

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**BIOMASSA CULTIVADA PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA:
Estudo Comparativo entre Capim Elefante e Eucalipto com a incorporação
da Energia Solar na Secagem**

Evane da Silva

Itajubá, agosto de 2012

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

Evane da Silva

**BIOMASSA CULTIVADA PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA: Estudo
Comparativo entre Capim Elefante e Eucalipto com a incorporação da
Energia Solar na Secagem**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Energia como
parte dos requisitos para obtenção do Título de
Mestre em Ciências em Engenharia de Energia.**

**Área de Concentração: Exploração do Uso
Racional de Recursos Naturais e Energia**

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Rocha

**Agosto de 2012
Itajubá**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Cristiane N. C. Carpinteiro- CRB_6/1702

S586b

Silva, Evane da

Biomassa cultivada para produção de energia: estudo comparativo entre capim elefante e eucalipto com a incorporação da energia solar na secagem.
/ por Evane da Silva. – Itajubá (MG): [s.n.], 2012.

94 p.: il.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto Rocha.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Pennisetum purpureum. 2. Eucalyptus. 3. Eficiência energética. I.
Rocha, Carlos Roberto, orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III.
Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

Evane da Silva

**BIOMASSA CULTIVADA PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA: Estudo
Comparativo entre Capim Elefante e Eucalipto com a incorporação da
Energia Solar na Secagem**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 13 de agosto de 2012, conferido ao autor o título de *Mestre em Ciências em Engenharia de Energia*.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Carlos Roberto Rocha (Orientador)

Prof. Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira

Prof. Dr. Paulo Sérgio de Souza

Itajubá

2012

AGRADECIMENTOS

A Deus por proporcionar-me a conclusão de mais uma etapa da vida que se consuma neste trabalho.

Aos meus pais, irmãos, minha esposa Márcia Alves dos Santos Silva, meus filhos Vinícius Santos Silva e Bruno Henrique Santos Silva, que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Ao professor e orientador Dr. Carlos Roberto Rocha e sua esposa Dra Sandy Lia dos Santos pelo apoio e inspiração no amadurecimento dos meus conhecimentos e conceitos que me levaram a execução e conclusão deste estudo.

A todos os professores da Universidade Federal de Itajubá que fizeram parte do corpo docente deste curso de pós-graduação Stricto Sensu, pela contribuição acadêmica através de questionamentos e de argumentações técnico científicas.

A todos os colegas de turma pelos agradáveis momentos vividos e pelo grande elo de amizade formado.

Ao professor Paulo Fernando Trugilho em nome da Universidade Federal de Lavras, pela disponibilização do laboratório do Departamento de Ciências Florestais, para realização de parte do experimento.

E por fim, agradeço aos servidores do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas Gerais - campus Muzambinho pelo incentivo e apoio, pela confiança e por acreditarem no meu trabalho como professor e pesquisador.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará ao seu tamanho original”.

(ALBERT EINSTEIN)

RESUMO

Atualmente, realizam-se pesquisas para o uso de capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) que é considerado uma espécie de alta eficiência fotossintética (metabolismo C4), isto resulta numa grande capacidade de acumulação de matéria seca, possuindo também características qualitativas que a credenciam a ser estudada para a produção de energia, como por exemplo, um percentual de fibra elevado, semelhante à cana-de-açúcar (QUESADA et al., 2004). Em vários locais o capim elefante é utilizado principalmente para alimentação de bovinos, sendo cultivado em pastagens, que representam no Brasil cerca de 170 milhões de hectares ocupadas com espécies nativas e cultivadas, incluindo a espécie *Pennisetum* ssp. (IBGE, 2006). As tecnologias utilizadas atualmente foram desenvolvidas para a utilização de biomassa em toras, principalmente de eucalipto que pode ser seco ao sol e utilizado em seu estado natural. Porém, há dificuldades de manuseio do capim elefante no seu estado natural para o uso na geração de energia, necessitando do desenvolvimento de tecnologias para facilitar a sua secagem, transporte, estocagem, alimentação automática em caldeira, e principalmente, para aumentar a eficiência na combustão e conversão em energia útil. O objetivo deste estudo foi desenvolver soluções para a utilização do capim elefante como biomassa para geração de energia de forma mais eficiente do ponto de vista energético e de facilidade de manuseio no armazenamento, transporte e alimentação automática para fornalha de caldeiras. Para atender estas exigências foi utilizada biomassa picada e seca ao sol (tanto de capim elefante quanto de eucalipto); analisados os benefícios de trabalhar com a biomassa picada e a correspondente facilidade de secagem ao sol da biomassa recém-colhida de capim elefante e de eucalipto; também foram avaliados o consumo de energia para picar, a taxa de secagem, o ganho energético com a incorporação da energia solar e medido o Poder Calorífico Superior (PCS) de diferentes cultivares de capim elefante e de diferentes espécies de eucalipto; realizou-se análises elementar para determinação dos componentes químicos elementares (Nitrogênio, Carbono, Hidrogênio, Oxigênio e Enxofre) e foi estimado: o Poder Calorífico Inferior (PCI); o Poder Calorífico Líquido (PCL) e o Poder Calorífico Útil (PCU) em função da umidade das biomassas, e também foi realizados ensaios de alimentação e queima de biomassa picada e seca ao sol, em caldeira para verificar sua facilidade de manuseio, com uma cultivar de capim elefante e uma espécie de eucalipto. Com conclusão deste trabalho pode-se destacar: o ganho energético de 30,8% quanto comparado à queima de capim elefante picado e seco ao sol (umidade de equilíbrio de 10%) com relação à umidade de colheita (~70%) e um ganho 12,8% para o eucalipto picado e seco ao sol (umidade de equilíbrio de 10%) com relação à umidade de colheita (~55%) e também pode-se concluir que a utilização do capim elefante como biomassa picada resultou em maior facilidade de alimentação e queima na caldeira.

Palavras-chave: *Pennisetum purpureum* Schum; *Eucalyptus*; eficiência energética.

ABSTRACT

Currently, studies are carried out for the use of elephant grass (*Pennisetum purpureum* Schum.) which is considered a kind of high photosynthetic efficiency (C4 metabolism), this results in a large capacity of dry matter accumulation, but also have qualitative features that accredit being studied for energy production, for example, a high percentage of fiber, similar to cane sugar (Quesada et al. 2004). In several places the elephant grass is mainly used for feeding cattle, being cultivated in pastures, representing in Brazil about 170 million hectares planted with native and cultivated species, including species *Pennisetum* spp. (IBGE, 2006). The technologies used today were developed for the use of biomass in logs, mainly eucalyptus that can be sun-dried and used in their natural state. However, there are difficulties in handling the elephant grass in its natural state for use in power generation, requiring the development of technologies to facilitate drying, transportation, storage, Automatic feeding in boiler, and especially to increase efficiency in the combustion and conversion into useful energy. The aim of this study was to develop solutions for the use of elephant grass as biomass for energy more efficiently in terms of energy and ease of handling in the storage, transportation and auto power to furnace boiler. To meet these requirements we used biomass and chopped sun-dried (both elephant grass as eucalyptus) analyzed the benefits of working with biomass and the corresponding ease of sun drying the freshly harvested biomass of elephant grass and eucalyptus; were also evaluated energy consumption for chopping, the drying rate, the energy gain by incorporating solar and measured the Higher Calorific Value (PCS) of different cultivars of elephant grass and different species of eucalyptus; held analyzes Elementary for determination of chemical elementary (Nitrogen, Carbon, Hydrogen, Oxygen, and Sulfur) and was estimated: the Lower Calorific Value (PCI), the Net Calorific Value (PCL) and Net Calorific Value (PCU) in function of moisture of biomass, and was also conducted feeding trials and biomass burning and chopped sun-dried in boiler to check your ease of use, with a growing elephant grass and eucalyptus species. With completion of this work can be highlighted: the energy gain of 30.8% as compared to the burning of elephant grass and chopped sun-dried (equilibrium moisture content of 10%) with respect to moisture crop (~ 70%) and a 12.8% gain for eucalyptus and chopped sun-dried (equilibrium moisture content of 10%) with respect to moisture crop (~ 55%) and can also be concluded that the use of elephant grass as biomass resulted in ease of feeding and burning in the boiler.

Keywords: *Pennisetum purpureum* Schum; Eucalyptus; Energy efficiency.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	11
2.1. Objetivo geral.....	11
2.2. Objetivos específicos	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1. Introdução	12
3.2. Metabolismo fotossintético e produção de biomassa	13
3.2.1. Fotossíntese	13
3.2.2. Metabolismo C3	13
3.2.3. Metabolismo C4	13
3.3. Capim elefante	14
3.3.1. Potencial energético do capim elefante	14
3.3.2. Produção agrícola do capim elefante.....	15
3.3.3. Relação entre produção do capim elefante e o clima	17
3.3.4. Relação entre produção do capim elefante e a altura de corte.....	17
3.4. Eucalipto	18
3.4.1. Potencial energético do Eucalipto	18
3.4.2. Produção agrícola do Eucalipto.....	18
3.4.3. Relação entre produção do eucalipto e o clima	22
3.4.4. Relação entre produção do eucalipto e a idade de corte.....	23
3.5. Colheita e processamento da biomassa	24
3.5.1. Teor de umidade da biomassa na colheita	24
3.5.2. Secagem de biomassa.....	24
3.5.3. Caracterização da biomassa.....	25
3.6. Produção de energia	28
3.6.1. Poder Calorífico	28
3.6.2. Avaliação do rendimento energético de caldeira pelo Método Indireto	30
4. METODOLOGIA	38
4.1. Introdução	38
4.2. Seleção e colheita das amostras de biomassas	39
4.2.1. Capim elefante “Roxo”	40
4.2.2. Capim elefante “Napier”	42
4.2.3. Capim elefante “Paraíso”	43
4.2.4. Eucalipto <i>E. urophylla</i>	45
4.2.5. Eucalipto <i>E. grandis</i>	47
4.2.6. Eucalipto <i>E. citriodora</i>	48

4.3. Determinação da umidade da biomassa na colheita	50
4.4. Determinação do consumo de diesel para picar a biomassa.....	51
4.4.1. Máquinas utilizadas para picar as Biomassas.....	51
4.4.2. Consumo de diesel para picar as Biomassas	53
4.5. Determinação do Poder Calorífico Superior (PCS)	53
4.5.1. Secagem das amostras trituradas em estufa.....	53
4.5.2. Moagem das amostras	54
4.5.3. Peneiragem das amostras.....	55
4.5.4. Secagem das amostras peneiradas em estufa a $103\pm3^{\circ}\text{C}$	56
4.5.5. Fração de 40-60 mesh para quantificação do PCS	57
4.5.6. Determinação do PCS	57
4.5.7. Análise elementar (N-C-H-S-O) da fração 200-270 mesh	60
4.6. Determinação do PCI (Poder Calorífico Inferior).....	61
4.6.1. Determinação do PCL em função da umidade por kg de massa total	61
4.6.2. PCL em função da umidade por kg de massa seca.....	61
4.6.3. Determinação do PCU em função da umidade.....	62
4.7. Secagem ao sol da biomassa picada.....	63
4.8. Desempenho da alimentação e queima da biomassa picada	65
4.8.1. Caldeira adaptada para queima de biomassa picada.....	65
4.8.2. Alimentação e queima de capim elefante “Napier” picado	67
4.8.3. Alimentação e queima de eucalipto <i>E. urophylla</i> picado	68
4.9. Determinação do aumento de eficiência energética na utilização da biomassa	69
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	71
5.1. Umidade da biomassa na colheita	71
5.2. Determinação do Poder Calorífico Superior (PCS)	71
5.3. Análise elementar (N-C-H-S-O) da fração 200-270 mesh.....	72
5.4. Poder Calorífico Inferior (PCI)	73
5.5. Poder Calorífico Líquido (PCL) em função do teor de umidade	74
5.6. Poder Calorífico Útil (PCU) em função do teor de umidade	77
5.7. Consumo de energia para picar a biomassa.....	80
5.8. Secagem das Biomassas diretamente no sol.....	81
5.9. Desempenho do alimentador para queima de biomassa picada	82
5.10. Ganho energético da biomassa picada e seca ao sol.....	83
6. CONCLUSÕES	85
7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	87
REFERÊNCIAS.....	88

1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda de energia em conjunto com a elevação do preço de petróleo e as preocupações com a conservação do meio ambiente e com “desenvolvimento sustentável” tem impulsionado a busca por fontes renováveis de energia, e principalmente biomassa cultivada.

Dentre as diversas biomassas para geração de energia tem-se destacado o uso do eucalipto (*Eucalyptus* ssp.), uma espécie com metabolismo fotossintético C3. A área total de florestas plantadas no Brasil, em 2009, foi de 6.310.450 ha, sendo 71% deste valor referente ao plantio de eucalipto e 29% ao plantio de Pinus (ABRAF, 2011).

Atualmente, tem buscado alternativas, entre elas o uso de capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) que é considerado uma espécie de alta eficiência fotossintética (metabolismo C4), que resulta em grande capacidade de acumular matéria seca, possuindo também características qualitativas que a credenciam a ser estudada para a produção de energia, como por exemplo, um percentual de fibra elevado, semelhante à cana-de-açúcar (QUESADA et al., 2004).

Em vários locais o capim elefante é utilizado principalmente para alimentação de bovinos, sendo cultivado em pastagens, que representam no Brasil cerca de 170 milhões de hectares ocupadas com espécies nativas e cultivadas, incluindo a espécie *Pennisetum* ssp. (IBGE, 2006).

As tecnologias utilizadas atualmente foram desenvolvidas para a utilização de biomassa em toras, principalmente de eucalipto que pode ser seco ao sol e utilizado em seu estado natural. Porém, há dificuldades de manuseio do capim elefante no seu estado natural para o uso na geração, necessitando de desenvolvimento de tecnologias para facilitar a sua secagem, transporte, estocagem e alimentação automática em caldeira e principalmente para aumentar a eficiência na combustão e conversão em energia útil.

Este trabalho visa buscar soluções para a utilização do capim elefante como biomassa para geração de energia de forma mais eficiente do ponto de vista energético e de facilidade de manuseio no armazenamento, transporte e alimentação automática para fornalha de caldeiras. Para atender estas exigências foi proposta a possibilidade de utilizar a biomassa picada e seca ao sol e analisar o ganho energético com a incorporação da energia solar, tanto de capim elefante quanto de eucalipto.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

O trabalho teve por objetivo buscar soluções para a utilização do capim elefante como biomassa para geração de energia da forma mais eficiente, visando à facilidade de manuseio no armazenamento, transporte e alimentação automática para fornalha de caldeiras e comparar com o eucalipto.

2.2. Objetivos específicos

- Analisar o benefício de trabalhar com a biomassa picada e a correspondente facilidade de secagem ao sol da biomassa recém-colhida de eucalipto e de capim elefante, avaliando o consumo de energia para picar, a taxa de secagem e o ganho energético com a incorporação da energia solar.
- Medir o PCS - Poder Calorífico Superior de diferentes cultivares de capim elefante e de diferentes espécies de eucalipto, realizar análise elementar para determinação dos componentes químicos elementares (Carbono, Hidrogênio, Oxigênio, Nitrogênio e Enxofre) e estimar o PCI - Poder Calorífico Inferior destes materiais.
- Estimar o PCL Poder Calorífico Líquido e PCU Poder Calorífico Útil das biomassas para diferentes teores de umidade e o ganho potencial de energia com a redução desta unidade usando energia solar, com uma espécie de eucalipto e uma cultivar de capim elefante.
- Realizar ensaios de alimentação e queima de biomassa picada e seca ao sol para comprovar sua facilidade de manuseio de uso e valor energético, com uma espécie de eucalipto e uma cultivar de capim elefante.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Introdução

Há várias definições para o termo biomassa, segundo Nogueira e Lora (2003) a biomassa é considerada como sendo toda matéria orgânica (madeira, detritos animais, resíduos orgânicos), tanto de origem vegetal como animal. Para Ormond (2006) o termo biomassa designa a massa de matéria vegetal existente nas florestas ou a matéria orgânica não fóssil de origem biológica. Alvim Filho (2009) descreve o termo biomassa subdividindo-o como segue:

Biomassa energética florestal como sendo os biocombustíveis oriundos dos recursos florestais, como a biomassa lenhosa. Sendo utilizados na combustão direta e pirólise; Biomassa energética agrícola, são biocombustíveis oriundos das plantações não florestais, originados de colheitas anuais (cana-de-açúcar, mamona, casca de arroz); Rejeitos urbanos é biomassa contida em resíduos sólidos e líquidos urbanos (o lixo e o esgoto).

A fim de melhor compreender os termos biomassa e biocombustíveis, temos que, segundo a Lei Nº 12.490, de 16 de setembro de 2011 (BRASIL, 2011), o termo biocombustível refere-se a uma substância derivada de biomassa renovável, tal como biodiesel, etanol e outras substâncias estabelecidas em regulamento da ANP, que pode ser empregada diretamente ou mediante alterações em motores a combustão interna ou para outro tipo de geração de energia, podendo substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil.

Nos processos industriais, nos quais a biomassa é utilizada através do processo de combustão, se faz necessário o conhecimento das propriedades físicas, térmicas, químicas e minerais do material usado. No caso de caldeiras as propriedades físicas como densidade, volume específico, peso específico e densidade relativa são conceitos utilizados para relacionar volumes e massas de substâncias, especialmente água, vapor e gases (NOGUEIRA; NOGUEIRA, ROCHA, 2005; RAGLAND; AERTES; BAKER, 1991).

Para a utilização da biomassa para fins energéticos se faz necessário, determinar a qualidade da biomassa, para tanto, se faz necessário o conhecimento da composição química (elementar e imediata), umidade, poder calorífico líquido, poder calorífico superior, e poder calorífico inferior, granulometria, teor de cinzas, nível de biodegradação, densidade da biomassa (CIOLKOSZ, 2010a; NOGUEIRA; NOGUEIRA; ROCHA, 2005; SANCHES, 2010).

3.2. Metabolismo fotossintético e produção de biomassa

A biomassa é uma forma indireta de energia solar armazenada, pois, através da fotossíntese ocorre a assimilação do CO₂ da atmosfera e a produção de moléculas em cujas ligações químicas há armazenamento da energia pelas plantas, que poderá ser utilizada de diversas formas (BRITO; BARRICHELO, 1979; TAIZ; ZEIGER, 2004).

3.2.1. Fotossíntese

A fotossíntese é o processo de armazenamento de energia solar pelos organismos fotossintetizantes, ocorre em dois processos: um fotoquímico e um bioquímico. No primeiro ocorre a absorção de luz e o transporte de elétrons e no segundo, ocorre a captação de gás carbônico e formação de compostos com carbono e a retenção da energia absorvida a partir da luz nas ligações químicas das moléculas formadas. Há várias maneiras das plantas fixarem o CO₂, entre elas os ciclos C3 e C4 (TAIZ; ZEIGER, 2004).

3.2.2. Metabolismo C3

O metabolismo C3, segue a via metabólica do Ciclo de Calvin ou ciclo redutivo das pentoses fosfato e as espécies de *Eucalyptus* ssp., possuem este metabolismo C3, ou seja, o carbono é fixado em um composto com três carbonos, o gliceraldeído-3-fosfato, no estroma dos cloroplastos. As enzimas envolvidas na fotossíntese, na fotorrespiração e outros processos nas células das plantas C3 estão todas no mesmo espaço, ocorrendo competições por sítios proteicos, degradações, etc. o que reduz a eficiência de fixar CO₂ (TAIZ; ZEIGER, 2004).

3.2.3. Metabolismo C4

O metabolismo C4 ou ciclo C4 se refere ao metabolismo fotossintético do carbono em algumas plantas como, por exemplo, nas espécies de capim elefante *Pennisetum* ssp. A fixação do CO₂ ocorre nas células do mesófilo e a sua redução, ocorre nas células da bainha do feixe vascular, portanto em compartimentos separados, o que permite uma melhor eficiência na fixação do CO₂. Este metabolismo é denominado C4 porque a carboxilação inicial produz um composto com quatro carbonos o oxaloacetato que é convertido em malato ou aspartato (TAIZ; ZEIGER, 2004).

3.3. Capim elefante

O capim elefante é uma planta de alta eficiência fotossintética, utilizando o mecanismo C4 de fixação do carbono. Esta característica permite às plantas crescerem rapidamente, otimizando o uso da água do solo e da energia solar para a produção de biomassa vegetal. Assim, o capim elefante possui a capacidade de acumulação de grande quantidade de matéria seca com elevado teor de fibras, o que indica potencial para a produção de energia (SAMSON et al., 2005).

Kirchhof et al. (2001) demonstraram que a capacidade do capim elefante produzir grande quantidade de matéria seca está também relacionada ao fato de ser uma planta que se beneficia da “fixação biológica de nitrogênio” (FBN).

