonte de energia através de combustão.

Os resíduos atualmente deixados em campo na cultura da mandioca apresentam características gerais próximas às biomassas lenhosas e gramíneas, com poder calorífico superior de $17,21 \text{ MJ kg}^{-1}$ e umidade média em campo de 65% (b.u.). O PCI calculado para a umidade de 30% foi de $10,6 \text{ MJ kg}^{-1}$. Estes resíduos apresentaram uma média de 2,91 % de cinzas, 85,87% de produtos voláteis e 11,22 % de carbono fixo. As cinzas apresentam altos índices de óxidos básicos (26,43% de K_2O e 25,43% de P_2O_5), necessitando de alguns cuidados especiais na utilização deste como combustível, a fim de prevenirem-se depósitos e incrustações devido a uma provável baixa temperatura de amolecimento das cinzas.

O balanço de energia mostrou-se positivo para a variedade, época de colheita escolhidos e resíduos utilizados com uma umidade de 30%. Utilizando o resíduo como combustível, o vapor gerado é suficiente para suprir a demanda de energia térmica e elétrica da usina e ainda gerar cerca de 2.097 GJ por dia (24 MW) de energia elétrica excedente, considerando-se uma usina que produza 600.000 L de etanol hidratado por dia.

O potencial de produção do etanol de mandioca ($6.220 \text{ L ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$) apresentou-se próximo à média de produção de etanol de cana-de-açúcar ($6.800 \text{ L ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$), além de permitir também a produção de energia elétrica excedente utilizando os resíduos de campo da mandioca em um sistema de cogeração de energia térmica e elétrica com valores maiores que os atualmente encontrados no setor sucroalcooleiro de energia produzida por hectare.

Com a finalidade da viabilização técnica da produção de etanol e energia elétrica das raízes de mandioca e seus resíduos, sugerem-se os seguintes estudos:

- Formas de armazenamento e recolhimento dos resíduos da colheita, com fins de preservar suas características como combustível e reduzir sua umidade média;
- Métodos e processos eficientes de combustão adequados às características apresentadas pelos resíduos estudados.

REFERÊNCIAS

APEC GROUP, E. W. The Future of Liquid Biofuels for APEC Economies. **Renewable Energy**, n. May, 2008.

ASTM D1857/D1857M-04(2010) Standard Test Method for Fusibility of Coal and Coke Ash. **Book of Standards** Volume: 05.06 <www.astm.org> acessado em 10/02/2011.

ASTM D2015-00 Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter <www.astm.org> acessado em 10/02/2011.

ASTM E1617-09 Standard Practice for Reporting Particle Size Characterization Data. **Book of Standards** Volume: 14.02<www.astm.org> acessado em 10/02/2011.

ASTM E1755 - 01 - Standard Test Method for Ash in Biomass. **Book of Standards** Volume: 11.06<www.astm.org> acessado em 10/02/2011.

ASTM E953/E953M-08 Standard Test Method for Fusibility of Refuse-Derived Fuel (RDF) Ash. **Book of Standards** Volume: 11.04<www.astm.org> acessado em 10/02/2011.

BERNDES G, HOOGWIK M, VAN DEN BROEK R. The contribution of biomass in the future of global energy supply: a review of 17 studies. **Biomass Bioenergy** 2003;25:1–28.

BIZZO, W. A. Combustão. **EM 722 - Geração, Distribuição e Utilização de Vapor**. (Apostila de Curso) 2003 p. 1-17.

BOOG, E. G., BIZZO, W. A., VALLE, T. L. Avaliação do Potencial Energético dos Resíduos de Campo da Cultura da Mandioca **Revista RAT**, v. 3, 2007.

BRASIL - MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E DO COMÉRCIO/SECRETARIA DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL **Álcool de mandioca 10.000 l/d (hidratado): Projeto referência**. Brasília, 1980.

BRASIL - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, Secretaria de Produção e Agroenergia, Departamento de Cana-de-açúcar e Agroenergia **Anuário estatístico da Agroenergia 2010**. Brasília, 2011.

BRETHAUER, S.; WYMAN, C. E. Review: Continuous hydrolysis and fermentation for cellulosic ethanol production. **Bioresource technology**, v. 101, n. 13, p. 4862-74, jul 2010.

CAMACHO, I. A. O.; CABELLO, C. Utilização Dos Resíduos Do Processamento De Mandioca Para Produção De Bio-Etanol Na Alimentação De Aves. **XIII Congresso Brasileiro de Mandioca**, p. 969-975, 2009.

CAMARGO, C. A.; USHIMA A. H. **Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool: Manual de recomendações**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990. p. 796.