Bactérias endófitas diazotróficas do gênero *Herbaspirillum* estão presentes nos tecidos das raízes, dos colmos e das folhas do capim elefante e permitem o fornecimento de até 50% do nitrogênio necessário à planta (MORAIS et al., 2009).

3.3.1. Potencial energético do capim elefante

Quéno (2009) relata que o potencial energético do capim elefante, como toda biomassa, está relacionado ao seu teor de fibras, especialmente lignina e um método para determinar este teor é a utilização de um detergente ácido específico com a finalidade de solubilizar o conteúdo celular e a hemicelulose. Um resíduo insolúvel no detergente ácido é obtido, denominado “fibra em detergente ácido” (FDA), constituindo em quase a totalidade de celulose (lignocelulose) e lignina.

Quesada et al. (2004) demonstraram que os valores de FDA e seus componentes variam com o intervalo entre cortes, e também com as condições ambientais, principalmente a umidade, durante o período de crescimento das plantas, e inversamente proporcional aos teores de proteína das plantas. Assim quando manejadas com cortes de seis em seis meses, as plantas de capim elefante apresentam valores de FDA alta, acima de 50%. Podendo se observar que quanto maior o intervalo entre cortes mais lignificado é o material vegetal e maior o potencial energético da biomassa.

O valor energético da biomassa é determinado usando uma bomba calorimétrica, que avalia o Poder Calorífico Superior (PCS) e expresso em kcal/kg. Os teores de carbono e hidrogênio nos tecidos vão determinar esse nível de energia potencial. Poucos são os trabalhos científicos para a estimativa do poder calorífico da biomassa do capim elefante (QUÉNO, 2009).

Habitualmente, o PCS da matéria seca do capim elefante é estimado em 4.200 kcal/kg, Vilela (2008) encontrou valores para o PCS do capim elefante Carajás de 4.298 kcal/kg, enquanto Pereira et al. (1999) encontraram valores em torno de 4.170 kcal/kg para o capim elefante “Napier”.

Seye et al. (2000) estudaram o termogravimetria do capim elefante, e observou alto teor e de lignina, porém verificou também que apresenta o inconveniente de produzir uma grande quantidade de cinzas (11,3%).

3.3.2. Produção agrícola do capim elefante

O Capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) destaca-se pela alta produtividade de matéria seca (MS), por unidade de área, e pelo equilíbrio nutritivo quando novo, além de ser cultivado em todo o Brasil e resistir às condições desfavoráveis como: seca, frio e áreas de solo degradado, evitando a competição com a produção de alimentos, garantindo assim a replicação deste modelo de produção de energia renovável para diversas localidades do Brasil (PANIAGO et al., 2011; QUEIROZ FILHO; SILVA; NASCIMENTO, 2000).

Alcântara e Bufarah (1999) relatam que esta gramínea perene tropical atinge de 3 a 5 metros de altura com colmos eretos dispostos em touceira aberta ou não, os quais são preenchidos por um parênquima suculento, chegando a 2,0 cm de diâmetro, com entrenós de até 20 cm. Possuem rizomas curtos, folhas com inserções alternas, de coloração verde escura ou clara, que podem ser pubescentes ou não, chegando a alcançar 10 cm de largura e 110 cm de comprimento. As folhas apresentam nervura central larga e brancacenta, bainha lanosa, invaginante, fina e estriada, lígula curta, brancacenta e ciliada. A panícula tem, em média, 15 cm de comprimento, formada por espiguetas envolvidas por um tufo de cerdas de tamanhos desiguais e de coloração amarelada ou púrpura. Apresenta abundante lançamento de perfilhos aéreos e basilares, podendo formar densas touceiras, apesar de não cobrirem totalmente o solo.

Segundo Quéno (2011), as espécies herbáceas perenes que apresentam o potencial para uma produção anual de grande quantidade de biomassa têm as seguintes características fisiológicas: alta eficiência no processo de conversão da energia solar pela fotossíntese, sistema radicular extenso e profundo, uso econômico da água no solo e necessidade limitada de nutrientes, graças à sua capacidade de retranslocação destes, nas raízes, no final do ciclo vegetativo anual.

De acordo com Paniago (2011), a elevada produtividade de MS do capim elefante ocorre não somente devido às características descritas nos parágrafos anteriores, mas principalmente, por sua maior capacidade de fixação de CO₂ atmosférico, através do seu alto potencial fotossintético, pois são do ciclo C4 que é aproximadamente 40% mais eficiente para a captação de carbono que o mecanismo C3 das gramíneas mais comuns de clima temperado (SAMSON et al., 2005 apud QUÉNO, 2011).

A primeira colheita do capim elefante pode ser feita 6 meses após o plantio, possibilitando assim 2 cortes anuais. Por causa da alta produtividade requer áreas menores, baixando o investimento em terras (MAZZARELLA, 2011).

O capim elefante é uma gramínea que além da alta produtividade, de 30 a 82 t_{ms}/ha/a (toneladas de massa seca por hectare por ano) possui ciclo curto. Na Europa a produtividade fica entre 12 a 20 t_{ms}/ha/a. No Brasil a produtividade fica por volta de 40 t_{ms}/ha/a, porém já se atingiu produtividades maiores que 80 t_{ms}/ha/a. (MAZZARELLA, 2011).

No entanto, para se analisar o potencial produtivo do capim elefante, segundo Ribeiro (2011) é importante ressaltar que vários fatores podem alterar a quantidade de MS produzida: diversidade de formas, tipos, variedades ou cultivares, apresentando ampla variabilidade genética para a maior parte dos caracteres de interesse o que pode alterar sua produtividade, intervalo, frequência de corte, disponibilidade de água, luz, calor, insolação etc., interferem no acúmulo de MS, justificando assim diferenças marcantes de produção relatadas por pesquisas, variando de 10 a 80 t_{ms}/ha/a país (FARIA et al., 1998 apud LOPES; NASCIMENTO JÚNIOR, 2001).

Esta variabilidade de produção do capim elefante é relatada em alguns estudos como o de Vasconcelos et al. (2001), que trabalhando com capim elefante, encontraram teor de 18,6% de MS para a forragem cortada entre 75 e 84 dias de idade. Rezende et al. (2002) obtiveram 17,5% de MS para o capim elefante cortado aos 70 dias de crescimento. Nussio, Lima e Mattos (1999) e Santos (2011) descreveram os valores de silagem de capim elefante, cortado aos 60 dias de crescimento, de produção igual a 40 t_{ms}/ha, 23% de MS; 7,8% de PB; 75% de FDN; 42% de FDA e 57% de NDT.

Ribeiro (2011) apresentando o estudo de Queiroz Filho et al. (2000) demonstrou que foram encontradas produções de 19,5; 25,7; 25,7 e 30,9 t_{ms}/ha para o capim elefante roxo aos 40, 60, 80 e 100 dias de crescimento, respectivamente.

3.3.3. Relação entre produção do capim elefante e o clima

No tocante a temperatura, o capim elefante é uma espécie que se adaptada a altas temperaturas e umidades, pois é uma espécie tipicamente tropical, entretanto tolera temperaturas baixas antes de interromper o crescimento (JACQUES, 1990 apud SEYE et al., 2003), e de acordo com Botrel et al. (2000), o progresso do melhoramento do capim elefante deve ser direcionado no sentido de aumentar a sua produção no período da seca. Porém, para algumas regiões os trabalhos devem focar a questão da tolerância ao frio, por exemplo, para cultivos no sul do Brasil.

Dall'Agnol et al. (2004) relatam que de acordo com a revisão de Skerman e Riveros (1992), a temperatura ótima para o crescimento do capim elefante é de 25 a 40°C, com a mínima em torno de 15°C. No Rio Grande do Sul, o zoneamento climático para forrageiras tropicais preconiza o cultivo do capim elefante nas regiões onde a temperatura média das mínimas seja igual ou superior a 10°C, que permite um crescimento de dez ou mais meses.

Machado et al. (1996), ao observarem o cultivo do capim elefante em clima frio, verificaram que as geadas ocasionaram a morte da parte aérea das plantas e que a rebrotação subsequente foi totalmente dependente dos afilhos basilares, o que atrasou o processo de recuperação das plantas. Villa Nova et al. (2007) apresentam uma faixa de temperatura de 10 a 17°C, abaixo da qual o crescimento capim elefante é desprezível ou nulo. Alguns cultivares híbridos de capim elefante chegam a suportar temperaturas de 0°C (MACOON; SOLLENBEERGER; MOORE, 2002).

3.3.4. Relação entre produção do capim elefante e a altura de corte

Ao analisar as diferentes alturas de corte do capim elefante “Paraíso”, por exemplo, a produção de MS e quantidades de proteína bruta acumuladas, verificou-se um redução destas com as alturas de corte de 5 para 15 cm (Tabela 3.1) (PAULINO; LUCENAS; POSSENTI, 2011). As produções mais elevadas foram alcançadas com cortes realizados às alturas de 5 ou 10 cm do nível do solo, foram de 12,7 t_{ms}/ha e 11,8 t_{ms}/ha. Os resultados apresentados na Tabela 3.1 corroboram com os obtidos por Santos, Silva e Queiróz Filho (2001), trabalhando com capim elefante “Roxo”, que obtiveram maior produção em cortes mais baixos (zero e 0,15 m acima do solo), quando comparados com alturas maiores (0,30 e 0,45 m). Valores foram superiores aos encontrados por Vilela et al. (2005) de 8,6 t_{ms}/ha, trabalhando com essa mesma espécie, para a mesma idade de corte (cerca de 75 dias).

Tabela 3.1 - Produtividade versus altura de corte do capim elefante

Alturas de corte (cm)	MS (t/ha)	PB (%)	FDN (%)	FDA (%)
5	12.697	24,4	63,01	33,74
10	11.785	25,1	63,05	34,12
15	8.976	24,6	64,75	32,89
Significância ¹	S	NS	NS	NS
F p/ RL2	**	NS	NS	NS
P/ RQ	NS	NS	NS	NS

Equação de regressão:

Produção Matéria seca (t/ha) $Y=14.874,55 - 372,18X$ Produção de Proteína bruta (kg/ha) $Y=3.644,7-89,0X$

Fonte: Paulino, Lucenas e Possenti (2011)

Onde:

MS - Produção de matéria seca (t/ha);

PB - Teor de proteína bruta (%);

FDN - Teor de fibra detergente neutro (%);

FDA - Teor de fibra detergente acida (%).

Enfim, não se sabe ao certo qual é o limite de produtividade do capim, uma vez que há estudos apenas pontuais no Brasil, faltando estudos mais amplos, comparativos entre variedades, diferentes regiões e variáveis de produção (MAZZARELLA, 2011).

3.4. Eucalipto

3.4.1. Potencial energético do Eucalipto

No trabalho de Afonso Júnior, Oliveira Filho e Costa (2006) foi observado o valor médio de 2.917,6 kcal/kg para lenha de eucalipto úmido e um PCS acima de 4.500 kcal/kg.

3.4.2. Produção agrícola do Eucalipto

Uma das principais características relacionadas à produtividade do eucalipto é a facilidade com que se adaptam aos mais variados tipos de clima e solo. Esta peculiaridade possibilita que este seja plantado em vários países (SANTOS, 2011).

Segundo o Conselho de Informações sobre Biotecnologia (2010) o gênero *Eucalyptus* encontrou, no Brasil, as condições ideais para seu crescimento. A produtividade desses

plantios em terras brasileiras chega a ser até dez vezes superiores à de países como Finlândia, Portugal e Estados Unidos.

Segundo a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas, a produtividade média anual do eucalipto é relativamente baixa, em torno de 35 m³ por hectare. Contudo existem plantios com uso de eucaliptos melhor adaptados que atingem rendimentos próximos a 60 m³/ha/a (MOTTA; SILVA; DINIZ, 2010).

O uso da tecnologia disponível atualmente é o fator de maior impacto na produtividade do eucalipto. Em algumas empresas florestais do país, que, na década de 70, produziam uma média de 20 m³/ha/a, hoje é possível atingir de 40 m³/ha/ano a 50 m³/ha/a com o uso de material genético melhorado e das tecnologias atualmente disponíveis. No entanto, no Brasil, existem áreas produzindo em torno de 70 m³/ha/a. Mesmo em comparação com a Austrália, país de origem da espécie, a produtividade brasileira é muito superior, o que se atribui às nossas condições climáticas e aos investimentos em melhoramento genético e em tecnologias de silvicultura (SANTOS, 2011).

Este fato pode ser mais bem observado na Tabela 3.2. O tempo de rotação (necessário para o crescimento da árvore) é o menor do mundo, com uma produtividade bastante superior a média por hectare de outros países.

Tabela 3.2 - Comparação do cultivo de eucalipto entre países

Espécies	Países	Rotação (anos)	Rendimento m³/ha/ano
Eucalipto	Brasil	7	41
Eucalipto	África do Sul	8-10	20
Eucalipto	Chile	11-12	30
Eucalipto	Portugal	12-15	12
Eucalipto	Espanha	12-15	10

Fonte: BRACELPA (2011)

Em relação à matéria seca pode-se observar na Tabela 3.3 qual a produção de acordo com a idade e o espaçamento (QUÉNO et al., 2011).

Tabela 3.3 - Biomassa seca com casca (t/ha)

Espaçamento (m x m)	Produção biomassa seca com casca - (t/ha)				
	Idade anos				
	2	3	4	5	6
3,0 x 0,50	48,0	77,8	107,5	113,3	119,0
3,0 x 0,75	45,0	73,0	101,0	111,3	121,5
3,0 x 1,00	40,8	66,3	91,8	106,6	121,4
3,0 x 1,50	33,8	62,1	90,5	105,8	121,2
3,0 x 2,00	31,2	56,4	81,6	99,8	118,0
3,0 x 2,50	28,4	54,1	79,9	98,1	116,4
3,0 x 3,00	25,2	51,5	77,8	96,0	114,2

Fonte: RENABIO (2009 apud QUÉNO et al., 2011)

Devido à alta produtividade do eucalipto no Brasil, este representa uma cultura agrícola de grandes possibilidades para o produtor, bem como para a indústria, pois as peculiaridades das propriedades da madeira oferecem alternativas de diversos usos, como móveis, madeira para construção civil, para aglomerados e compensados, produção de carvão, papel, biomassa dentre outras aplicações (MOTTA; SILVA; DINIZ, 2010; PRATTI, 2010).

Para Pratti (2010), devido a grande demanda pela madeira de espécies do gênero *Eucalyptus*, a produção florestal brasileira há tempos vem se mostrando promissora, dados alguns aspectos, tais como a capacidade de ampliação de áreas plantadas, o menor tempo de produção dentre outros aspectos. A Tabela 3.4 apresenta a distribuição das áreas plantadas com eucalipto, de acordo com os Estados produtores, segundo dados obtidos junto ao portal REMADE (2009) citado por Pratti (2010).

Tabela 3.4 - Áreas com florestas plantadas de eucalipto no Brasil (2008)

Estado	Área (ha)
Minas Gerais	1.105.961
São Paulo	813.372
Bahia	550.127
Rio Grande do Sul	222.245
Espírito Santo	208.819
Mato Grosso do Sul	207.687
Pará	126.286
Paraná	123.070
Maranhão	106.802
Santa Catarina	74.008
Amapá	58.874
Mato Grosso	57.151
Goiás	51.279
Outros	46.186
TOTAL	3.751.867

Fonte: REMADE (2009 apud PRATTI, 2010).

Observando-se a Tabela 3.4, verifica-se que a área total plantada com eucalipto no Brasil, ultrapassava os 3 milhões e 700 mil hectares em 2008, e os estados que apresentavam as maiores áreas plantadas era Minas Gerais, São Paulo e Bahia (PRATTI, 2010).

De acordo com o Anuário Estatístico de 2011 da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF) esta distribuição não se alterou em relação aos Estados que mais plantam eucalipto até 2010. A Figura 3.1 apresenta a distribuição de áreas percentuais de plantio de eucalipto por Estado.

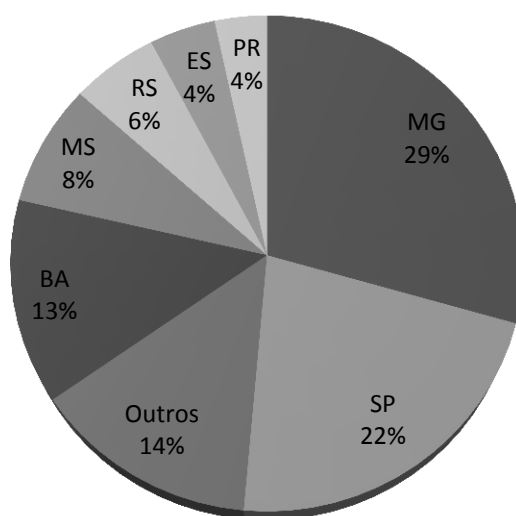


Figura 3.1 - Distribuição da área de plantios de eucalipto por Estado, 2010

Fonte: ABRAF (2011)

Santos (2011) ao citar os dados obtidos através do site da EMBRAPA (2011) relata que apesar de não haver alterações no ranking dos Estados que mais produzem o eucalipto, a participação das plantações florestais estão aumentando em todos os segmentos em relação a das florestas nativas. No entanto, o setor acredita que com base nas expectativas de crescimento da demanda, haverá uma necessidade de plantio em torno de 630 mil hectares ao ano, ao invés dos 200 mil hectares atuais. A Sociedade Brasileira de Silvicultura (SBS) distribui essa necessidade de plantio como sendo: 170 mil hectares ao ano para celulose, 130 mil hectares ao ano para madeira sólida, 250 mil hectares ao ano para carvão vegetal e 80 mil hectares ao ano para energia.

Para Lessa (2008) a melhor alternativa para que se consiga suprir as necessidades do mercado será, além do aumento da área plantada, a introdução de melhor material genético, associado a um bom manejo florestal, como por exemplo, o uso de clones nas florestas de eucaliptos é uma tecnologia que vai levar a uma ampliação dos ganhos de produtividade no setor.

3.4.3. Relação entre produção do eucalipto e o clima

Várias espécies de eucalipto se destacam por apresentarem uma grande capacidade de adaptação a situações de déficit hídrico, possibilitado que os plantios sejam implantados na região dos cerrados, onde os solos apresentam baixa fertilidade e o clima provoca pronunciado déficit hídrico (OLIVEIRA NETO et al., 2003).

Apesar desta notável característica citada no parágrafo anterior, a adaptação da espécie ao clima local de plantio é de fundamental importância, pois mesmo conhecendo a potencialidade da espécie para determinado fim, sua adaptação às condições climáticas do local poderá potencializar a produção final. Espécies, e mesmo indivíduos dentro da mesma espécie, podem desenvolver mecanismos capazes de suportar uma grande variação nas condições climáticas. Mas, a regra é que espécies adaptadas a climas quentes ou frios, raramente se adaptam a condições opostas. Plantas adaptadas a ambientes úmidos não se adaptam a ambientes secos, pois sua estrutura fisiológica é completamente diferente (PAIVA et al., 2001).

Os autores citados no parágrafo anterior relatam ainda a importância da luminosidade:

A luz, responsável pela fotossíntese é de extrema importância para o crescimento e o desenvolvimento das plantas, podendo-se generalizar, desde que não haja outras condições restritivas, isto por que quanto maior é a luminosidade de um determinado local, mais rápido será o crescimento das árvores, devido a uma maior taxa de assimilação de carbono (PAIVA et al., 2001, p. 19).

Segundo Paiva et al. (2001), as espécies de eucalipto mais indicadas para cada tipo de clima são:

- Clima úmido:

Em regiões de clima úmido e quente, como o da Amazônia, as espécies de eucalipto mais indicadas são: *E. deglupta*, *E. urophylla*, *E. tereticornis*, *E. robusta*, e *E. camaldulesis*.

Em regiões de clima úmido e frio, como o do sul do Brasil, as espécies mais indicadas são: *E. viminalis*, *E. propinqua*, *E. resinifera*, *E. paniclata*, *E. dunnii*, *E. maidenii*, *E. globulus*, *E. deanei*, *E. grandis*, *E. saligna*, *E. pilularis*, *E. robusta*, e *E. botryoides*.

- Clima subúmido:

O clima subúmido é predominantemente encontrado na região sob cerrados, que ocupa uma grande parte do território brasileiro.

As espécies mais plantadas neste clima têm sido: *E. grandis*, *E. saligna*, *E. urophylla*, *E. citriodora* e *E. tereticornis*.

Em clima subúmido seco, as espécies mais plantadas são: *E. urophylla*, *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. pellita*, *E. cloziana*, *E. citriodora*, *E. maculata*, *E. pillularis*, e *E. pyrocarpa*.

- Clima semiárido:

No semiárido, como o apresentado por boa parte da região Nordeste, bem como algumas partes do Estado de Minas Gerais, as espécies mais indicadas são: *E. camaldulensis*, *E. tereticornis*, *E. tessellaris*, *E. exserta*, *E. creba*, e *E. brassiana*.

3.4.4. Relação entre produção do eucalipto e a idade de corte

Para uma produção elevada do Eucalipto, uma das principais decisões a ser tomada é a idade de corte de um talhão. A definição da duração de uma rotação pode requerer uma análise independente por talhão ou estar vinculada à produção simultânea de todos os talhões da floresta. O segundo caso resulta geralmente em uma complexa tarefa e envolve o processamento de um enorme volume de informações (RODRIGUEZ; BUENO; RODRIGUES, 1997).

Os autores citados anteriormente relatam que em países de clima temperado, onde as espécies florestais apresentam crescimento mais lento, é comum a recomendação de rotações economicamente ótimas mais curtas do que rotações baseadas na idade máxima.

A idade ótima de corte de um talhão florestal, independentemente dos demais, pode ser definida mais especificamente quando são utilizados os termos volumétricos e/ou econômicos. Rodriguez, Bueno e Rodrigues (1997) constataram que a idade ótima de corte, utilizando as medidas volumétricas, apresenta-se aos 6 anos, enquanto que ao se considerar os valores econômicos a idade ótima é 7 anos.

O trabalho de Xavier, Soares e Almeida (2002) tentou relacionar o índice de área foliar (IAF) com a idade de corte, visto que, este indicador está diretamente relacionado com a produtividade de ecossistemas florestais. Estes pesquisadores utilizaram, no estudo, cinco clones de plantações de eucalipto (híbridos de *Eucalyptus grandis*). Dos cinco clones, três apresentaram o pico do índice de área foliar entre três e quatro anos. Nos demais clones não houve uma relação significativa entre o IAF e a idade.

Segundo Rodriguez, Bueno e Rodrigues (1997), análises mais interessantes sobre a relação entre produtividade e idade de corte, seriam aquelas que indicassem o ciclo (conjunto de rotações) economicamente ótimo para plantios de eucalipto e que considerassem a otimização para a floresta como um todo e não isoladamente para cada talhão.

3.5. Colheita e processamento da biomassa

Neste tópico apresentar-se-á caracterização da biomassa na colheita e no processamento.

3.5.1. Teor de umidade da biomassa na colheita

A Figura 3.2 apresenta os teores de umidade de biomassa florestal de espécies de pinus, eucaliptos e costaneiras de pinus em função da época de colheita.

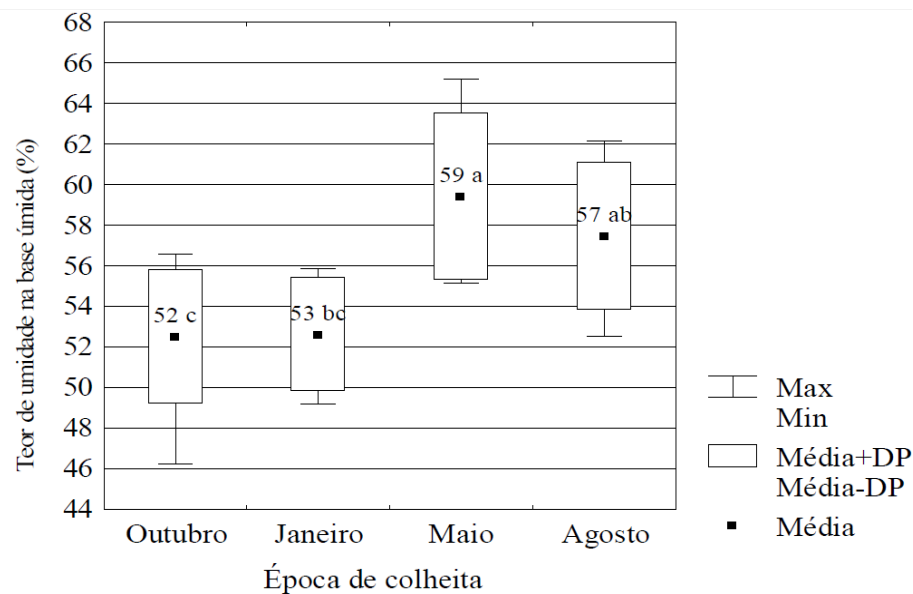


Figura 3.2 - Teor de umidade na época de colheita.

Fonte: Brand (2007)

Notas:

1. Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente entre si (Tukey $p > 0,05$).
2. A análise da época de colheita foi feita sem a distinção de espécie ou forma, sendo que os dados apresentados representam a média de todos os resultados obtidos.

3.5.2. Secagem de biomassa

Processos de secagem do capim elefante

- Secagem de pé (como pé de milho)
- Secagem em pátios
- Secagem em estufas
- Secagem em equipamento (gases quentes)
- Secagem por extração de caldo

Para se avaliar o conteúdo de umidade da biomassa deve-se levar em consideração que a umidade varia de uma parte para outra do vegetal. Nas árvores, normalmente a umidade é menor no caule ou tronco e maior nas raízes e copa. As estações do ano também afetam o conteúdo de umidade, sendo que no inverno e outono, normalmente o teor de umidade é maior e na primavera é menor, como constatou Brand (2008), quando avaliou a biomassa florestal de espécies de *Pinus* e *Eucalyptus* colhidas em diferentes épocas do ano (Figura 3.2).

Na prática, quando se utiliza madeira roliça, com diâmetro entre 10 e 20 cm (particularmente eucalipto), com 3 a 4 meses de corte se tem teores de umidade entre 25 e 30%, o que representaria um PCI aproximado de 3.000 kcal/kg.

Para fornos construídos para a queima de partículas verdes como combustível, o teor de umidade crítico é o mais alto possível, ou seja, em torno de 60%. Na prática o valor a ser considerado pode ser de 50%.

3.5.3. Caracterização da biomassa

A caracterização da biomassa é importante para determinar o seu conteúdo energético, a aplicação e as condições de utilização, e o tipo mais adequado de equipamento a ser utilizado.

3.5.3.1. Composição química elementar e imediata

Os principais elementos químicos que compõem a biomassa referem-se a composição química elementar, são valores que quantificam elementos químicos como carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N) e cinzas (A) que incluem potássio (K), fósforo (P) e cálcio (Ca) (CIOLKOSZ, 2010a; NOGUEIRA; NOGUEIRA; ROCHA, 2005). A composição química imediata refere-se ao registro percentual de carbono fixo (F), materiais voláteis (V), cinzas (A) e umidade (W) (NOGUEIRA; NOGUEIRA; ROCHA, 2005).

3.5.3.2. Teor de umidade (base úmida)

A biomassa vegetal pode conter grandes quantidades de água, sendo o peso da água no material recém-colhido muito maior do que o material que compõem efetivamente a biomassa (ALEXANDRA; MARIA; BOGDAN, 2010). A água retida no material deve ser retirada para que a biomassa seja útil. Assim, o teor de umidade da biomassa torna-se uma variável importante no aproveitamento energético da mesma (ALEXANDRA; MARIA; BOGDAN, 2010; QUIRINO et al. 2004).

O teor de umidade pode ser medido em base úmida (b.u.) como sendo:

$$\text{Teor de umidade (b. u.)} = \frac{\text{Quantidade de água}}{\text{Quantidade de água} + \text{Quantidade de matéria seca}}$$

ou

$$\text{Teor de umidade (b. s.)} = \frac{\text{Quantidade de matéria seca}}{\text{Quantidade de água}}$$

3.5.3.3. Teor de umidade de equilíbrio (base úmida)

Teor de umidade onde a umidade do material está em equilíbrio com a umidade do ar. A umidade de equilíbrio pode ser diferente quando a biomassa está úmida e sofre um processo de secagem em relação à biomassa seca sofrendo um processo de umidificação, ou seja, há uma pequena “histerese”.

3.5.3.4. Granulometria

A granulometria especifica a dimensão dos materiais, fornece as frações em peso de cada dimensão característica que compõe a biomassa, também representa a variação no tamanho e formato da biomassa destinada à geração de energia. Esta propriedade da biomassa influencia as escolhas relativas aos tipos de equipamentos, velocidade de queima e outros aspectos, mais adequados nas operações com este material (GOMEZ et al., 2000; SANCHES, 2010; SEYE et al., 2000).

A granulometria fornece as frações em peso de cada dimensão característica que compõe a biomassa. Esta informação é importante para o dimensionamento do alimentador e da velocidade superficial do gás. A granulometria fornece as frações em peso de cada dimensão característica que compõe a biomassa. Muito importante para o dimensionamento do sistema de alimentação e de grelhas para os queimadores de biomassa picada (TIAGO FILHO et al., 2008).

A Tabela 3.5 apresenta a classificação com relação às dimensões das partículas segundo as Normas Internacionais ASTM (American Society for Testing and Materials, escala MESH).

Tabela 3.5 - Dimensões das partículas e classificação

Dimensões das partículas	Classificação
ASTM 2" / MESH 50 mm	Cavaco
ASTM 1 1/2" / MESH 37,5 mm	
ASTM 1" / MESH 25 mm	
ASTM 1/2" / MESH 12,5 mm	
ASTM 1/4" / MESH 6,3 mm	Base
ASTM 6 / MESH 3,35 mm	
ASTM 10 / MESH 2,00 mm	
ASTM 20 / MESH 0,85 mm	
ASTM 30 / MESH 0,60 mm	Pó
ASTM 40 / MESH 0,425 mm	
ASTM 60 / MESH 0,250 mm	

Fonte: Brand (2008)

O processo de combustão de biomassa pode ser realizado em grelhas, leito fluidizado ou em suspensão. A granulometria do combustível sólido varia, conforme o equipamento utilizado, de 0,01 a 0,05 m para combustão em grelha, de 0,001 a 0,025 m para combustão em leito fluidizado e de 1,0 a 100 μ m para queima em suspensão (EL-MAHALLAWY; EL-DIN HABIK, 2002).

A combustão em grelha se caracteriza pelo elevado tempo de permanência das partículas na câmara de combustão e pode ser dividida em fixa ou móvel. Na combustão em grelha fixa o combustível é espalhado uniformemente sobre o equipamento através de um dispositivo dispersor juntamente com ar (localizado na parte de baixo da grelha). Os fragmentos menores sofrem combustão em suspensão e os maiores, sobre a grelha. Na combustão em grelha praticamente qualquer tipo de biomassa. Na combustão em grelha móvel há alimentação continua na grelha (El-MAHALLAWY; EL-DIN HABIK, 2002).

3.5.3.5. Teor de cinzas

O teor de cinzas refere-se à quantificação das substâncias inorgânicas contidas na biomassa. Esta propriedade é importante por questões técnicas, como determinar o tipo de recolhimento e tratamento dos resíduos, bem como a manutenção dos equipamentos utilizados no sistema (FEITOSA NETTO et al., 2006; GOMEZ et al., 2000).

3.5.3.6. Nível de biodegradação

O conhecimento do nível de biodegradação da biomassa utilizada para fins energéticos está relacionado à otimização do uso da mesma, pois, haverá perda de material que pode ocorrer devido à decomposição (degradação por agentes microbiológicos) ou mesmo por processos de oxidação química que se iniciam logo após a colheita da biomassa (SILVA, 2009).

3.5.3.7. Densidade

Há duas definições, neste caso, para densidade da biomassa. Densidade propriamente dita para a matéria contínua e a densidade aparente para a matéria fragmentada, são propriedades adimensionais da biomassa (TIAGO FILHO et al., 2008).

Define-se densidade como a razão entre a massa específica da biomassa pela massa específica da água na condição padrão (25°C e 100 kPa), ou seja 1000 kg/m^3 , e a densidade aparente do mesmo modo, mas utilizando o conceito de massa específica aparente (TIAGO FILHO et al., 2008).

3.6. Produção de energia

3.6.1. Poder Calorífico

A energia contida na biomassa pode ser estimada a partir do valor do seu poder calorífico, ou seja, da quantidade de energia térmica liberada na combustão completa de 1 kg de biomassa. O poder calorífico é a quantidade de calor total (energia térmica) que é liberado durante a combustão completa de uma unidade de massa ou de volume de combustível (kcal/kg ou kJ/kg ; kcal/m^3 ou kJ/m^3).

O poder calorífico pode ser determinado utilizando-se a técnica da bomba calorimétrica (Norma STM D-2015). A bomba calorimétrica é utilizada para medir o calor liberado pela combustão do biocombustível com oxigênio. Todas as amostras devem passar por uma peneira malha 60 (250 μm), e são queimadas em oxigênio puro a uma pressão de 3000 kPa. Esta técnica determina o poder calorífico superior a volume constante, que pode ser convertido para poder calorífico inferior por métodos analíticos.

3.6.1.1. Poder Calorífico Superior

O valor que se pode medir com mais facilidade é o poder calorífico superior (PCS), que segundo Lima (2010), é definido como “a quantidade de calor liberado pela queima (combustão), de modo que a água proveniente desta queima esteja em estado líquido (volume constante)”.

Assim, o valor obtido é teórico, pois a determinação é feita em recipiente, hermeticamente fechado, onde é depositada a amostra, com 0% de umidade (totalmente livre de umidade). Após encerramento do recipiente, é realizada uma descarga de oxigênio, com 99% de pureza, seguida de uma descarga elétrica que promove a ignição do combustível que está sendo testado.

Durante este processo são realizadas medições contínuas da temperatura da água, que envolve a bomba calorimétrica. A variação da temperatura da água é então utilizada para o cálculo da energia liberada pelo combustível, resultando no poder calorífico superior (PCS).

Neste processo, a energia perdida na reação endotérmica da formação de água pelo hidrogênio contido no combustível não é perdida, devido ao recipiente ser fechado e após a produção do vapor d'água, o mesmo torna a condensar na parede do recipiente, permanecendo em um ciclo fechado. Lembrando ainda que na análise, o combustível é testado com teor de umidade de 0%, ou seja, contendo somente o hidrogênio de constituição do combustível.

3.6.1.2. Poder Calorífico Inferior

O poder calorífico inferior (PCI) é a quantidade de calor liberado pela queima, de modo que a água proveniente da queima esteja em estado gasoso (volume variável). Como o PCS é um valor teórico, para efeitos práticos é calculado o poder calor inferior (PCI). Neste é descontada a energia carga para a liberação do hidrogênio de constituição. Para cada combustível o valor utilizado é diferente, pois este está em função da porcentagem de hidrogênio contido no combustível. No caso da madeira, o valor pode variar de 5,8 a 6,2% de hidrogênio. No entanto, para efeitos práticos, utiliza-se o valor de 6% (LIMA, 2010).

$$PCI = PCS - P_{\text{Perdas devido ao H}_2 \text{ do combustível}} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right)$$

3.6.1.3. Poder Calorífico Líquido (PCL)

Conforme Lima (2010), “Poder calorífico líquido (PCL) é a quantidade de calor liberado pela queima, de modo que a água proveniente da queima esteja em estado gasoso (volume variável). No PCL é descontada a energia necessária para evaporar a água referente à umidade da madeira”.

$$PCL = PCI - P_{\text{Perdas por condensáveis na chaminé}} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right)$$

3.6.2. Avaliação do rendimento energético de caldeira pelo Método Indireto

Há vários processos e tecnologias desenvolvidos a partir de incentivos a inovação tecnológica, que permitem transformar a biomassa em energia, tais como processos termoquímicos (a gaseificação e a pirólise) e por combustão direta com ou sem processos físicos de secagem, compressão, corte ou quebra, etc. (ANEEL, 2002; TIAGO FILHO et al., 2008).

Quando a biomassa é queimada em caldeira para produzir vapor, o rendimento de conversão da energia contida na biomassa em energia útil (vapor) depende das características da caldeira, dos equipamentos auxiliares empregados, como economizador para aquecer água de alimentação, recuperador de calor regenerativo para pré-aquecer o ar de combustão.

3.6.2.1. Determinação do rendimento de caldeira pelo método indireto

O rendimento pode ser estimado facilmente pela medição de todas as perdas que ocorrem na caldeira e pode ser obtida pela subtração das frações de perdas de calor de 100. As várias perdas de calor que ocorrem na caldeira podem ser observadas na Figura 3.3.

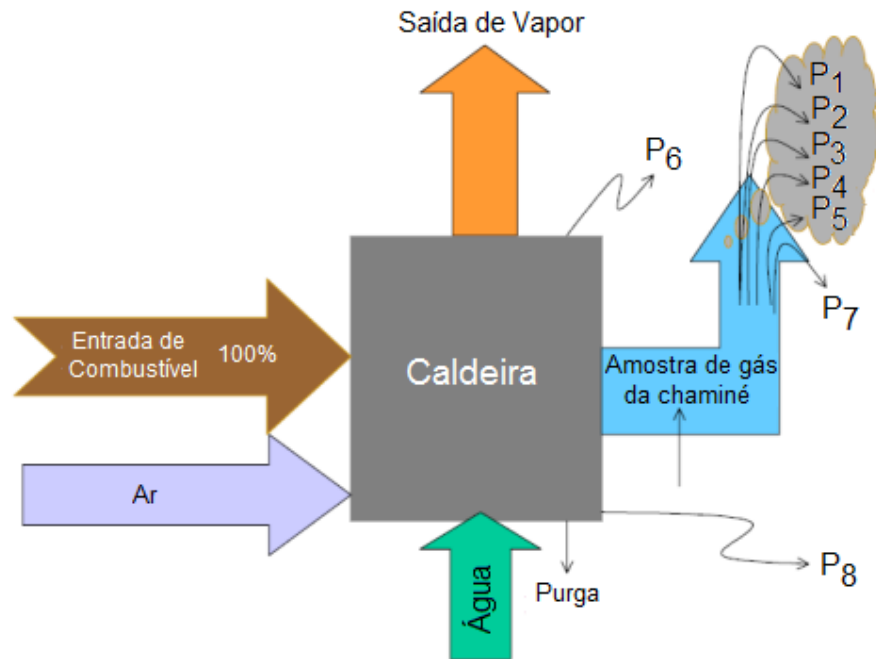


Figura 3.3 - Perdas de calor em caldeiras

Fonte: Bureau of Energy Efficiency (2010)

As seguintes perdas aplicáveis a caldeiras que queimam biomassa:

P₁ - Perdas devido aos gases secos na chaminé (calor sensível)

P₂ - Perdas devido ao hidrogênio no combustível (H₂)

P₃ - Perdas devido à umidade no combustível (H₂O)

P₄ - Perdas devido à umidade no ar (H₂O)

P₅ - Perdas devido ao monóxido de carbono (CO)

P₆ - Perdas por combustível não queimado em cinzas volantes (Carbono)

P₇ - Perdas por combustível não queimado em cinzas (Carbono)

P₈ - Perdas devido a superfícies externa da caldeira (radiação, convecção e outras não consideradas).

$$\eta_{\text{método indireto}} = \frac{\text{PCS} - (P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8)}{\text{PCS}} \quad (\%)$$

Onde:

$\eta_{\text{método indireto}}$ – rendimento da caldeira pelo método indireto

PCS – poder calorífico superior do combustível

Para calcular o rendimento da caldeira pelo método indireto, todas as perdas que ocorrem na caldeira devem ser estabelecidas. Estas perdas são convenientemente relacionadas com a quantidade de combustível queimado. Deste modo é fácil comparar o desempenho de diferentes caldeiras com várias classificações.

3.6.2.2. Determinação da vazão de ar na caldeira

A razão (estequiométrica) teórica de ar combustível (A/C) e o excesso de ar suprido devem ser determinados para calcular as perdas da caldeira.

a) Ar teórico necessário para combustão (kg/kg de combustível)

$$AT = \frac{[(11,6 * C) + \left\{34,8 * \frac{O_2}{8}\right\} + (4,35 * S)]}{100}$$

Onde:

C, H₂, O₂ e S são as porcentagens de carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre presentes no combustível.

b) Excesso de Ar suprido %

$$EA = \frac{O_2\%}{21 - O_2\%} * 100\%$$

Normalmente a medição de O₂ (da análise do gás da chaminé) é recomendada e se não estiver disponível, usa-se a medição de CO₂.

$$\frac{7900 * [(CO_2\%)_t - (CO_2\%)_a]}{(CO_2\%)_a * [100 - (CO_2\%)_t]}$$

Onde:

(CO₂%)_t - CO₂ Teórico

(CO₂%)_R - CO₂% Real medido no gás da chaminé

$$(CO_2\%)_T = \frac{\text{Mol de C}}{\text{Mol de N}_2 + \text{Mol de C}}$$

$$\text{Mol de N}_2 = \frac{\text{Peso de N}_2 \text{ no ar teórico}}{\text{Peso molecular de N}_2} + \frac{\text{Peso de N}_2 \text{ no combustível}}{\text{Peso molecular de N}_2}$$

$$\text{Mol de C} = \frac{\text{Mol de C no combustível}}{\text{Peso molecular de C}}$$

c) Massa real de ar suprido / kg de combustível (AAS)

$$\left\{1 + \frac{EA}{100}\right\} * \text{ar teórico}$$

3.6.2.3. Perda de calor no fluxo de gases secos de exaustão na chaminé

Esta é a maior perda de calor da caldeira e pode ser calculada com a seguinte fórmula:

$$P_1 = \frac{m * C_p * (T_f - T_a)}{\text{PCS do combustível}}$$

Onde:

P_1 - perda de calor no fluxo de gás seco de exaustão na chaminé (%);

m - massa de gás seco de exaustão (kg/kg de combustível);

{(produtos da combustão do combustível: CO_2 + SO_2 + nitrogênio no combustível + nitrogênio na massa real de ar fornecido + O_2 no gás da chaminé, H_2O) / (vapor de água no gás de combustão não devem ser considerados)}.