CARDOSO, C. E. L. Cadeia produtiva da mandioca: situação atual, perspectivas de mercado e limitações: Situação atual e pontos fortes. **Apresentação Embrapa**, 2009.

CARDOSO, C. E. L. **Competitividade e inovação tecnológica na cadeia agroindustrial da fécula de mandioca no Brasil**. 2003. 130f. (tese de doutorado) Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz; Universidade de São Paulo, Piracicaba.

CARVALHO, F. M. D.; VIANA, A. E. S.; CARDOSO, C. E. L.; MATSUMOTO, S. N.; GOMES, I. R. Sistemas de produção de mandioca em treze municípios da Região Sudoeste da Bahia. **Bragantia**, v. 68, n. 3, p. 699-702, set 2009.

CARVALHO, J. L. H. **A mandioca: raiz, parte aérea e subprodutos da indústria na alimentação animal**. In: CURSO INTENSIVO NACIONAL DE MANDIOCA. Cruz das Almas: Centro Nacional de Pesquisa de Mandioca e Fruticultura (CNPMPF), Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), p.93 1986.

BRESSAN FILHO, A. **A geração Termoelétrica com a Queima do Bagaço de Cana-de-Açúcar no Brasil – Análise do Desempenho da Safra 2009-2010** Diretoria de Política Agrícola e Informações, Superintendência de Informações do Agronegócio, Conab, março de 2011.

CONCEIÇÃO, A. J. **A mandioca**. São Paulo: Nobel, 3ª Edição, 2ª Reimpressão, 382 p. 1987.

CORTEZ L. A. B.; LORA E. E. S.; GÓMEZ E. O. Caracterização da Biomassa. In: CORTEZ L. A. B.; LORA E. E. S.; GÓMEZ E. O. **Biomassa para energia**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008.

DAI, D.; HU, Z.; PU, G.; LI, H.; WANG, C. Energy efficiency and potentials of cassava fuel ethanol in Guangxi region of China. **Energy Conversion and Management**, v. 47, p. 1686-1699, 2006.

EASTERLY, J. L.; BURNHAM, M. Overview Of Biomass And Waste Fuel For Power Production. **Biomass and Bioenergy**, v. 10, n. 95, p. 79-92, 1996.

EMBRAPA MANDIOCA E FRUTICULTURA, Cultivo da mandioca na região centro sul do Brasil. **Sistemas de Produção** 7, 2003. Versão eletrônica Disponível em: <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Mandioca/mandioca_centrosul/index.htm> acessado em 12/04/2012.

FAOSTAT – **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2010 <<http://faostat.fao.org/>> acessado em 13/04/2012

FERREIRA-LEITÃO, V.; GOTTSCHALK, L. M.F.; FERRARA, M.A.; NEPOMUCENO, A. L.; MOLINARI, H. B. C.; BON, E. P. S. Biomass Residues in Brazil: Availability and Potential Uses. **Waste and Biomass Valorization**, v. 1, n. 1, p. 65-76, 7 fev 2010.

FINGUERUT, J.; MEIRELLES, A. J. A.; GUIRARDELLO, R.; COSTA, A. C. Fermentação, Hidrólise e Destilação. In: CORTEZ L. A. B.; LORA E. E. S.; GÓMEZ E. O. **Biomassa para energia**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008.

GARCÍA-PÉREZ, M.; CHAALA, A.; YANG, J.; ROY, C. Co-pyrolysis of sugarcane bagasse with petroleum residue. Part I: thermogravimetric analysis. **Fuel**, v. 80, n. 9, p. 1245-1258, jul 2001.

GRANER, E. A.; GODOY JÚNIOR, C.; ORSI, E. W. L.; TOLEDO, F. F.; GODOY, O. P.; ABRAHÃO, J. T. M.; COSTA, J. D.; FILHO, J. M. **Agricultura**. Volume II. USP. ESALQ, Piracicaba. São Paulo, 1973.

GROTKJÆR, T.; DAM-JOHANSEN, K.; JENSEN, A. D.; GLARBORG, P. An experimental study of biomass ignition. **Fuel**, v. 82, n. 7, p. 825-833, maio 2003.

HANSEN, L. A.; FRANDBSEN, F. J.; DAM-JOHANSEN, K.; SUND, H. Quantification of fusion in ashes from solid fuel combustion. **Thermochemica Acta**, v. 326, p. 105-117, 1999.

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

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Levantamento Sistemático da produção Agrícola**, 2012.

<<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/agropecuaria/lspa/>> acessado em: 04/03/2012

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA, <http://www.iea.sp.gov.br/> acessado em 20/05/2012.

Intergovernmental Panel on Climate Change 2007 : **An Assessment of the IPCC**. November, p. 12-17, 2007.