C_p - calor específico do gás de combustão (kcal/kg);

T_f - temperatura do gás chaminé ($^{\circ}\text{C}$);

T_a - temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$).

Massa total dos gases de combustão (m) / kg de combustível = (massa de ar real fornecido) / (kg de combustível + 1 kg de combustível)

Nota:

O vapor de água produzido a partir de hidrogênio em umidade de combustível, presente em combustível e ar durante a combustão. As perdas devidas a estes componentes não estão incluídas na perda pelos gases seco de exaustão na chaminé, uma vez que são calculadas separadamente como uma perda de gases de combustão úmida.

3.6.2.4. Perda de calor pela evaporação da água formada devido ao H₂ no combustível (%)

A combustão de hidrogênio provoca uma perda de calor porque o produto da combustão é a água. Esta água é convertida em vapor e esta transporta o calor para longe sob a forma do seu calor latente.

$$P_2 = \frac{9 * H_2 * \{584 + C_p * (T_f - T_a)\}}{\text{PCS do combustível}}$$

Onde:

P₂ - perda de calor na evaporação da água formada pelo H₂ no combustível (%);

H₂ - hidrogênio presente em 1 kg de combustível (kg);

C_p - Calor específico do vapor superaquecido (kcal/kg);

T_f - temperatura do gás chaminé (°C);

T_a - temperatura ambiente (°C);

584 - calor latente correspondente a pressão parcial de vapor de água (kcal/kg).

3.6.2.5. Perda de calor devido à umidade presente no combustível

Umidade que entra com o combustível deixa na caldeira como vapor superaquecido. Esta perda de umidade é constituída por calor sensível para trazer a umidade ao ponto de ebulição, o calor latente de evaporação da umidade, e o superaquecimento requerido para trazer este vapor para a temperatura dos gases de escape. Esta perda pode ser calculada com a seguinte fórmula:

$$P_3 = \frac{M * \{584 + C_p * (T_f - T_a)\}}{\text{PCS do combustível}}$$

Onde:

P₃ – perda de calor devido à umidade presente no combustível (%);

M – massa de água presente por kg combustível (kg);

C_p – calor específico do vapor superaquecido (kcal/kg);

T_f – temperatura do gás na chaminé (°C);

T_a – temperatura ambiente (°C);

584 – calor latente correspondente a pressão parcial de vapor de água (kcal/kg).

3.6.2.6. Perda de calor pela umidade presente no ar

O vapor sob a forma de umidade no ar de entrada é superaquecido a medida que passa através da caldeira. Uma vez que este calor sai por cima na chaminé, ele deve ser incluído como uma perda da caldeira.

Para relacionar esta perda para a massa de biomassa queimada, o teor de umidade do ar de combustão e a quantidade de ar fornecida por unidade de massa de biomassa queimada devem ser conhecidos.

A massa de vapor que contém ar pode ser obtida a partir de gráficos de psicrométricos e os valores típicos estão incluídos na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Valores típicos para massa de vapor no ar

Temperatura Bulbo seco	Temperatura Bulbo úmido	Umidade relativa	Fator de umidade Massa de água por massa de ar seco
(°C)	(°C)	(%)	(kg/kg)
20	20	100	0,016
20	14	50	0,008
30	22	50	0,014
40	30	50	0,024

$$P_4 = \frac{AAS * f.u. * C_p * (T_f - T_a)}{PCS \text{ do combustível}}$$

Onde:

P_4 – perda de calor devido à umidade presente no ar;

AAS – massa de ar real suprida por kg de combustível (kg);

f.u. (Fator de umidade) – quantidade de água/quantidade de ar (kg/kg);

C_p – calor específico do vapor superaquecido (kcal/kg);

T_f – temperatura do gás na chaminé (°C);

T_a – temperatura ambiente (°C) (bulbo seco).

3.6.2.7. Perda de calor devido à combustão incompleta

Produtos formados pela combustão incompleta podem ser misturados com oxigênio e queimados novamente com uma libertação adicional de energia. Tais produtos incluem CO, H₂ e vários hidrocarbonetos e são geralmente encontrados no gás de combustão das caldeiras.

Sendo que o monóxido de carbono é o único gás cuja concentração pode ser determinada convenientemente em um teste da caldeira.

$$P_5 = \frac{\%CO * C}{\%CO + \%CO_2} * \frac{5744}{PCS \text{ do combustível}}$$

Onde:

P_5 - perda de calor devido à conversão parcial de C do CO;

CO - volume de CO nos gases da chaminé (%);

CO₂ - volume real de CO₂ nos gases da chaminé (%);

C - teor de carbono no combustível (%);

5744 - perda de calor devido a combustão parcial do carbono (kcal/kg).

3.6.2.8. Perda de calor devido à radiação e convecção

As perdas de calor, a partir de uma caldeira consistem na perda de calor por radiação e convecção a partir da superfície externa da caldeira de fundição para ambiente circundante. Normalmente a perda pela superfície é estimada com base no tipo e tamanho da caldeira como dado abaixo:

- Para caldeira industrial flamotubular = 1,5 a 2,5%
- Para caldeira industrial aquatubulares = 2 a 3%
- Para caldeira de geração de energia = 0,4 a 1%

No entanto, pode ser calculada se a área da superfície da caldeira e sua temperatura de superfície são conhecidas como dado a seguir:

$$P_6 = 0,548 * \left[\left(\frac{T_s}{55,55} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{55,55} \right)^4 + 1,957 * (T_s - T_a)^{1,25} * \sqrt{\left(\frac{(196,85V_m + 68,9)}{68,9} \right)} \right]$$

Onde:

P_6 – Perdas por irradiação (W/m²);

V_m – Velocidade do vento (m/s);

T_s – Temperatura da superfície (K);

T_a – Temperatura ambiente (K).

A perda de calor devido ao carbono não queimado nas cinzas volantes e cinzas. Pequenas quantidades de carbono são deixadas nas cinzas e isto constitui uma perda de calor potencial no combustível. Para avaliar estas perdas de calor, as amostras de cinzas devem ser analisadas para o conteúdo de carbono.

3.6.2.9. Perda de calor devido ao combustível não queimado em cinzas volantes (%)

$$P_7 = \frac{(\text{cinzas totais coletadas/combustível não queimado}) * G.C.V \text{ da cinza volante}}{\text{PCS do combustível}}$$

3.6.2.10. Perda de calor não queimados em cinzas (%)

$$P_8 = \frac{(\text{cinzas totais coletadas/combustível não queimado}) * G.C.V \text{ da cinza na grelha}}{\text{PCS do combustível}}$$

4. METODOLOGIA

4.1. Introdução

A metodologia utilizada neste trabalho está descrita no fluxograma da Figura 4.1. O primeiro passo é colheita das biomassas a partir do corte, utilizando uma motosserra no caso do eucalipto e manualmente com o uso do podão no caso do capim elefante.

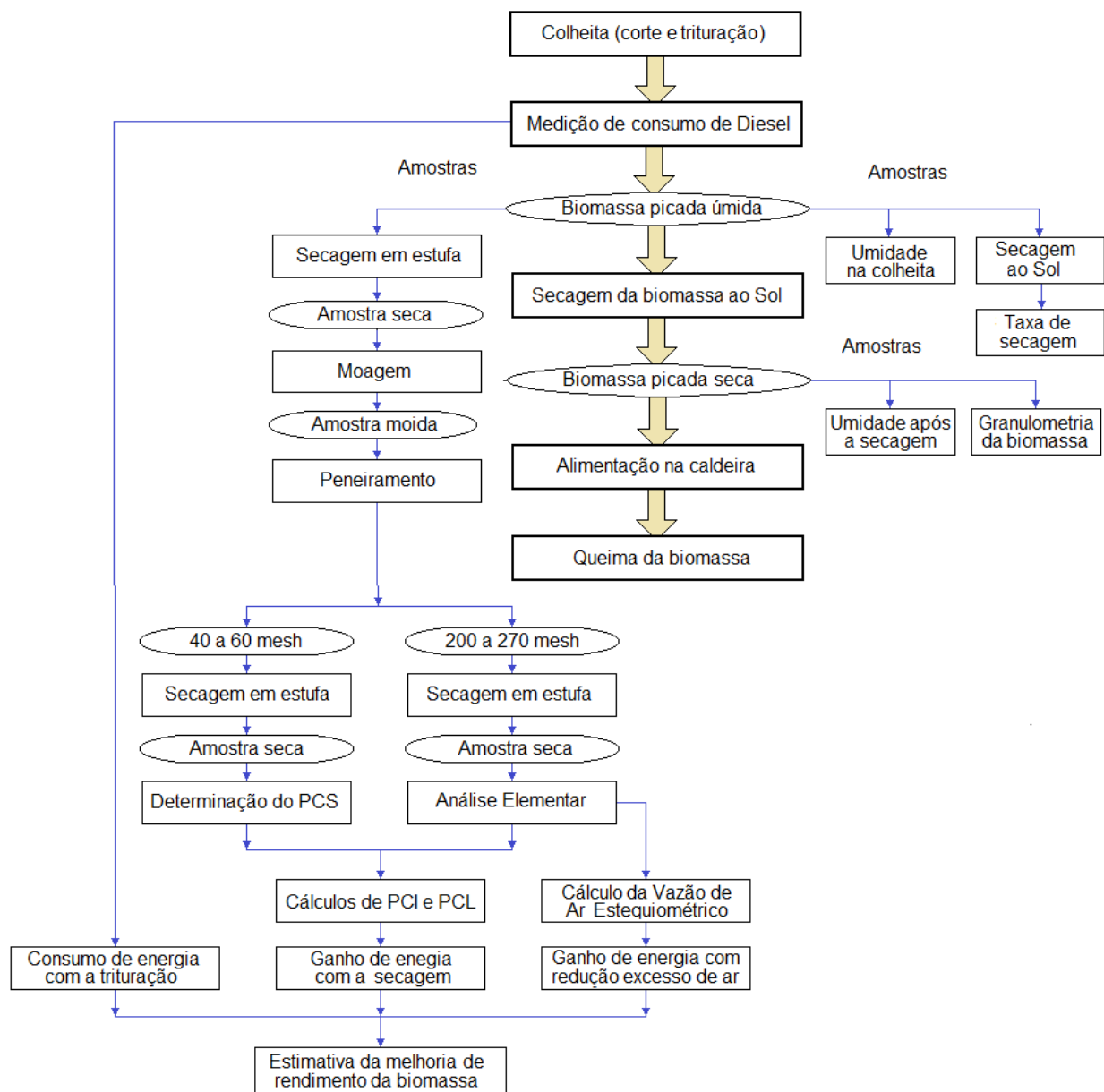


Figura 4.1 - Fluxograma de atividades desenvolvidas

Após o corte, a biomassa foi picada (triturada) utilizando um picador acoplado ao motor do trator, obtendo-se a biomassa picada úmida e também foi medido o consumo de diesel para picar uma determinada quantidade de amostra de cada biomassa.

A partir da biomassa picada úmida foram retiradas amostras para medição da umidade da biomassa na colheita, taxa de secagem ao sol, poder calorífico superior (PCS) e análise elementar (N-C-H-S-O), necessária para determinação do poder calorífico inferior (PCI). As amostras utilizadas para determinação de PCS foram secas em estufa e depois trituradas e peneiradas, as frações de 40 a 60 mesh foram novamente secas na estufa e utilizadas para determinação de PCS e as frações de 200 a 270 mesh, após serem novamente secas na estufa, foram utilizadas na realização das análises elementar para cada amostra de biomassa.

A biomassa picada úmida foi levada ao pátio para ser seca ao sol, que a após recolhida foi levada ao reservatório do alimentador de biomassa da caldeira para ser alimentada com vazão controlada e queimada na caldeira. Nesta etapa foi avaliado o desempenho do alimentador no transporte na alimentação da biomassa picada e o taxa de produção de vapor na caldeira.

Os resultados das determinações de PCS e análise elementar possibilitaram os cálculos para o PCI e as estimativas para o PCL das amostras e com a incorporação da energia solar utilizada na redução da umidade na secagem (perdas na caldeira por calor latente não recuperado) determinou-se o ganho de energia com a secagem. Somando este ganho com a melhoria de eficiência da caldeira devido à redução de excesso de ar e massa de gases na chaminé (perdas por calor sensível na caldeira) e descontando a energia gasta para picar a biomassa obteve-se a estimativa de melhoria de rendimento energético da biomassa.

4.2. Seleção e colheita das amostras de biomassas

As amostras de biomassas de capim elefante selecionadas para o desenvolvimento deste estudo foram: - *Pennisetum purpureum* Schum. cultivar Roxo e Napier, e o híbrido *Pennisetum hybridum*, cultivar Paraíso.

A espécie *Pennisetum purpureum* Schum. é muito utilizada devido ao seu grande potencial produtivo. Segundo Lorenzi (2000), trata-se de uma gramínea perene, ereta, cespitosa, rizomatosa, de colmos compactos, de 1,5 a 3,5 m de altura originária da África, propaga-se por sementes e rizomas. Há vários cultivares desta espécie cada qual com características próprias, assim *P. purpureum*, cultivar Napier, apresenta plantas com colmos

grossos, folhas largas, florescimento de abril a maio, touceiras abertas e resistência à seca; *P. purpureum*, cultivar Roxo, possui características semelhantes ao cultivar Napier, diferenciando-se apenas pela coloração da folhagem, com tonalidade arroxeada (LOPES, 2004).

O capim elefante “Paraíso” é o resultado obtido do cruzamento de *P. purpureum* Schum. com *Pennisetum glaucum* (L) R. Br (o milheto), uma das vantagens deste cruzamento foi obter uma planta que se reproduzisse por sementes. Apresenta habito ereto, porte de dois a três metros de altura e produção de sementes em torno de 500 a 1.500 kg/ha (FERRARI JUNIOR et al. 2009; LOPES, 2004).

As amostras de biomassas de eucalipto selecionadas para o desenvolvimento deste estudo foram: - *Eucalyptus urophylla*, *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus citriodora*.

A espécie *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden, planta de hábito arbóreo, perenifólia, de 20 - 40 m de altura, originária da Austrália, com tronco retilíneo e casca pulverulenta que se desprende do troco exibindo uma superfície lisa de cores branca, acinzentada, esverdeada ou salmão, multiplica-se por sementes e estacas. Utilizada em reflorestamentos e plantios em barrancos de rios e locais de inundação devido às longas raízes que produz para fixação do solo, também utilizada para fabricação de caixotarias e construção civil (LORENZI et al., 2003).

O eucalipto *E. urophylla* S. T. Blake caracteriza-se como planta de porte arbóreo, perenifólia, de 25-35 m de altura, originária do Timor Leste, com tronco ereto e cilíndrico, revestido por casca grossa com fissuras cinza escuro, multiplica-se exclusivamente por sementes. Árvore de crescimento rápido, cultivada devido a produção de polpa celulósica (LORENZI et al., 2003).

O eucalipto *E. citriodora* Hook é uma planta de hábito arbóreo, perenifólia, muito aromática, de 15 - 30 m de altura, originária da Austrália, com tronco ereto e casca lisa e descídua, cinza ou rósea, multiplica-se exclusivamente por sementes. Cultivada para reflorestamentos e extração de óleo essencial, produz madeira dura e fácil de trabalhar, utilizada pela indústria moveleira e em construção civil (LORENZI et al., 2003).

4.2.1. Capim elefante “Roxo”

O capim elefante “Roxo” foi selecionado na propriedade do Sr. Osmir Martinho Labanca - Sítio Guaritá, no município de Muzambinho - MG, Latitude 21° 20’ 39’’ S, Longitude 46° 26’ 58’’ O e Altitude de 1062 m (Figura 4.2).

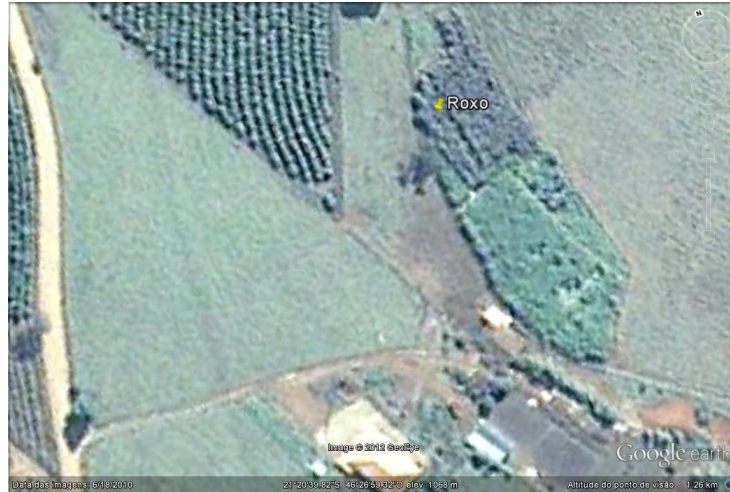


Figura 4.2 - Localização do plantio de capim elefante “Roxo”

A escolha da biomassa foi realizada seguindo-se alguns critérios: - ter no mínimo um ano; - proximidade com o campus Muzambinho do IFSULDEMINAS, onde foi realizada a trituração (Figuras 4.3 e 4.4).

O corte foi realizado manualmente com o uso do podão e a preparação da biomassa foi realizada com um triturador de galhos Confimenta 600 RF acoplado a um trator Massey Ferguson 275 (Figuras 4.5 e 4.6).



Figuras 4.3 e 4.4 - Amostras de capim elefante “Roxo” antes da colheita



Figuras 4.5 e 4.6 - Amostras de capim elefante “Roxo” colhidas e picadas

4.2.2. Capim elefante “Napier”

A seleção do capim elefante “Napier” foi realizada na plantação do IFSULDEMINAS - Campus Muzambinho, Latitude 21° 20’ 42’’ S, Longitude 46° 32’ 10’’ O e Altitude de 1017 m (Figura 4.7).



Figura 4.7 - Localização do plantio de capim elefante “Napier”

O critério utilizado para a seleção da gramínea foi ter no mínimo um ano e o corte foi realizado manualmente com podão e a trituração desta variedade foi realizada com os mesmos equipamentos das demais biomassas selecionadas para este estudo (Figuras 4.8 a 4.11).



Figuras 4.8 e 4.9 - Amostras de capim elefante “Napier” antes da colheita



Figuras 4.10 e 4.11 - Amostras de capim elefante “Napier” colhida e picada

4.2.3. Capim elefante “Paraíso”

A variedade do capim elefante “paraíso” foi coletada na fazenda Bom Jesus no distrito da Guardinha do município de São Sebastião do Paraíso - MG, propriedade produtora do Grupo Matsuda Minas, Latitude 20° 54’ 34’’ S, Longitude 47° 9’ 28’’ O e Altitude de 841 m (Figura 4.12).



Figura 4.12 - Localização do plantio de capim elefante “Paraíso”

A escolha da espécie de capim elefante “paraíso” foi devido a fato de ser multiplicada através de sementes ou colmos.

Para o corte selecionou-se gramíneas com no mínimo um ano (Figuras 4.13 e 4.14) e seu corte realizado manualmente com podão.

A trituração (picagem) deste material foi realizada com os mesmos equipamentos das demais biomassas selecionadas para este estudo (Figuras 4.15 e 4.16).



Figuras 4.13 e 4.14 - Amostras de capim elefante “paraíso” antes da colheita



Figuras 4.15 e 4.16 - Amostras de capim elefante “paraíso” colhida e picada

4.2.4. Eucalipto *E. urophylla*

O eucalipto *E. urophylla* foi selecionado na fazenda do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sul de Minas (IFSULDEMINAS) - campus Muzambinho, cujo plantio está localizado na Latitude 21° 20' 33'' S, Longitude 46° 31' 34'' O e Altitude de 997 m (Figura 4.17). O critério utilizado para a seleção da árvore foi ter no mínimo sete anos e foram selecionadas as árvores mostradas nas Figuras 4.18 e 4.19.



Figura 4.17 - Localização do plantio de eucalipto (*E. urophylla*)



Figuras 4.18 e 4.19 - Amostras das árvores de eucalipto (*E. urophylla*) antes da colheita

A colheita foi realizada com a utilização de uma motosserra marca Stihl, modelo 08 S, cilindrada 60,3 cm³, sabre 53 cm, corrente 0,404" Rapid-Standard com potência de 2,8 kW (3,8 DIN-PS) para o corte (Figuras 4.20 e 4.21).



Figuras 4.20 e 4.21 - Corte das árvores de eucalipto *E. urophylla*

Após o corte, o material foi colocado manualmente em um triturador de galhos da marca Máquinas Agrícolas Menta MIT, modelo Confimentia 600 RF, série N° 0004, 02/2000, acoplado a um trator (Massey Ferguson, modelo 275 4x2 com motor de 56 CV de potência) e este a uma carreta basculante da marca Jumil, modelo JM CHD 5.0 RD, medindo 3x2x1 m, onde foi lançado o material triturado e transportado para a área de secagem ao ar livre sob o sol no IFSULDEMINAS - campus Muzambinho (Figuras 4.22 e 4.23).



Figuras 4.22 e 4.23 - Amostras de eucalipto *E. urophylla* colhida e picada

As amostras foram armazenadas em sacos plásticos, a fim de reter a umidade até o momento da realização dos ensaios.

4.2.5. Eucalipto *E. grandis*

A seleção do eucalipto *E. grandis* foi realizada no IFSULDEMINAS - campus Muzambinho. O critério utilizado para a seleção da árvore foi ter no mínimo sete anos, assim como o da espécie eucalipto *E. urophylla*. Foram selecionadas três árvores localizadas na Latitude 21° 21' 11'' S, Longitude 46° 31' 14'' O e Altitude de 997 m (Figuras 4.24 a 4.26).

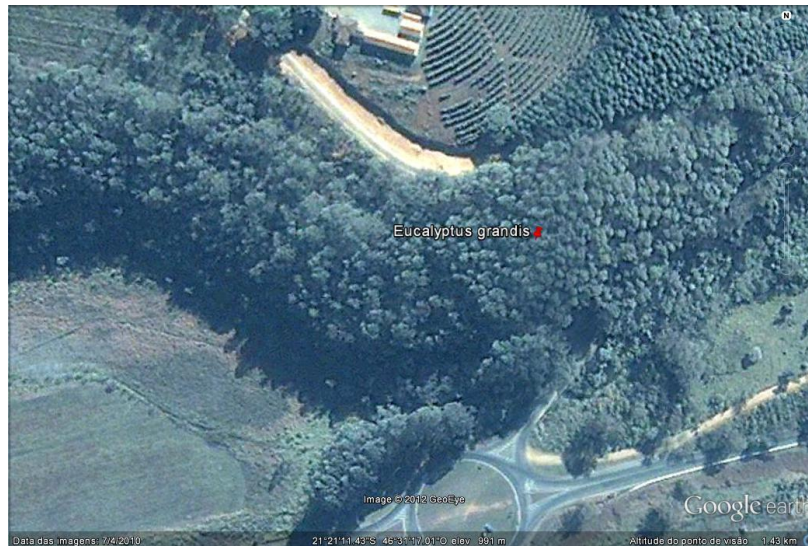


Figura 4.24 - Localização do plantio de eucalipto *E. grandis*



Figuras 4.25 e 4.26 - Amostras de eucalipto *E. grandis* antes da colheita

A colheita foi realizada com a utilização de motosserra Stihl para o corte e para preparação da biomassa utilizou-se um triturador de galhos Confimentá 600 RF acoplado a um trator Massey Ferguson 275 (Figuras 4.27 e 4.28).



Figuras 4.27 e 4.28 - Amostras de eucalipto *E. grandis* colhida e picada

4.2.6. Eucalipto *E. citriodora*

A espécie de eucalipto *E. citriodora* foi coletada no IFSULDEMINAS - campus Muzambinho e o critério utilizado para a seleção das árvores foi ter no mínimo sete anos. Foram selecionadas três árvores localizadas na Latitude 21° 21' 3'' S, Longitude 46° 31' 46'' O e Altitude de 1039 m (Figuras 4.29 a 4.31).



Figura 4.29 - Localização do plantio de eucalipto *E. citriodora*



Figuras 4.30 e 4.31 - Amostras de eucalipto *E. citriodora* antes da colheita

A colheita foi realizada com a utilização de motosserra Stihl para o corte e para preparação da biomassa utilizou-se um triturador de galhos Confiment 600 RF acoplado a um trator Massey Ferguson 275 (Figuras 4.32 e 4.33).



Figuras 4.32 e 4.33 - Amostras de eucalipto *E. citriodora* colhida e picada

Vale destacar que as biomassas de todas as amostras de eucalyptus foram oriundas de troco, galhos e folhas.

4.3. Determinação da umidade da biomassa na colheita

Para determinação da umidade das biomassas foram escolhidas a cultivar Napier do capim elefante e a espécie *E. urophylla* do eucalipto.

As determinações da umidade das amostras de biomassa recém-colhidas e picadas foram realizadas utilizando secagem completa em estufa com temperatura de $99 \pm 2^\circ\text{C}$ até massa constante, sendo a diferença entre a massa inicial e final da quantidade de água evaporada, que dividida pela massa total forneceu o valor do teor de umidade das amostras (Figuras 4.34 a 4.37).



Figuras 4.34 e 4.35 - Detalhes da biomassa recém colhida antes da determinação do teor de umidade



Figuras 4.36 e 4.37 - Detalhes da estufa utilizada na secagem

4.4. Determinação do consumo de diesel para picar a biomassa

Neste tópico são apresentadas as máquinas e o método utilizado para medir o consumo de energia para picar as biomassas.

4.4.1. Máquinas utilizadas para picar as Biomassas

Para picar as biomassas utilizou-se um triturador de galhos Confimentá 600 RF acoplado a um trator Massey Ferguson 275 (Figuras 4.38 a 4.47).



Figuras 4.38 e 4.39 - Detalhes do sistema de medição de consumo de diesel para picar a biomassa



Figuras 4.40 e 4.41 - Detalhes do equipamento utilizado para picar a biomassa



Figuras 4.42 e 4.43 - Detalhes do equipamento utilizado para picar a biomassa com a carreta



Figuras 4.44 e 4.45 - Detalhes da biomassa recém colhida antes de picar



Figuras 4.46 e 4.47 - Detalhes da biomassa recém colhida após picar

4.4.2. Consumo de diesel para picar as Biomassas

Para cada 5 minutos de funcionamento com o motor rotação 2.000 rpm e um consumo de 1.000 ml de óleo diesel, foi picado as quantidades de:

- Capim elefante “Napier” picado - total de 189,55 kg
- Eucalyptus *E. urophylla* picado - total de 142,95 kg

4.5. Determinação do Poder Calorífico Superior (PCS)

Neste tópico serão apresentadas as etapas para determinação do Poder Calorífico Superior (PCS): secagem das amostras trituradas em estufa; moagem e peneiragem das amostras; secagem das amostras peneiradas em estufa; e fracionamento da amostra pela fração 40-60 mesh para quantificação do PCS.

4.5.1. Secagem das amostras trituradas em estufa

As biomassas utilizadas para a determinação do PCS foram preparadas através das seguintes etapas:

- a) Trituração: para obtenção de porções através de triturador de galhos Confimenta 600 RF acoplado a um trator Massey Ferguson 275. As amostras foram armazenadas em um saco plástico até o momento da realização dos ensaios.
- b) Secagem: as partículas obtidas na trituração do eucalipto e capim elefante foram secas no Laboratório de solos do IFSULDEMINAS - campus Muzambinho

As amostras foram preparadas e submetidas à secagem, utilizando-se uma balança eletrônica com capacidade de 2,2 kg e uma estufa com circulação forçada de ar, a temperatura

de $45 \pm 2^\circ\text{C}$, realizando pesagem das massas 3 vezes ao dia, até atingirem massa constante (Figuras 4.48 a 4.51).



Figuras 4.48 e 4.49 - Estufa para secagem das amostras n



Figuras 4.50 e 4.51 - Amostras secas na estufa

4.5.2. Moagem das amostras

Após a secagem das biomassas, realizou-se a moagem em um moinho com câmara de aço inoxidável tipo Willye TE 650, equipado com peneira, visando à obtenção de material fino e homogêneo para em seguida realizar a peneiragem (Figuras 4.52 a 4.55).



Figuras 4.52 e 4.53 - Moinho e as amostras processadas



Figuras 4.54 e 4.55 - Detalhes do Moinho tipo Willye

4.5.3. Peneiragem das amostras

Para realizar a peneiragem das biomassas, o material foi transportado em sacos plásticos para o Laboratório de Usinagem da Madeira, pertencente ao Departamento de Ciências Florestais (DCF), localizado na Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, Minas Gerais, onde se procedeu ao peneiramento manual das amostras em fração de 40-60 mesh e 200-270 mesh, armazenadas em potes plásticos identificados e vedadas para as análises (Figuras 4.56 a 4.59).



Figuras 4.56 e 4.57 - Local de preparação das amostras e realização de medidas de PCS



Figuras 4.58 e 4.59 - Preparação das amostras e realização de medidas de PCS

4.5.4. Secagem das amostras peneiradas em estufa a $103\pm 3^{\circ}\text{C}$

Para secagem das amostras peneiradas, utilizou-se uma estufa disponível no Laboratório de Tecnologia da Madeira do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras (MG), com circulação forçada de ar, a temperatura de $103\pm 3^{\circ}\text{C}$, até atingirem massa constante (Figuras 4.60 e 4.61).



Figuras 4.60 e 4.61 - Equipamentos utilizados na secagem das amostras para realização de medidas de PCS

4.5.5. Fração de 40-60 mesh para quantificação do PCS

As frações que passaram por 40 mesh e retidas em 60 mesh foram pesadas e acondicionadas em embalagens plásticas (Figuras 4.62 e 4.63).



Figuras 4.62 e 4.63 - Amostras peneiradas e balança de precisão

4.5.6. Determinação do PCS

Os ensaios de determinação do poder calorífico superior (PCS) das amostras de eucalipto e capim elefante foram realizados obedecendo à norma ABNT NBR 8633/84 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984) (Determinação do Poder Calorífico), no Laboratório de Tecnologia da Madeira do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras-MG foi medido o PCS em base seca das biomassas

estudadas. A aparelhagem utilizada foi uma bomba calorimétrica Parr instrument Company CAT. N° 2901 EB, mostrada nas Figuras 4.64 a 4.69.

As frações das amostras retidas na peneira de 60 mesh foram secas em uma estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$, até o peso constante, logo em seguida foram pesadas e colocadas em um cadinho metálico para a determinação da análise.

Na bomba calorimétrica as medidas foram feitas a volume constante e sem escoamento de material. A amostra da biomassa foi fechada dentro de um recipiente de metal com atmosfera de oxigênio sob alta pressão de 25 atm. Durante o processo a bomba foi mergulhada em um recipiente com parede dupla contendo 2 litros de água em seu interior e a ignição foi realizada através de conexão elétrica externa. A temperatura da água foi medida com um termômetro, antes e depois do processo e um agitador assegurou a uniformidade da temperatura da água ao redor da bomba.

Durante a queima registrou-se a temperatura. Após a elevação de temperatura (cerca de 4 a 5 minutos) estas foram registradas até que as diferenças entre as leituras sucessivas fossem constantes.

Após a queima, despressurizou-se a bomba lentamente, abriu-se a tampa e foi examinado o interior da mesma para verificação da combustão, em seguida lavou-se o seu interior, incluindo os eletrodos e o cadinho onde foi colocada a amostra, com um jato fino de água destilada, seguindo-se de um recolhimento das águas de lavagem num béquer, titulando-as com solução ácida nítrica, usando alaranjado de metila como indicador da cor amarelo ouro. Removeu-se e mediram-se as partes do fio de ignição não queimado, subtraindo-se do comprimento original, registrando a diferença do fio consumido e multiplicando-se por 2,3. Em seguida determinou-se o PCS pela substituição na fórmula abaixo:

$$\text{PCS} = \frac{(W * \Delta T - E_1 - F_3)}{m}$$

Onde:

PCS – poder calorífico superior (kcal/kg);

W – massa de água vezes o calor específico da água = 2475,82 (kcal/°C);

$\Delta T = (T_f - T_i)$ – variação de temperatura (°C);

E_1 – fator de correção de acidez residual (kcal);

F_3 – fator de correção a queima do fio de ignição (kcal);

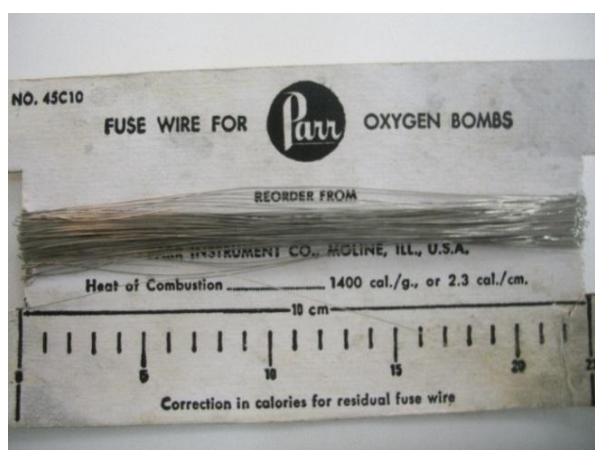
m – massa seca de combustível (kg).



Figuras 4.64 e 4.65 - Bomba calorimétrica utilizada para realização de medidas de PCS



Figuras 4.66 e 4.67 - Detalhes dos cadinhos e da bomba calorimétrica utilizada para realização de medidas de PCS

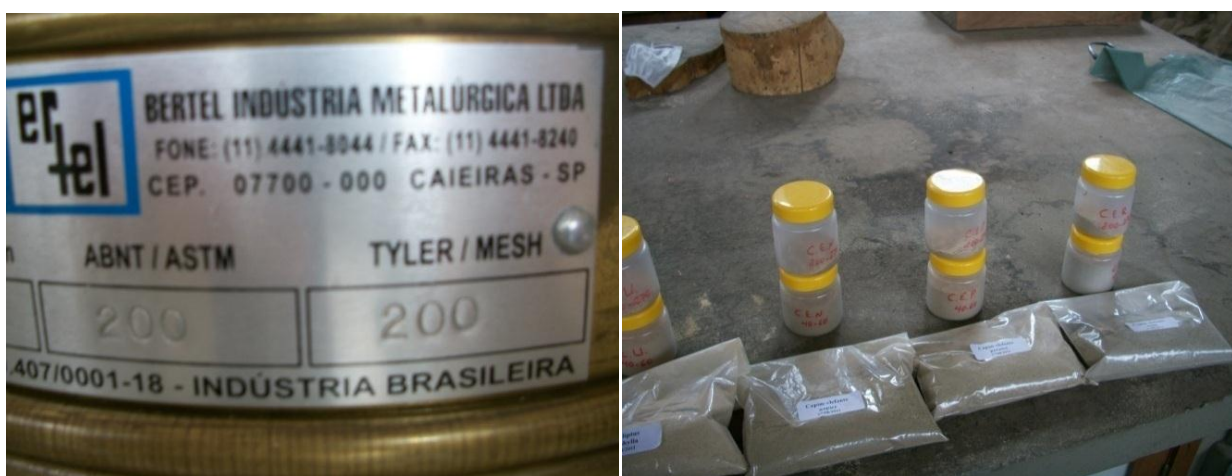


Figuras 4.68 e 4.69 - Detalhes da bomba calorimétrica utilizada nas medidas de PCS

4.5.7. Análise elementar (N-C-H-S-O) da fração 200-270 mesh

As frações que passaram por 200 mesh e retidas em 270 mesh, foram secas em estufa de circulação forçada de ar a $103\pm 3^{\circ}\text{C}$ até atingirem massas constante e, posteriormente, levadas para o equipamento elementar, modelo vario MICRO CHN, para a quantificação de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e, por diferença, o oxigênio do material. Essa análise foi realizada no Laboratório de Energia da Biomassa (LEBF) do DCF/UFLA (Figuras 4.70 a 4.73).

Os resultados da análise elementar permitem calcular o poder calorífico inferior (PCI) da biomassa, a partir do PCS.



Figuras 4.70 e 4.71 - Detalhes da peneira e amostras preparadas para a análise elementar



Figuras 4.72 e 4.73 - Equipamentos utilizados para a análise elementar

4.6. Determinação do PCI (Poder Calorífico Inferior)

O Poder Calorífico Inferior (a 0% de umidade) é calculado em função do PCS (obtido pela bomba calorimétrica), sendo que o PCI é determinado através de cálculos, uma vez que os calorímetros não permitem a medição e a simultânea liberação dos vapores.

Os valores utilizados são relativos à massa em base seca.

$$PCI = PCS - 600 * 9 * \frac{H}{100}$$

Onde:

PCI - poder calorífico inferior (kcal/kg);

PCS - poder calorífico superior (kcal/kg);

H - teor de hidrogênio (%).

4.6.1. Determinação do PCL em função da umidade por kg de massa total

Para determinação do PCL foi utilizada a equação que se segue:

$$PCL = PCI * \left[\frac{(100 - U)}{100} \right] - (6 * U)$$

Onde:

PCL - poder calorífico líquido (kcal/kg);

PCI - poder calorífico inferior (kcal/kg);

U - teor de umidade da biomassa (b.u.) (%).

4.6.2. PCL em função da umidade por kg de massa seca

No item anterior, os valores de PCL foram estimados para amostras de 1 kg de massa total (massa seca mais umidade), com a quantidade de massa seca variável, onde forneceu resultado de uma reta do PCL em função da umidade. Porém durante o processo de secagem somente a quantidade de água (massa umidade) varia, mantendo constante a quantidade de massa seca. Assim a determinação do PCL, neste caso, deve ser feita em função de uma quantidade fixa de massa seca, por exemplo: 1 kg.

4.6.3. Determinação do PCU em função da umidade

O Poder Calorífico Útil (PCU), para uma determinada umidade (U) e temperatura dos gases de exaustão na chaminé, e excesso de Ar (EA) pode ser estimado a partir do PCS e do rendimento da caldeira estimado pelo método indireto:

$$\eta_{\text{método indireto}} = \frac{\text{PCS} - (P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8)}{\text{PCS}} (\%)$$

Onde:

P_1 - Perdas devido aos gases secos na chaminé (calor sensível);

P_2 - Perdas devido ao hidrogênio no combustível (H_2);

P_3 - Perdas devido à umidade no combustível (H_2O);

P_4 - Perdas devido à umidade no ar (H_2O);

P_5 - Perdas devido ao monóxido de carbono (CO);

P_6 - Perdas por combustível não queimado em cinzas volantes (Carbono);

P_7 - Perdas por combustível não queimado em cinzas (Carbono);

P_8 - Perdas devido a superfícies externa da caldeira (radiação, convecção e outras não consideradas).

Considerando o PCU como:

$$\text{PCU} = \text{PCS} - (P_1 + P_2 + P_3) \quad (\text{kcal/kg})$$

Assim:

$$\eta_{\text{método indireto}} = \frac{\text{PCU} - (P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8)}{\text{PCS}} (\%)$$

Onde:

$$P_{\text{outras}} = P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 \quad (\text{kcal/kg})$$

e

$$\eta_{\text{método indireto}} = \frac{\text{PCU} - P_{\text{outras}}}{\text{PCS}} (\%)$$

Pode-se expressar o PCU em função do PCS e do rendimento (η):

$$PCU = \eta * PCS + P_{\text{outras}} \quad (\text{kcal/kg})$$

e

$$P_1 = \frac{m * C_p * (T_f - T_a)}{PCS}$$

$$P_2 = \frac{9 * H_2 * \{584 + C_p * (T_f - T_a)\}}{PCS}$$

$$P_3 = \frac{M * \{584 + C_p * (T_f - T_a)\}}{PCS}$$

Onde:

P_1 - perda de calor no fluxo de gás seco de exaustão na chaminé (%);

P_2 - perda de calor na evaporação da água formada pelo H_2 no combustível (%);

P_3 - perda de calor devido à umidade presente no combustível (%);

m - massa de gás seco de exaustão (kg/kg de combustível);

{(produtos da combustão do combustível: CO_2 + SO_2 + nitrogênio no combustível + nitrogênio na massa real de ar fornecido + O_2 no gás da chaminé, H_2O) / (vapor de água no gás de combustão não devem ser considerados)}.