IRMÃO, J. N.; FIGUEIREDO, M. P.; PEREIRA, L. G. R.; FERREIRA, J. Q.; RECH, J. L.; OLIVEIRA, B. M. Composição química do feno da parte aérea da mandioca em diferentes idades de corte **Rev. Bras. Saúde Prod. An.**, v.9, n.1, p. 158-169, jan/mar, 2008

JENKINS, B. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 54, n. 1-3, p. 17-46, mar 1998.

JOSÉ, H. J.; BORK, J. A. Caracterização de resíduos In: Nogueira, M. F. M. Mini Curso conversão de resíduos em energia, **III Escola de Combustão**. 2011.

KUPKA, T.; MANCINI, M.; IRMER, M.; WEBER, R. Investigation of ash deposit formation during co-firing of coal with sewage sludge, saw-dust and refuse derived fuel. **Fuel**, v. 87, n. 12, p. 2824-2837, set 2008.

LAL, R. World crop residues production and implications of its use as a biofuel. **Environment international**, v. 31, n. 4, p. 575-84, maio 2005.

LANG, T.; HURT, R. H. Char Combustion Reactivities For a Suite Of Diverse Solid Fuels And Char-Forming Organic Model Compounds. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 29, p. 423-431, 2002.

LEAL, M. R. L. V.; TARÁNTOLA, F.; ROGGIERO, A.; CASTRO, D.; CORTEZ, L. A. B. Produção de Etanol em Regiões Semi-áridas. In: CORTEZ L. A. B.; LORA E. E. S.; GÓMEZ E. O. **Biomassa para energia**. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2008.

LEONEL, M.; CEREDA, M. P. Melhoria do Rendimento de Hidrólise Enzimática para Produção de Etanol a Partir de Farelo de Mandioca. **Brazilian Journal of food technology**, v. 2, p. 111-118, 1999.

LLORENTE, M. J. F.; GARCÍA, J. E. C. Comparing methods for predicting the sintering of biomass ash in combustion. **Fuel**, v. 84, n. 14-15, p. 1893-1900, out 2005.

LLORENTE, M. J. F.; GARCÍA, J. E. C. Concentration of elements in woody and herbaceous biomass as a function of the dry ashing temperature. **Fuel**, v. 85, n. 9, p. 1273-1279, jun 2006.

LORENZI, J. O.; OTSUBO, A. A.; MONTEIRO, D. A.; VALLE, T. L. Aspectos Fitotécnicos da Mandioca em Mato Grosso do Sul. In: OTSUBO, A. A.; MERCANTE, F. M.; MARTINS, C. S. **Aspectos do Cultivo da Mandioca em Mato Grosso do Sul**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Campo Grande: UNIDERP, 219 p. 2002.

MACEDO, I. C. Situação atual e perspectivas do etanol. **Estudos Avançados**. v. 21, n. 59, p. 157-165, 2007.

MARDER, R. C.; CRUZ, R. DE A.; MORENO, M. A.; CURRAN, A.; TRIM, D. S. Investigating Sour Starch Production in Brazil. In: DUFOUR, D.; O'BRIEN, G. M.; BEST, R. (Eds.). **Cassava Flour and Starch: Progress in Research and Development**. CIAT, 1996. p. 409.

MARTINO, D. C. **Estudo da branqueabilidade e da qualidade de polpas de Eucalyptus spp. de diferentes origens**. 2011, 56 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MILES, T. R.; BAXTER, L. L.; BRYERS, R. W. Deposits From Firing I. **Science**, v. 1, p. 125-138, 1996.

MICHELSSEN, H. P.; FRANDBSEN, F.; DAM-JOHANSEN, K.; LARSEN, O. H. Deposition and high temperature corrosion in a 10 MW straw fired boiler. **Fuel Processing Technology**, v. 54, n. 1-3, p. 95-108, mar 1998.

MOURA, G. D. M.; COSTA, N. D. L. Efeito da frequência e altura de poda na produtividade de raízes e parte aérea em mandioca. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, n. 8, p. 1053-1059, ago 2001.

OECD/FAO **Agricultural Outlook**. Chapter 3 Biofuels, p. 93, 2011.

OLSEN, H. S. Enzymatic Production of glucose syrups. In: KEARSLEY, M. W.; DZIEDZIC, S. Z. **Handbook of starch hydrolysis products and their derivatives**. Blackie Academic & Professional, Glasgow. 1995. p. 275.

PAES, L. A. D.; OLIVEIRA, M. A. Potential trash biomass of the sugar cane plant In.: HASSUANI, S. J., LEAL, M. R. L. V., MACEDO, I. C. **Biomass power generation**. Piracicaba: PNUD-CTC, 2005. P. 216

PATTIYA, A. Thermochemical Characterization of Agricultural Wastes from Thai Cassava Plantations. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects**, v. 33, n. 8, p. 691-701, fev 2011.