M - massa de água presente por kg combustível (kg);

C_p - calor específico do gás de combustão (kcal/kg);

T_f - temperatura do gás chaminé ($^{\circ}C$);

T_a - temperatura ambiente ($^{\circ}C$).

H_2 - hidrogênio presente em 1 kg de combustível (kg)

584 - calor latente correspondente a pressão parcial de vapor de água (kcal/kg)

4.7. Secagem ao sol da biomassa picada

Após a trituração das biomassas, para a secagem destas diretamente ao sol foram utilizados quadros de madeira com medida de 100 cm x 100 cm com 2 cm de altura, onde colocamos as biomassas, sendo para F material fixo e para M material que foi movimentado a cada hora que estava exposto ao sol (Figuras 4.74 a 4.78).



Figuras 4.74 e 4.75 - Detalhes das biomassas preparadas para secagem ao sol



Figuras 4.76 e 4.77 - Biomassas nas bandejas identificadas após a secagem ao sol



Figura 4.78 - Detalhes das biomassas embaladas após a secagem

4.8. Desempenho da alimentação e queima da biomassa picada

Neste tópico será apresentada a descrição da caldeira e suas respectivas adaptações para queima das biomassas, bem como o processo de alimentação da caldeira e queima do capim elefante e do eucalipto.

4.8.1. Caldeira adaptada para queima de biomassa picada

Para queima das biomassas picadas foi utilizada uma caldeira flamotubular da marca BRS- Indústria e comércio Ltda. com capacidade de 900 kg de vapor por hora, categoria B, localizada no complexo agroindustrial do IFSULDEMINAS - campus Muzambinho.

Este equipamento está acoplado a um alimentador de biomassa picada que se utiliza de um sistema com rosca sem fim e um regulador de ar para controle da eficiência da queima. Os detalhes da caldeira estão mostrados nas Figuras 4.79 a 4.81. O alimentador de biomassa e seus detalhes construtivos e de operação são mostrados nas Figuras 4.82 a 4.85.



Figuras 4.79 e 4.80 - Caldeira utilizada nos experimentos de queima de biomassa picada



Figura 4.81 - Detalhes da placa de identificação da caldeira utilizada nos experimentos de queima de biomassa picada



Figuras 4.82 e 4.83 - Sistema de alimentação de biomassa para a caldeira



Figuras 4.84 e 4.85 - Detalhes do sistema de alimentação de biomassa para a caldeira

4.8.2. Alimentação e queima de capim elefante “Napier” picado

O ensaio de alimentação e queima de biomassa de capim elefante “Napier” picado foi realizado utilizando o alimentador de rosca sem fim (parafuso) mostrado nas Figuras 4.86 a 4.89.



Figuras 4.86 e 4.87 - Detalhes do sistema de silo e da rosca de alimentação de biomassa operando com capim elefante “Napier” picado



Figuras 4.88 e 4.89 - Detalhes do sistema de queima de biomassa na caldeira

O ensaio teve um tempo total de 2 horas e 47 minutos e foi utilizado um total de 105,8 kg de capim elefante “Napier” picado. A Figura 4.90 mostra detalhes da biomassa de capim elefante picado e seco ao sol.



Figura 4.90 - Detalhes do capim elefante picado utilizado no experimento de queima de biomassa

4.8.3. Alimentação e queima de eucalipto *E. urophylla* picado

O ensaio de alimentação e queima de biomassa de eucalipto picado foi realizado utilizando o alimentador de rosca sem fim (parafuso) mostrado nas Figuras 4.91 a 4.94.



Figuras 4.91 e 4.92 - Detalhes do sistema de silo e da rosca de alimentação de biomassa operando com eucalipto *E. urophylla* picado



Figuras 4.93 e 4.94 - Detalhes do sistema de alimentação e queima de biomassa na caldeira

O ensaio teve um tempo total de 1 hora e 19 minutos e foi utilizado um total de 91,7 quilos de eucalipto *E. urophylla* triturado.

4.9. Determinação do aumento de eficiência energética na utilização da biomassa

A partir do PCS e análise elementar (N-C-H-S-O) foi determinado o PCI de cada amostra de biomassa, e do PCI descontado a energia necessária para evaporar a umidade contida na biomassa (perda por calor latente não recuperado na caldeira) estimou-se o PCL das amostras para na umidade de colheita (média 74% para o capim elefante e média de 56% para o eucalipto) e na umidade de equilíbrio (10%) e correspondente ganho de energia com a secagem e com a incorporação da energia solar utilizada na redução da umidade na secagem. Somando ainda a este ganho com a melhoria da eficiência da caldeira devido à redução de excesso de ar e massa de gases na chaminé (perdas por calor sensível na caldeira) pode-se obter o poder calorífico Útil (PCU).

A partir do PCU e subtraindo a parcela de perdas na caldeira que independe do combustível (perda nas superfícies, purgas, etc.), que representa em torno de 5%, pode-se estimar a quantidade de vapor produzida (para determinada pressão e/ou temperatura), ou seja, a energia útil gerada pela biomassa.

O ganho obtido com a secagem ao sol e da utilização de um combustível com maior PCU e melhores características de queima e descontando a energia gasta para picar a biomassa obteve-se a estimativa de melhoria de rendimento energético da biomassa.

$$G_{\text{energético}} (\text{kcal/kg}_{\text{ms}}) = \text{PCU}_{\text{umidade equilíbrio}} - \text{PCU}_{\text{umidade colheita}} - C_{\text{diesel}}$$

Onde:

$G_{\text{energético}}$ – ganho energético com a secagem ($\text{kcal/kg}_{\text{ms}}$)

$\text{PCU}_{\text{umidade equilíbrio}}$ – PCU na umidade de equilíbrio da biomassa ($\text{kcal/kg}_{\text{ms}}$)

$\text{PCU}_{\text{umidade colheita}}$ – PCU na umidade de colheita após a secagem ($\text{kcal/kg}_{\text{ms}}$)

C_{diesel} – consumo de diesel para picar a biomassa ($\text{kcal/kg}_{\text{ms}}$)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Umidade da biomassa na colheita

As determinações dos teores de umidade da biomassa recém-colhida do cultivar capim elefante Napier e da espécie de eucalipto *E. urophylla* em três períodos do dia estão listadas nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Vale destacar que a biomassa do eucalipto foi oriunda de troco, galhos e folhas.

Tabela 5.1 - Teor de umidade das amostras de eucalipto recém-colhidas

Horário do corte	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
Corte de manhã	54,58	55,14	54,60	54,77
Corte meio do dia	59,02	59,22	58,42	58,89
Corte à tarde	54,30	54,08	53,68	54,02
Média dos três cortes	-	-	-	55,89

Tabela 5.2 - Teor de umidade das amostras de capim elefante recém-colhidas

Horário do corte	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média
Corte de manhã	77,68	76,58	77,48	77,25
Corte meio do dia	69,86	71,78	70,54	70,73
Corte à tarde	72,96	75,44	74,58	74,33
Média dos três cortes	-	-	-	74,10

5.2. Determinação do Poder Calorífico Superior (PCS)

As determinações de PCS foram realizadas obedecendo à norma ABNT NBR 8633/84 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984) (Determinação do Poder Calorífico), no Laboratório de Tecnologia da Madeira do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras (MG) e os resultados do PCS das amostras são apresentados nas Tabelas 5.3 e 5.4.

Tabela 5.3 - Resultados das medidas de PCS (kcal/kg) para capim elefante

Amostras	Repetição	m kg	T _i °C	T _f °C	ΔT °C	E ₁ kcal	F ₃ kcal	PCS kcal/kg	Média kcal/kg
C E R	1	0,3216	22,72	23,30	0,58	2,6	18,40	4399,80	
C E R	2	0,3220	22,50	23,08	0,58	2,5	18,40	4394,64	4397,22
C E N	1	0,3233	23,02	23,58	0,56	2,5	17,25	4227,37	
C E N	2	0,3225	23,48	24,04	0,56	2,5	18,40	4234,29	4230,83
C E P	1	0,3221	21,62	22,20	0,58	2,5	20,70	4386,14	
C E P	2	0,3194	22,20	22,78	0,58	2,5	20,70	4423,22	4403,18

Legenda: C E R = Capim elefante “Roxo”; C E N = Capim elefante “Napier”; C E P = Capim elefante “Paraíso”.

Tabela 5.4 - Resultados das medidas de PCS para eucalipto

Amostras	Repetição	m kg	T _i °C	T _f °C	ΔT °C	E ₁ kcal	F ₃ kcal	PCS kcal/kg	Média kcal/kg
E U	1	0,3217	22,78	23,40	0,62	2,7	19,55	4702,39	
E U	2	0,3202	23,32	23,92	0,60	2,9	18,40	4572,74	4637,56
E G	1	0,3225	22,72	23,32	0,60	2,0	20,70	4535,79	
E G	2	0,3291	23,33	24,00	0,67	2,0	23,00	4964,45	
E G	3	0,3210	23,84	24,44	0,60	2,5	18,40	4562,59	4687,61
E C	1	0,3228	21,14	21,74	0,60	2,6	18,40	4536,84	
E C	2	0,3220	21,80	22,42	0,62	2,2	14,95	4713,85	4625,34

Legenda: E U = *E. Urophylla*; E G = *E. Grandis*; E C = *E. Citriodora*.

Onde:

$\Delta T = (T_f - T_i)$ – variação de temperatura (°C);

E₁ – fator de correção de acidez residual (kcal);

F₃ – fator de correção da queima do fio de ignição (kcal);

m – massa seca de combustível (kg).

5.3. Análise elementar (N-C-H-S-O) da fração 200-270 mesh

Os resultados da análise elementar das amostras estão apresentados na Tabela 5.5 e Figura 5.1.

Tabela 5.5 - Resultados da análise elementar para amostras de capim elefante e eucalipto

Amostra	N %	C %	H %	S %	O %
C E R	1,38	41,20	5,799	0,080	51,54
C E N	1,21	37,76	5,205	0,139	55,70
C E P	1,20	41,83	5,760	0,165	51,05
E U	0,74	44,96	5,683	0,017	48,61
E G	0,90	44,74	5,672	0,029	48,66
E C	0,99	44,30	5,687	0,025	49,00

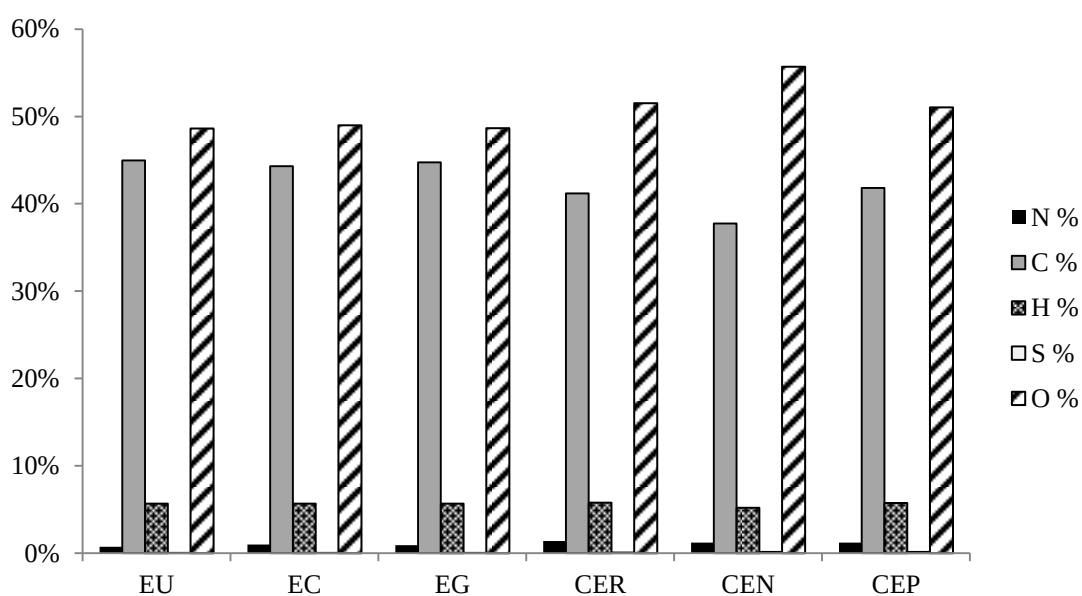


Figura 5.1 - Gráfico com resultados da análise elementar

5.4. Poder Calorífico Inferior (PCI)

O poder calorífico inferior (PCI) foi determinado através de cálculos, uma vez que os calorímetros não permitem a medição.

Os resultados do PCI das amostras são apresentados na Tabela 5.6 e Figura 5.2.

Tabela 5.6 - Resultados das determinações de PCI a partir do PCS

Amostra	PCS	H%	PCI
C E R	4397,22	5,799	4084,07
C E N	4230,83	5,205	3949,76
C E P	4404,68	5,760	4093,64
E U	4637,57	5,683	4330,69
E G	4687,61	5,672	4376,38
E C	4625,34	5,687	4318,24

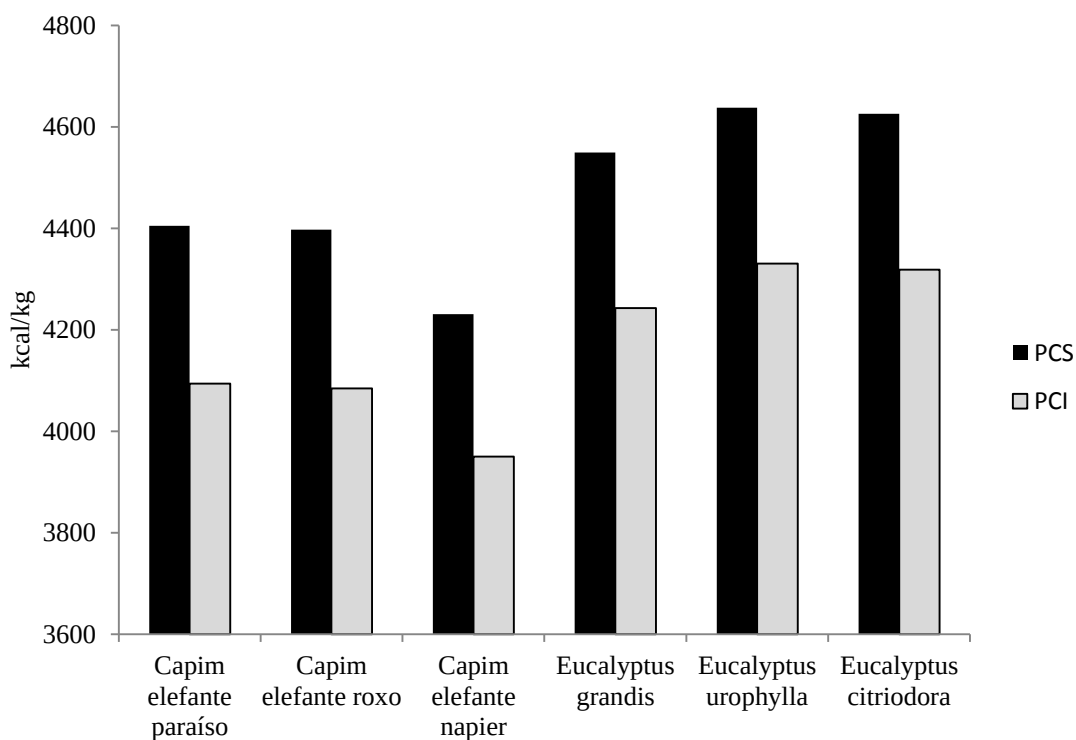


Figura 5.2 - Gráfico com resultados das determinações de PCI a partir do PCS

5.5. Poder Calorífico Líquido (PCL) em função do teor de umidade

Os resultados do PCL das amostras em função do teor de umidade são apresentados na Tabela 5.7 e Figura 5.3.

Tabela 5.7 - Resultados de PCL para capim elefante e eucalipto

Teor de umidade (%)	Capim Elefante			Eucalipto		
	roxo (kcal/kg)	Napier (kcal/kg)	paraíso (kcal/kg)	<i>E. urophylla</i> (kcal/kg)	<i>E. grandis</i> (kcal/kg)	<i>E. citriodora</i> (kcal/kg)
70	805,40	764,93	808,09	-----	-----	-----
65	1039,64	992,42	1042,77	-----	-----	-----
60	1273,87	1219,91	1277,45	-----	-----	-----
55	1508,10	1447,39	1512,14	1618,81	1579,31	1613,21
50	1742,34	1674,88	1746,82	1865,34	1821,45	1859,12
45	1976,57	1902,37	1981,50	2111,88	2063,60	2105,03
40	2210,80	2129,86	2216,18	2358,41	2305,74	2350,94
35	2445,04	2357,34	2450,87	2604,95	2547,89	2596,86
30	2679,27	2584,83	2685,55	2851,48	2790,03	2842,77
25	2913,50	2812,32	2920,23	3098,02	3032,18	3088,68
20	3147,74	3039,81	3154,91	3344,55	3274,32	3334,59
15	3381,97	3267,30	3389,59	3591,09	3516,47	3580,50
10	3616,20	3494,78	3624,28	3837,62	3758,61	3826,42
05	3850,44	3722,27	3858,96	4084,16	4000,76	4072,33
0	4084,67	3949,76	4093,64	4330,69	4242,90	4318,24

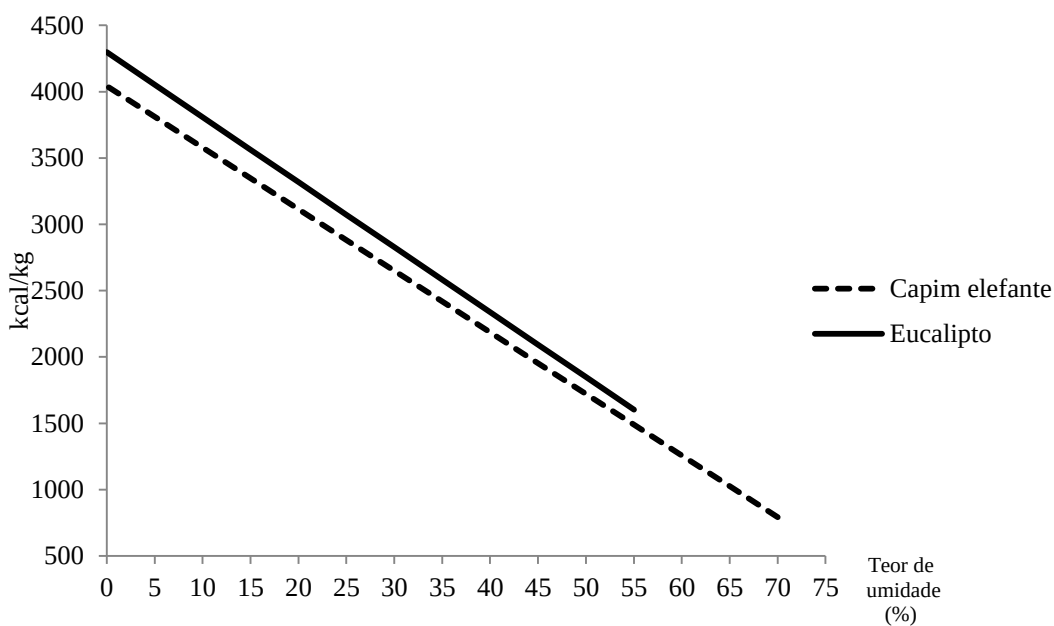


Figura 5.3 - Gráfico de valor de PCL por teor de umidade (kcal/kg)

O PCL em função do teor de umidade para massa constante de 1,0 kg, dado em kcal/kg, induz a uma ideia de que é possível se obter grandes economias de energia com a secagem, por exemplo, reduzindo a umidade de 50% para 10%, o PCL passa de 1859,1 para 3826,4 kcal/kg. Esta redução na umidade corresponderia a aumento de 105% no PCL, que não é verdadeiro, pois a matéria seca (M_{seca}) teria que variar para compensar a redução da massa umidade (M_{H_2O}) para que a matéria total (M_{total}) permaneça em 1,0 kg.

Na realidade, partindo de uma massa de 1,00 kg de biomassa com teor de 50% de umidade, ou seja, (M_{total}) irá variar de 1,00 kg para 0,55 kg e o PCL de $(3718,2/2) = 1859,1$ kcal para $(4251,6/2) = 2125,8$ kcal. Assim o aumento do PCL será de 14,3 % e não de 105%, (Tabela 5.8).