PHILLIPS, T. P. **Cassava utilization and potential markets**. Ottawa International Development Research Centre 182 p. 1974.

PIMENTEL, D. Ethanol Fuels: Energy Balance, Economics, and Environmental Impacts are Negative. **Energy**, v. 12, n. 2, 2003.

PRONOBIS, M. Evaluation of the influence of biomass co-combustion on boiler furnace slagging by means of fusibility correlations. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, n. 4, p. 375-383, abr 2005.

PRONOBIS, M. The influence of biomass co-combustion on boiler fouling and efficiency. **Fuel**, v. 85, n. 4, p. 474-480, mar 2006.

RAVEENDRAN, K.; GANESH, A.; KHILAR, K. C. Pyrolysis characteristics of biomass and biomass components. **Fuel**, v. 75, n. 8, p. 987-998, jun 1996.

SALLA, D. A.; FURLANETO, F. P. B.; CABELLO, C.; KANTHACK, R. A. D. Análise energética de sistemas de produção de etanol de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 333, n. 68, p. 444-448, 2010.

SÁNCHEZ, C. G. Caracterização das Biomassas. In: SÁNCHEZ, C. G. **Tecnologia de gaseificação de biomassa**. Campinas, SP: Editora Átomo, 2010.

SCALON FILHO, H.; ALVES SOBRINHO, T.; SOUZA, C. M. A. Desempenho de dois equipamentos na colheita semimecanizada da cultura da mandioca. **Eng. Agríc. Jaboticabal**, v. 25, p. 557-564, 2005.

SEABRA, J.E.A. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil**. 2008. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

SERRA, G. E.; GOLDONBERG, J.; MOREIRA, J. R.; CARVALHO, C. M., **Estudio Energetico de Alternativas Brasileiras para Produção de Energia Renovavel**. XV Convención UPADI 1º - Santiago – Chile, 7 Octubre, 1978.

SILVA, J.G. DA; SERRA, G.E.; MOREIRA, J.R.; GONÇALVES, J.C. Balanço energético cultural da produção de álcool etílico de cana-de-açúcar, mandioca e sorgo da sacarino - fase agrícola e industrial. **Brasil Açucareiro**, v., n.6, p.8-21, 1976.

SOLOMON, B. D.; BARNES, J. R.; HALVORSEN, K. E. Grain and cellulosic ethanol: History, economics, and energy policy. **Biomass and Bioenergy**, v. 31, n. 6, p. 416-425, jun 2007.

TAPPI 264 cm-97. Preparation of wood for chemical analysis. **TAPPI PRESS**, Atlanta, 1988.

TAPPI 222 om-02. Acid-insoluble lignin in wood and pulp. **TAPPI PRESS**, Atlanta, 1988.

TAPPI UM 250. Acid-soluble lignin in wood pulps. **TAPPI PRESS**, Atlanta, 1985.

TOGNOTTI, L.; MALOTTI, A.; PETARCA, L.; ZANELLI, S. Measurement of Ignition Temperature of Coal Particles Technique Using a Thermogravimetric Technique. **Combustion Science and Technology**, v. 44, p. 15-28, 1985.

TOLEDO, F. F. **Mandioca : estudo da produção de folhas, ramas e raízes visando o aproveitamento integral da planta**. 1961. Tese (Livre Docência), 51p. Universidade de São Paulo, Piracicaba.

VALLE, T. L; FELTRAN, J. C; CARVALHO, C. R. L. **Mandioca para produção de etanol**. 2009. Versão eletrônica disponível em <<http://www.iac.sp.gov.br/Tecnologias/Rtanolmandioca/mandioca.pdf>> acessado em 10/06/2011

VAMVUKA, D.; ZOGRAFOS, D. Predicting the behaviour of ash from agricultural wastes during combustion. **Fuel**, v. 83, n. 14-15, p. 2051-2057, out 2004.

VILPOUX, O. Produtos de Mandioca e a Evolução de Seus Mercados. In: OTSUBO, A. A.; MERCANTE, F. M.; MARTINS, C. S. **Aspectos do Cultivo da Mandioca em Mato Grosso do Sul**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Campo Grande: UNIDERP, 219 p. 2002.

WALLIS, A.F.A., WEARNE, R.H., WRIGHT, P.J. Chemical analysis of polysaccharides in plantation eucalypt woods and pulps. **Appita Journal**, v. 49(4), p. 258-262, 1996.

WERTHER, J.; SAENGER, M.; HARTGE, E.-U.; OGADA, T.; SIAGI, Z. Combustion of agricultural residues. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 26, p. 1-27, fev 2000.