Tabela 5.8 - PCL em função da umidade por kg de massa seca

Umidade %	M_{total} kg	M_{H_2O} kg	M_{seca} kg	PCL kcal/kg	Total kcal
0,70	3,33	2,33	1,00	875,5	2918,3
0,65	2,86	1,86	1,00	1121,4	3204,0
0,60	2,50	1,50	1,00	1367,3	3418,3
0,55	2,22	1,22	1,00	1613,2	3584,9
0,50	2,00	1,00	1,00	1859,1	3718,2
0,45	1,82	0,82	1,00	2105,0	3827,3
0,40	1,67	0,67	1,00	2350,9	3918,2
0,35	1,54	0,54	1,00	2596,9	3995,2
0,30	1,43	0,43	1,00	2842,8	4061,1
0,25	1,33	0,33	1,00	3088,7	4118,2
0,20	1,25	0,25	1,00	3334,6	4168,2
0,15	1,18	0,18	1,00	3580,5	4212,4
0,10	1,11	0,11	1,00	3826,4	4251,6
0,05	1,05	0,05	1,00	4072,3	4286,7
0,00	1,00	0,00	1,00	4318,2	4318,2

As Figuras 5.4 e 5.5 mostram as curvas para comparação entre PCL em função do teor de umidade para 1 kg de massa total constante (variando a massa seca na proporção inversa da umidade adicionada, ou seja, para uma quantidade de umidade adicionada uma mesma quantidade de massa seca e retirada, mantendo a massa total constante) versus 1 kg de massa seca constante (variando a massa total, ou seja, adicionando umidade sem alterar a massa seca).

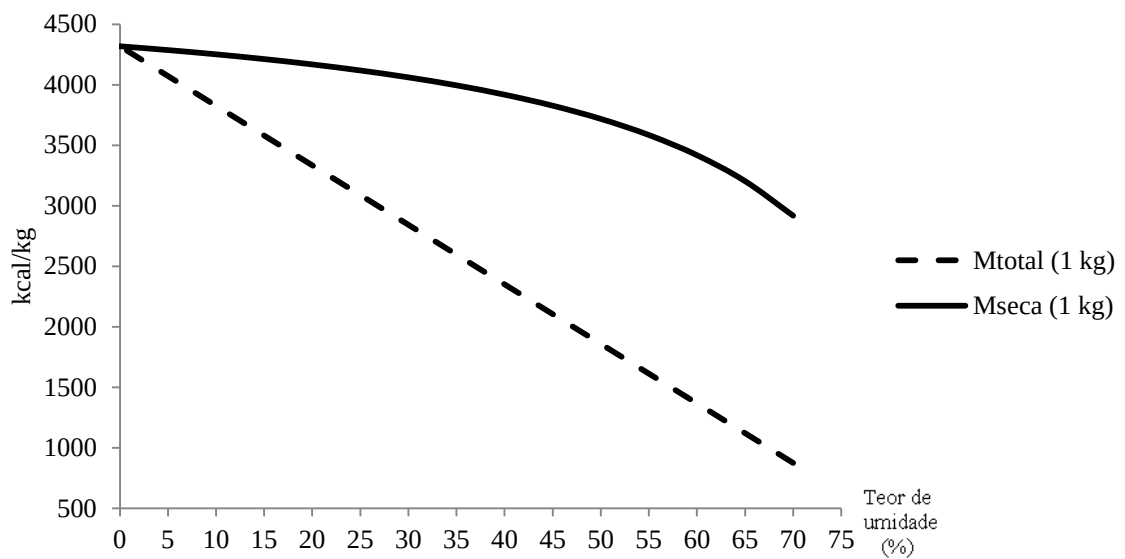


Figura 5.4 - Curvas de PCL por 1 kg de massa seca e por 1 kg de massa total

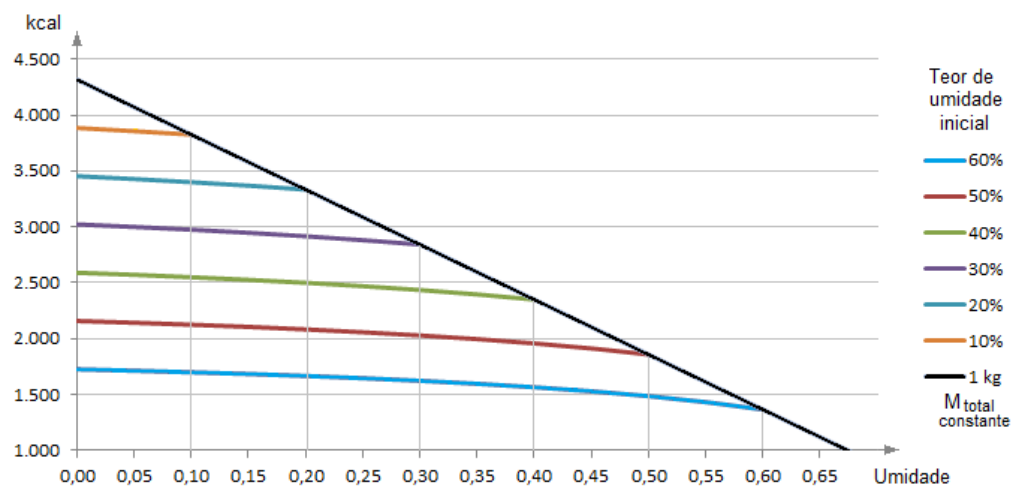


Figura 5.5 - Curvas de PCL em função da umidade para 1 kg de massa inicial total

5.6. Poder Calorífico Útil (PCU) em função do teor de umidade

Os resultados do PCU das amostras em função do teor de umidade são apresentados nas Tabelas 5.9 a 5.12 e Figura 5.6.

Tabela 5.9- Estimativa da massa de gases secos na chaminé

	Ar teórico	Excesso de ar	Massa de Ar	Gases Secos
C E R	4,60	50%	6,90	7,37
C E N	3,77	50%	5,66	6,18
C E P	4,64	50%	6,96	7,44
E U	4,99	50%	7,49	7,97
E G	5,08	50%	7,62	8,11
E C	5,05	50%	7,58	8,06

Tabela 5.10 - Estimativa das perdas P1 e P2

	P₁	P₂
C E R	5,78%	7,73%
C E N	5,04%	7,21%
C E P	5,83%	7,67%
E U	6,03%	7,19%
E G	6,11%	7,31%
E C	5,95%	7,21%

Tabela 5.11 - Estimativa das perdas P₃ em função da umidade

P3 Teor de umidade	Capim elefante			Eucalipto		
	roxo	Napier	paraíso	<i>E. urophylla</i>	<i>E. grandis</i>	<i>E. citriodora</i>
70	34,5%	35,9%	34,5%	-----	-----	-----
65	27,6%	28,6%	27,5%	-----	-----	-----
60	22,2%	22,2%	22,2%	-----	-----	-----
55	18,1%	18,1%	18,0%	17,2%	17,1%	17,5%
50	14,8%	14,8%	14,8%	14,1%	14,0%	14,3%
45	12,1%	12,1%	12,1%	11,6%	11,5%	11,7%
40	9,9%	9,9%	9,9%	9,4%	9,4%	9,6%
35	8,0%	8,0%	8,0%	7,6%	7,6%	7,7%
30	6,4%	6,4%	6,4%	6,1%	6,0%	6,2%
25	4,9%	4,9%	4,9%	4,6%	4,6%	4,7%
20	3,7%	3,7%	3,7%	3,5%	3,5%	3,6%
15	2,7%	2,7%	2,7%	2,5%	2,5%	2,6%
10	1,6%	1,6%	1,6%	1,5%	1,5%	1,6%
5	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%
0	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Tabela 5.12 - Estimativa para o PCU em função da umidade

PCU (%)	Capim elefante			Eucalipto		
	roxo (kcal/kg)	Napier (kcal/kg)	paraíso (kcal/kg)	E. urophylla (kcal/kg)	E. grandis (kcal/kg)	E. citriodora (kcal/kg)
70	2065,2	1982,7	2071,3	-----	-----	-----
65	2371,4	2288,9	2377,5	-----	-----	-----
60	2605,9	2560,5	2612,0	-----	-----	-----
55	2788,4	2736,0	2794,4	2974,3	2984,2	2912,2
50	2931,7	2873,9	2937,8	3117,6	3127,5	3055,5
45	3049,0	2986,7	3055,0	3234,9	3244,8	3172,8
40	3146,7	3080,7	3152,8	3332,6	3342,5	3270,5
35	3231,4	3162,2	3237,5	3417,3	3427,2	3355,2
30	3303,0	3231,2	3309,1	3488,9	3498,9	3426,9
25	3368,2	3293,9	3374,3	3554,1	3564,1	3492,0
20	3420,3	3344,0	3426,4	3606,2	3616,2	3544,2
15	3465,9	3387,9	3472,0	3651,8	3661,8	3589,8
10	3511,5	3431,8	3517,6	3697,4	3707,4	3635,4
5	3550,6	3469,4	3556,7	3736,5	3746,5	3674,5
0	3583,2	3500,7	3589,3	3769,1	3779,0	3707,0

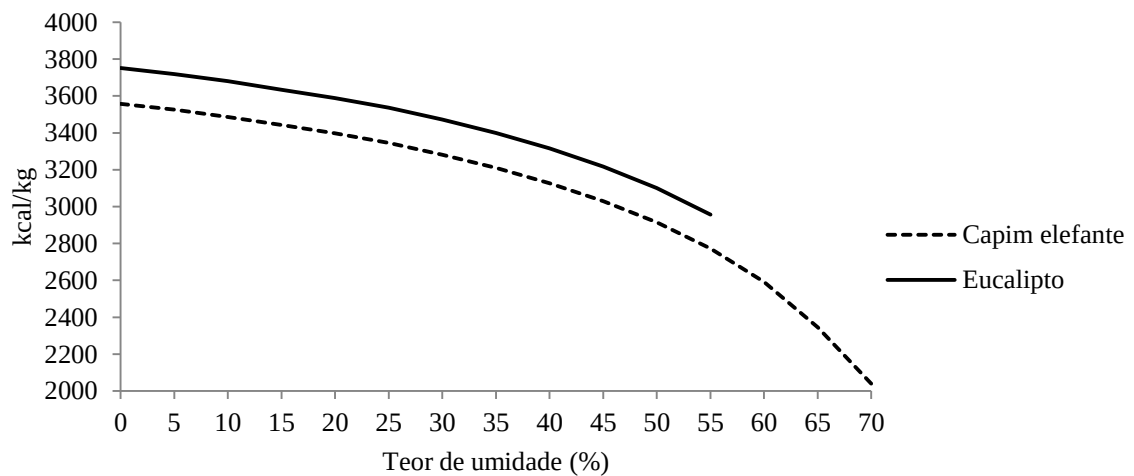


Figura 5.6 - Curvas de PCU em função da umidade

5.7. Consumo de energia para picar a biomassa

O consumo de energia para picar a biomassa foi de 1.000 ml de óleo diesel em 5 minutos de funcionamento com o motor na rotação nominal de 2000 rpm e que resultou nas seguintes quantidades de biomassa picada (Tabelas 5.13 e 5.14).

Tabela 5.13 - Consumo de diesel para picar biomassa na umidade de colheita (b.u.)

Biomassa	Teor de umidade	Consumo de diesel	Quantidade picada	Consumo relativo	
	%	ml	kg	ml/kg	kcal/kg
Capim elefante (Napier)	70,0	1.000	189,55	5,28	42,5
Eucalipto (<i>E. urophylla</i>)	55,0	1.000	142,95	7,00	56,5

Considerando para o diesel o PCI de 10.100 kcal/kg e a densidade de 0,8 kg/l, as energias consumidas para picar as biomassas foram: 42,5 kcal/kg (capim elefante) e 56,5 kcal/kg (eucalipto) de biomassa picada.

Tabela 5.14 - Consumo de energia (diesel) para picar biomassa corrigido pela umidade

Teor de umidade	Capim elefante		Eucalipto	
	Consumo de diesel	Quantidade picada	Consumo de diesel	Quantidade picada
%	kcal/kg	kg	kcal/kg	kg
70	42,62	189,55	-----	-----
65	49,73	162,49	-----	-----
60	56,83	142,18	-----	-----
55	63,94	126,38	55,29	142,95
50	71,04	113,74	61,44	131,52
45	78,14	103,40	67,58	119,56
40	85,25	94,78	73,72	109,60
35	92,35	87,49	79,87	101,17
30	99,45	81,24	86,01	93,94
25	106,56	75,83	92,15	87,68
20	113,66	71,09	98,30	82,20
15	120,77	66,91	104,44	77,36
10	127,87	63,19	110,58	73,07
5	134,97	59,86	116,73	69,22
0	144,99	56,87	125,40	65,76

5.8. Secagem das Biomassas diretamente no sol

Neste tópico serão apresentadas as condições ambientais na data da realização dos ensaios de secagem das amostras de capim elefante e eucalipto diretamente no sol (Tabelas 5.15 a 5.17).

Tabela 5.15 - Temperaturas e condições ambientais dos ensaios de secagens

Dia	Min °C	Max °C	Chuva mm	Umidade Min. %	Umidade Max. %	Vento Max km/h	Etp mm
16/12/11	14,9	28,2	0,2	51,0	99,0	24,1	4,5
17/12/11	12,8	29,6	0,2	46,0	99,0	20,9	4,6
18/12/11	18,4	26,2	19,2	63,0	98,0	22,5	3,2
19/12/11	15,8	28,6	0,2	43,0	100,0	19,3	4,5

Tabela 5.16 - Ensaios de secagem das amostras de capim elefante

Data	Período de secagem			Material Fixo		Material Movimentado	
	Tempo	Início	Fim	Inicial	Final	Inicial	Final
16/12/2011	7h30'	11:30 h	17:00 h	4,00 kg	2,40 kg	4,0 kg	1,93 kg
17/12/2011	2h50'	09:10 h	12:00 h	2,40 kg	1,87 kg	1,93 kg	1,48 kg
18/12/2011	3h15'	12:15 h	15:30 h	1,87 kg	1,52 kg	1,48 kg	1,44 kg
19/12/2011	3h40'	14:20 h	18:00 h	1,52 kg	1,48 kg	1,44 kg	1,43 kg

Tabela 5.17 - Ensaios de secagem das amostras de eucalipto

Data	Período de secagem			Material Fixo		Material Movimentado	
	Tempo	Início	Fim	Inicial	Final	Inicial	Final
16/12/2011	7h30'	11:30 h	17:00 h	4,0 kg	2,54 kg	4,0 kg	2,39 kg
17/12/2011	2h50'	09:10 h	12:00 h	2,54 kg	2,20 kg	2,39 kg	2,18 kg
18/12/2011	3h15'	12:15 h	15:30 h	2,20 kg	2,08 kg	2,18 kg	2,14 kg
19/12/2011	3h40'	14:20 h	18:00 h	2,08 kg	2,07 kg	2,14 kg	2,14 kg

5.9. Desempenho do alimentador para queima de biomassa picada

Os resultados da verificação do desempenho do alimentador para queima das biomassas picadas são apresentados nas Tabelas 5.18 e 5.19.

Tabela 5.18 - Tempo de queima capim elefante “Napier” e pressão na caldeira

Período	Tempo (minutos)	Pressão do vapor (kgf/cm²)
07:40 h	0	0
08:25 h	45	1
08:40 h	15	2
08:53 h	13	3
09:03 h	10	4
09:12 h	9	5
09:19 h	7	6
09:24 h	5	7
Total	104	-

Tempo total = 1 hora e 44 minutos.

Em todo o processo utilizou-se um total de 105,8 quilos de capim elefante “Napier” picado.

Tabela 5.19 - Tempo de queima eucalipto *E. urophylla* e pressão na caldeira

Período	Tempo (minutos)	Pressão do vapor (kgf/cm²)
07:30 h	0	0
08:05 h	35	1
08:19 h	14	2
08:29 h	10	3
08:35 h	6	4
08:41 h	6	5
08:45 h	4	6
08:49 h	4	7
Total	104	-

Tempo total = 1 hora e 19 minutos.

Em todo o processo utilizou-se um total de 91,7 quilos de eucalipto *E. urophylla* triturado.

5.10. Ganho energético da biomassa picada e seca ao sol

Verifica-se neste tópico a comparação do ganho energético obtido com a secagem ao sol das biomassas estudadas, utilizando-se o combustível com maior PCU e melhores características de queima, descontando-se a energia gasta para picar a biomassa, obtendo-se assim a estimativa do melhor rendimento energético entre as biomassas.

Para determinação do ganho energético das biomassas picadas e secas ao sol foi utilizada a fórmula que segue:

$$G_{\text{energético}} (\text{kcal/kg}_{\text{ms}}) = \text{PCU}_{\text{umidade equilíbrio}} - \text{PCU}_{\text{umidade colheita}} - C_{\text{diesel}}$$

Onde:

$G_{\text{energético}}$ – ganho energético com a secagem ($\text{kcal/kg}_{\text{ms}}$)

$\text{PCU}_{\text{umidade equilíbrio}}$ – PCU na umidade de equilíbrio da biomassa ($\text{kcal/kg}_{\text{ms}}$)

$\text{PCU}_{\text{umidade colheita}}$ – PCU na umidade de colheita após a secagem ($\text{kcal/kg}_{\text{ms}}$)

C_{diesel} – consumo de diesel para picar a biomassa ($\text{kcal/kg}_{\text{ms}}$)

Aplicando-se a fórmula para o cálculo de ganho energético obteve-se o seguinte resultado para o capim elefante “Napier”:

$$G_{\text{energético}} = 3431,8 - 1982,7 - 145,0$$

$$G_{\text{energético}} = 1304,0 (\text{kcal/kg}_{\text{ms}})$$

$$\%G_{\text{energético}} = \frac{G_{\text{energético}}}{\text{PCS}}$$

$$\%G_{\text{energético}} = \frac{1304,0 (\text{kcal/kg}_{\text{ms}})}{4230,8 (\text{kcal/kg}_{\text{ms}})} = 30,8 (\%)$$

Analisando-se o ganho energético no uso de 1,0 kg de massa seca de biomassa de capim elefante “Napier” picada e seca ao sol, (10% de umidade, ou seja, 1,11 kg de massa total) com relação à recém-colhida (com 70% de umidade, ou seja, 3,33 kg de massa total), verificou-se um ganho de 30,8% em relação ao seu PCS.

Em relação ao eucalipto *E. urophylla* o resultado do ganho energético foi:

$$G_{\text{energético}} = 3697,4 - 2974,3 - 125,4$$

$$G_{\text{energético}} = 597,7 \text{ (kcal/kg}_{\text{ms}}\text{)}$$

$$\%G_{\text{energético}} = \frac{G_{\text{energético}}}{\text{PCS}}$$

$$\%G_{\text{energético}} = \frac{597,7 \text{ (kcal/kg}_{\text{ms}}\text{)}}{4637,5 \text{ (kcal/kg}_{\text{ms}}\text{)}} = 12,8 \text{ (\%)}$$

Analisando-se o ganho energético no uso da biomassa de eucalipto *E. urophylla* picada e seca ao sol, (10% de umidade, ou seja, 1,11 kg de massa total) com relação a recém-colhida (com 55% de umidade, ou seja, 2,22 kg de massa total), verificou-se um ganho de 12,8% em relação ao seu PCS.

6. CONCLUSÕES

O trabalho testou uma solução para a utilização do capim elefante como biomassa para geração de energia da forma mais eficiente, principalmente na forma de biomassa picada e seca ao sol, que apresentou facilidade: de manuseio, de armazenamento, de transporte e de alimentação automática para fornalha de caldeiras e de queima e com resultados comparáveis com o eucalipto, nas mesmas condições.

O benefício obtido de trabalhar com a biomassa picada é a correspondente facilidade de secagem ao sol da biomassa recém-colhida de eucalipto e de capim elefante que compensou o consumo de energia para picar e também resultou em uma elevada taxa de secagem.

Os resultados medidos para o PCS - Poder Calorífico Superior mostrou que o eucalipto apresentou potencial energético superior ao do capim elefante de 9,61%. Em relação aos valores absolutos tem-se: 4.637,57 kcal/kg para o eucalipto e 4.230,83 kcal/kg para o capim elefante. A análise elementar que determinou os componentes químicos elementares (Carbono, Hidrogênio, Oxigênio, Nitrogênio e Enxofre), apresentou teores de oxigênio e de enxofre maiores para o capim elefante e menores de carbono, o justifica seu menor PCS.

Comparando-se todas as etapas da colheita até a queima no presente estudo têm-se as seguintes considerações: - o corte do capim elefante foi mais facilmente executado quando comparado com o corte do eucalipto, pois foi realizado manualmente, enquanto que para o corte do eucalipto utilizou-se de um motosserra. Em relação à trituração, ao se utilizar o mesmo triturador para uma mesma quantidade de combustível, dentro de uma igualdade de tempo, foi obtido 32,6% a mais de biomassa de capim elefante com 70% de umidade do que de eucalipto com 55% de umidade, porém quando relacionado com a massa seca, o consumo para picar o capim elefante foi 15,6% maior do que o consumo em kcal/kg para picar o eucalipto.

Considerando para o diesel o PCI de 10.100 kcal/kg e a densidade de 0,8 kg/l, as energias consumidas para picar as biomassas foram: 42,5 kcal/kg (capim elefante) e 56,5 kcal/kg (eucalipto) de biomassa picada.

O ganho energético final do capim elefante foi 18% superior ao ganho energético final do eucalipto, obtidos a partir da diferença entre o PCU da biomassa seca, na colheita e o consumo de diesel, dividida pelo PCS.

Os ensaios de alimentação e queima de biomassa picada e seca ao sol, comprovaram sua facilidade de manuseio e valor energético, com uma cultivar de capim elefante e uma espécie de eucalipto. Diante dos resultados apresentados pode-se verificar a viabilidade técnica de utilizar a biomassa do capim elefante picada e seca ao sol, para ser utilizada em caldeira com alimentação automática de biomassa para fornalha.

7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Ao final deste trabalho sugere-se que sejam ampliadas as variáveis estudadas: teor de cinza resultante da queima, visto que esta propriedade é importante por questões técnicas, como determinar o tipo de recolhimento e tratamento dos resíduos; medição de excesso de ar, para identificação da melhor taxa de combustão; cálculo da eficiência da caldeira em relação a todas as perdas devido à umidade no ar (H_2O), perdas devido ao monóxido de carbono (CO), perdas por combustível não queimado, cinzas volantes (Carbono), perdas por combustível não queimado, cinzas (Carbono), e perdas devido a superfícies externa da caldeira (radiação, convecção e outras não consideradas).

REFERÊNCIAS

ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2011**: ano base 2010 /ABRAF. Brasília, 2011. Disponível em: <<http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF11/ABRAF11-BR.pdf>>. Acesso em: 30 de out. 2011.

AFONSO JÚNIOR, P. C.; OLIVEIRA FILHO, D.; COSTA, D. R. Viabilidade econômica de produção de lenha de eucalipto para secagem de produtos agrícolas. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 28-35, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v26n1/30093.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2012.

ALCÂNTARA, P. B.; BUFARAH, G. **Plantas forrageiras**: gramíneas e leguminosas. 2. ed. São Paulo: Nobel, 1999.

ALEXANDRA, P. P.; MARIA, V. S.; BOGDAN, V. F. **Aspects regarding the wood processing in high frequency electromagnetic field**. 2010. Disponível em: <http://protmed.uoradea.ro/facultate/anale/ecotox_zooteh_ind_alim/2010/ipa/113%20Palade%20Paula.pdf>. Acesso em: 12 de mar. 2012.

ALVIM FILHO, A. C. **Aspectos Tecnológicos das Fontes de Energia Renováveis (Biomassa)**. 2009. Disponível em: <http://www.ariae.org/download/cursos/VI_Curso_Ariae/pdf93.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2012.

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**/Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília: ANEEL, 2002. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/livro_atlas.pdf>. Acesso em: 24 de nov. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Normas técnicas NBR 8633. Brasília: 1984.

BOTREL, Milton de Andrade et al. . Potencial forrageiro de novos clones de capim elefante. **R. Bras. Zootec.**, Viçosa, v. 29, n. 2, 2000 . Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-35982000000200003&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 26 nov. 2011.

BRACELPA. Associação Brasileira de Celulose e Papel. **Dados do setor**. 2009. Disponível em: <www.bracelpa.org.br/bra/estatisticas/pdf/booklet/booklet.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2012.

BRAND, Martha Andréia. **Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem**. 2007. Disponível em: <<http://dspace.c3sl.ufpr.br/dspace/bitstream/handle/1884/10397/Tese-vers%20o%20final%20%20Martha%20Andreia%20Brand.pdf;jsessionid=FFC9BB27099068192978984D9CFA603?sequence=1>>. Acesso em: 27 jan. 2012.

BRAND, Martha Andréia. **Fontes de biomassa para a geração de energia**. 2008. Disponível em: <<http://www.solumad.com.br/artigos/201011171818441.pdf>>. Acesso em: 27 jan. 2012

BRASIL. **Lei 12.490**, de 16 de setembro de 2011. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2011/Lei/L12490.htm>. Acesso em: 12 de mar. 2012.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia. **Circular Técnica**, Piracicaba, n. 52, 1979. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/ctecnica/nr052.pdf>>. Acesso em: 27 jan. 2012.

BUREAU OF ENERGY EFFICIENCY. **Energy performance assessment of boilers**. Índia. 2010. Disponível em: <<http://www.em-ea.org/Guide%20Books/book-4/4.1%20Boiler.pdf>> . Acesso em: 19 jul. 2012.

CIOLKOSZ, D. **Characteristics of biomass as a heating fuel**. 2010a. Disponível em: <<http://pubs.cas.psu.edu/FreePubs/PDFs/ub043.pdf>> Acesso em: 16 de mar. 2012.

CIOLKOSZ, D. **An introduction to biomass heating**. 2010b. Disponível em: <http://www.bioenergy.psu.edu/pdf_files/Fact%20Sheet%20IntroBiomassHeat.pdf>. Acesso em: 10 de abr. 2012.

CONSELHO DE INFORMAÇÕES SOBRE BIOTECNOLOGIA. **Produtividade: Brasil x mundo**. Disponível em: <<http://www.topclone.com.br/?pagina=novidades&id=20>> Acesso em: 14 abr. 2012.

DALL'AGNOL, M. Produção de forragem de capim elefante sob clima frio: curva de crescimento e valor nutritivo. **R. Bras. Zootec.** v. 33 n. 5, 2004. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-35982004000500002> Acesso em: 14 abr. 2012.

EL MAHALLAWY, F.; EL-DIN HABIK, S. **Fundamentals and technology of combustion**. United Kingdom: Elsevier Science, 2002. Disponível em: <http://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=d-4GZ6frBEUC&oi=fnd&pg=PP2&dq=Fundamentals+and+technology+of+combustion.+pdf&ots=32LZT7f9Px&sig=A9udaRTVQkorvFL28cuc_82aTvE#v=onepage&q=Fundamentals%20and%20technology%20of%20combustion.%20pdf&f=false>. Acesso em: 20 de fev. 2012.

FEITOSA NETTO, G. B. et al. **Caracterização energética de biomassas amazônicas**. In: **Proceedings of the 6º Encontro de Energia no Meio Rural**. Campinas. 2006. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000100035&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 10 de abr. 2012.

FERRARI JUNIOR, E.; Paulino, V. T.; POSSENTI, R. A.; LUCENAS, T. L. Aditivos em silagem de capim elefante paraíso (*Pennisetum hybridum* cv. Paraíso). **Arch. Zootec.** v.58, n. 222, p. 185-194, 2009. Disponível em: <<http://scielo.isciii.es/pdf/azoo/v58n222/art3.pdf>>. Acesso em: 28 de mar. de 2012.

GOMEZ, E. O. et al. Projeto de pirólise rápida contínua de biomassa com ar em reator de leito fluidizado atmosférico. In: **Proceedings of the 3º Encontro de Energia no Meio Rural**. Campinas 2000. Disponível em:

<http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000200020&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 10 de abr. 2012.

IBGE. **Censo Agropecuário 1970/2006**. Disponível em:

<<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/2006/default.shtm>>. Acesso em: 10 fev. 2012.

KIRCHHOF, G.; ECKERT, B.; STOFFELS, M.; BALDANI, J. I.; REIS, V. M.; HARTMANN, A. *Herbaspirillum frisingens* esp. nov., a new nitrogen- fixing bacterial species that occurs in C4-fibre plants. **International journal of systematic and evolutionary microbiology**, v. 51, p. 157-68, 2001. Disponível em:

<<http://ijs.sgmjournals.org/content/51/1/157.full.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2012.

LESSA, J. H. P. **Análise técnico-econômica do processo btl (biomass-to-liquid) pela síntese fischer-tropsch no brasil**. 2008. Disponível em:

<https://docs.google.com/viewer?a=v&q=cache:Dxd9-Z0p7rcJ:www.eq.ufrj.br/prh13/download/%3Fprh13-projeto-final-juliana-haas-pecanha-lessa.pdf+lessa+biomassa+2008&hl=pt-BR&gl=br&pid=bl&srcid=ADGEESgHXLbYJ1ONEZCDH_ciPRQhltzSgM70AzqjFTbt-vI0JO8AcSK5N-ryPwz9X1aqj-4MK0FIvjNpTwIVkSxsPFRwmOUyRjwmdGvuCsUW1ZXDk0mVLPYxXFqcT3hZGmZWSSqNiyhe&sig=AHIEtbQH260VoH4Tnr_Q9QJ2VpaCdvm--g>. Acesso em: 12 de jun. 2011.

LIMA, E. A. L. **Alternativa para estimar o preço da madeira para energia**. Comunicado técnico 260. Colombo: Embrapa Florestas, 2010.

LOPES, B. A. **O capim elefante**. 2004. Disponível em:

<<http://www.forragicultura.com.br/arquivos/capimelefanteBruna.pdf>>. Acesso em: 28 de mar. 2012.

LOPES, R. S.; NASCIMENTO JÚNIOR, D. **Pastagem de capim elefante: uma alternativa viável**. 2001. Disponível em:

<<http://www.forragicultura.com.br/arquivos/pastagemcapimelefantealternativaviavel.pdf>>. Acesso em: 25 de fev. 2012.

LORENZI, H. **Plantas daninhas do Brasil**: terrestres, aquáticas, parasitas e tóxicas, 3 ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2000.

LORENZI, H.; SOUZA, H. M.; TORRES, M. A. V.; BACHER, L. B. **Árvores exóticas no Brasil**: madeiras, ornamentais e aromáticas. Nova Odessa: Instituto Plantarum, 2003.

MACHADO, A. N. et al. Efeito do espaçamento de plantio na produção e qualidade de forragem capim elefante cv. Três Rios. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.2, n.1, p. 57-62, 1996. Disponível em: <<http://www.ufpel.tche.br/faem/agrociencia/v2n1/artigo10.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2012.

MACOON, B.; SOLLENBERGER, L. E.; MOORE, J. E. Forages and pasture management - Defoliation effects on persistence and productivity of four pennisetum spp. Genotypes, **Agronomy Journal**, v. 94, n. 3, p. 541-548, 2002. Disponível em: <<https://www.soils.org/publications/aj/abstracts/94/3/541>>. Acesso em: 18 set. 2011.

MAZZARELLA, V. **Meio Ambiente Técnico**. Disponível em: <<http://meioambientetecnico.blogspot.com.br/2011/12/capim-elefante-napier.html>>. Acesso em: 14 abr. 2012.

MORAIS, R. F.; SOUZA, B. J.; LEITE, J. M.; SOARES, L. H. B.; ALVES, B. J. R. R.; BODDEY, M.; URQUIAGA, S. Elephant grass genotypes for bioenergy production by direct biomass combustion. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 44, n. 2, p. 133-140, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=s0100204x2009000200004&script=sci_arttext>. Acesso em: 23 jun. 2012.

MOTTA, D.; SILVA, W. F.; DINIZ, E. N. **Análise da viabilidade sustentável e econômica numa plantação de eucalipto. VII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. 2010.** Disponível em: <http://www.aedb.br/seget/artigos10/261_ANALISE.pdf>. Acesso em: 29 de nov. 2011.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

NOGUEIRA, L. A. H.; NOGUEIRA, F. J. H.; ROCHA, C. R. **Eficiência energética no uso de vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABiXgAI/manual-vapor>>. Acesso em: 23 nov. 2010.

NUSSIO, L. G.; LIMA, L. G.; MATTOS, W. S. Produção de volumosos para o inverno. In: Simpósio de Nutrição Animal. Bovinos Leiteiros. 1999, **Anais...** Espírito Santo do Pinhal: Fundação Pinhalense de Ensino - CREUPI, 1999.

OLIVEIRA NETO, S. N. et al. Produção e distribuição de biomassa em eucalyptus camaldulensis Dehn. em reposta à adubação e ao espaçamento. **Revista árvore**, Viçosa, v. 27, n. 1, p. 15-23, 2003. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rarv/v27n1/15917.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2010.

ORMOND, José Geraldo Pacheco. **Glossário de termos usados em atividades agropecuárias, florestais e ciências ambientais**. Rio de Janeiro: BNDES, 2006. Disponível em: <http://www.cartilhasecia.com.br/cartilhas/0102-glossario_ambiental_bndes.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2012.

PAIVA, H. N. et al. **Cultivo de eucalipto em propriedades rurais**. Viçosa: Aprenda Fácil Editora, 2001.

PANIAGO et al. **Caracterização da cadeia produtiva do capim elefante para geração de energia**. 2011. Disponível em: <<http://clinicabelezadocorpo.com.br/wpcbem/wpcontent/uploads/2012/01/Caracterizac-o-da-Cadeia-Produtiva-do-Capim-elefante-para-Geracao-de-Energia.pdf>> Acesso em: 23 jun. 2012.

PAULINO, V. T., LUCENAS, T. L., POSSENTI, R. A. **Capim elefante cv. Paraíso (*Pennisetum hybridum*): produção de matéria seca, composição química e biológica em diferentes alturas de corte.** Disponível em:

<www.abz.org.br/files.php?file=documentos/Capim...286853466.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2012.

PEREIRA, J. A. et al. Composição química da silagem de capim elefante cv. Napier (*Pennisetum purpureum*, Schum) com diferentes níveis de leucena cv. Cunningham (*Leucaena leucocephala* (Lam) de Wit). **Rev. Cient. Prod. Anim.**, v. 1, n. 2, p.192-2004, 1999. Disponível em: <<http://www.ojs.ufpi.br/index.php/rcpa/article/view/28>> . Acesso em: 25 de fev. 2012.

PRATTI, R. L. **Formação de povoamentos florestais com utilização de mudas clonais.** 2010. 34 f. Monografia (Pós-Graduação em Gestão Florestal) - Programa de Educação Continuada em Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, 2010. Disponível em: <http://www.pecca.com.br/pos/florestal/tccs/rafael_luis.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2012.

QUEIROZ FILHO, J. L.; SILVA, D. S.; NASCIMENTO, I. S. Produção de matéria seca e qualidade do capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) cultivar Roxo em diferentes idades de corte. **R. Bras. Zootec.**, Viçosa, v. 29, n. 1. 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S151635982000000100010&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 25 jul.2011.

QUÉNO, L. M. R. et al. Custo de produção das biomassas de eucalipto e capim elefante para energia. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 3, p. 417-426, 2011. Disponível em: <<http://www.dcf.ufra.br/cerne/administracao/publicacoes/m583v17n3o17.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2012.

QUÉNO, L. R. M. **Viabilidade econômica da produção de biomassa de eucalipto e capim elefante para energia.** 2009. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Floresta) - Programa de Pós-Graduação da Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Florestal, Brasília, 2009. Disponível em: <<http://repositorio.bce.unb.br/handle/10482/7547>>. Acesso em: 27 de jan. 2012.

QUESADA, D. M. et al. **Parâmetros qualitativos de genótipos de capim elefante (*Pennisetum purpureum* schum.) estudados para a produção de energia através da biomassa.** Circular Técnica 8. EMBRAPA. Rio de Janeiro, nov., 2004. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/627821/1/cit008.pdf>>. Acesso em: 10 de abr. 2012.

QUIRINO, W. F. et al. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. **Biomassa e Energia**. v. 1, n.2, p. 173-182, 2004. Disponível em: <http://www.renabio.org.br/arquivos/p_poder_lignocelulosicos_11107.pdf>. Acesso em: 30 de jun. 2011.

RAGLAND, K.W.; AERTS, D. J.; BAKER, A. J. Properties of wood for combustion analysis. **Bioresource technology**. v. 37, p. 161-168, 1991. Disponível em: <http://marioloureiro.net/ciencia/ignicao_vegt/ragla91a.pdf>. Acesso em 11 de abr. 2011.

REZENDE, A. V. et al. Efeito da mistura da planta de girassol (*Helianthus annuus* L) durante a ensilagem do capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) no valor nutritivo da silagem. **Revista Brasileira de Zootécnica**, v. 31, n. 5, p. 1938-1943, 2002. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbz/v31n5/a09v31n5.pdf>>. Acesso em: 03 abr. 2011.

RIBEIRO, M. Y. H. **Consumo voluntário e digestibilidade aparente da silagem de capim elefante (*pennisetum purpureum* schum.) em diferentes idades de corte, em ovinos**. 2011. 56 f. Dissertação (Mestrado em Nutrição Animal) – Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Veterinária, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <http://dspace.lcc.ufmg.br/dspace/bitstream/1843/BUOS-8M4FAT/1/disserta__o_final_novo_formato.pdf>. Acesso em: 25 de fev. 2012.

RODRIGUEZ, L. C. E.; BUENO, A. R. S; RODRIGUES, F. Rotações de eucaliptos mais longas: Análise volumétrica e econômica. **Scientia Forestalis**, n. 51, p. 15-28, jun. 1997. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr51/cap2.pdf>>. Acesso em: 14 abr. 2012.

SAMSON, R; MANI, S; BODDEY, R; SOKHANSANJ, S; QUESADA, D; URQUIAGA, S; REIS, V; HO LEM, C. The potencial of C₄ perennial grasses for developing a global BIOHEAT industry .**Critical reviews in plant sciences**. v. 24, p. 465-495, 2005. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07352680500316508#preview>>. Acesso 23 de jun. de 2012.

SANCHES, C. G. **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Campinas: Alínea e Átomo, 2010.

SANTOS, E. A.; SILVA, D. S.; QUEIROZ FILHO, J. L. Aspectos produtivos do capim elefante (*Pennisetum purpureum*, schum.) cv. Roxo no brejo paraibano. **Revista brasileira de zootecnia**, v. 30, n. 1, p. 31-36, 2001. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-35982001000100006&script=sci_>. Acesso em: 30 de fev. 2011.

SANTOS, S. **Avaliação da silagem de capim elefante com frações de algaroba**. 2011. 78 f. Dissertação (Mestrado em Produção de Ruminantes) - Programa de Pós-Graduação da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Departamento de Zootecnia, Itapetinga, 2011. Disponível em: <<http://www.uesb.br/ppz/defesas/2011/mestrado/Suely.pdf>> Acesso em: 14 abr. 2012.

SEYE, O. et al. Queima direta de gramínea Projeto Integrado de Biomassa - PIB. In: **Proceedings of the 3º Encontro de Energia no Meio Rural**. Campinas. 2000. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000200001&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 10 de abr. 2012.

SILVA, D. F. R. **Efeito do envelhecimento da biomassa sobre as características do biocombustível**. 2009. 240 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) - Universidade de Aveiro, Portugal 2009. Disponível em: <<http://biblioteca.sinbad.ua.pt/Teses/2010000242>>. Acesso em: 10 de abr. 2012.

SKERMAN, P. J.; RIVEROS, F. **Gramíneas tropicais**. Roma: FAO, 1992.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3 ed. Porto Alegre: Artmed, 2004.

TIAGO FILHO, G. L. et al.. **Tecnologias de energias renováveis**: sistemas híbridos, pequenos aproveitamentos hidroelétricos, combustão e gasificação de biomassa sólida, biodiesel e óleo vegetal in natura. Brasília: Ministério de Minas e Energia. 2008. Disponível em:
<http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/downloads/Solucoes_Energeticas_para__Amazonia_Sintese.pdf>. Acesso em: 12 de mar. 2012.

VASCONCELOS, S. H. L et al. Efeito da adição de rama de meloeiro (*Cucumis melo* L.) sobre a composição químico-bromatológica da silagem de capim elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.), cv. Cameron. In: Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, 38, 2001. Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: SBZ, 2001. Trabalho 0427. CD ROM.

VILELA, D.; PAIVA, P. C. A.; LIMA, J. A. et al. Morfogênese e acúmulo de forragem em pastagem de *Cynodondactylon* cv. coastcross em diferentes estações de crescimento. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 34, n. 6, p. 1891-1896, 2005. Disponível em:
<http://www.ufpi.br/subsiteFiles/ciencianimal/arquivos/files/DM_GSA.pdf>. Acesso em: 28 de fev. 2012.

VILELA, H. **Capim elefante Paraíso na produção de energia**. 2008. Disponível em:
<http://www.agronomia.com.br/conteudo/artigos/artigos_capim_elefante_paraíso_producao_energia.html>. Acesso em: 25 de fev. 2012.

VILLA NOVA, Nilson Augusto et al . Método alternativo para cálculo da temperatura base de gramíneas forrageiras. **Cienc. Rural**, Santa Maria,v. 37, n. 2, 2007. Disponível em:
<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782007000200039&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 28 de fev. 2012.

XAVIER, A. C.; SOARES, J. V.; ALMEIDA, A. C. Variação do índice de área foliar em clones de eucalipto ao longo de seu ciclo de crescimento. **Revista árvore**, Viçosa, v. 26, n.4, p. 421-427, 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622002000400004&script=sci_arttext>. Acesso em: 14 abr. 2012.