

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**RESÍDUOS DA EXPLORAÇÃO FLORESTAL DE *Eucalyptus grandis* HILL
EX MAIDEN PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

SANDRA REGINA TARTAGLIA BAUER

Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP - Campus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Agronomia - Área de
Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU - SP

Janeiro - 2001

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
CAMPUS DE BOTUCATU

**RESÍDUOS DA EXPLORAÇÃO FLORESTAL DE *Eucalyptus grandis* HILL
EX MAIDEN PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

SANDRA REGINA TARTAGLIA BAUER

Orientador: Prof. Dr. Luiz Gonzaga de Souza

**Dissertação apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP - Campus
de Botucatu, para obtenção do título de
Mestre em Agronomia - Área de
Concentração em Energia na Agricultura.**

BOTUCATU - SP

Abril - 2001

• FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO
DIRETORIA DE SERVIÇO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - FCA
UNESP - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

Bauer, Fernando César
B344i Influência da assistência de ar na deposição e perdas em pulverizações na cultura da soja (*Glycine max* (L.) Merrill / Fernando César Bauer. -- Botucatu, 1999
viii, 65 f. : il. color. (algumas p&b) ; 28 cm
Dissertação (mestrado) -- Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 1999
Orientador: Carlos Gilberto Raetano
Bibliografia: f. 45-50
1. Pulverizador de barra - Deposição - Assistência de ar 2. Pulverizador de barra - Perdas - Assistência de ar 3. Pulverizador de barra - Aplicação de defensivo - Perda I. Título
CDD(21) 631.3

Palavras-chave: Assistência de ar; Pulverizador de barra; Deposição; Deriva; Soja; *Glycine max*; Perdas.

OFERECIMENTO

Ao meu marido César,
pelo amor, generosidade, incentivo e apoio

Às minhas filhas Beatriz e Juliana
Que chegaram durante o Curso
e trouxeram alegria e a esperança de um futuro melhor

Aos meus pais
Pelo incentivo e amor

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de sabedoria, força e humildade.

Ao Prof. Dr. Luiz Gonzaga de Souza pela orientação e paciência transmitida durante o desenvolvimento desse trabalho.

A Profa. Dra. Maria Aparecida Mourão Brasil pela atenção, boa vontade e ensinamentos transmitidos no decorrer desse trabalho.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Rural – FCA – UNESP – CAMPUS BOTUCATU, em especial aos Professores Zacarias Xavier de Barros e Nelson Miguel Teixeira pela amizade e compreensão.

A Duratex S/A pela colaboração, em especial; ao Engenheiro Florestal Luiz Carlos Baccarin e ao Engenheiro Mecânico Vantuir Baptista Pereira Junior.

A Profa. Maria Isabel Franchi Vasconcelos Gomes do Departamento de Gestão e Tecnologia Agroindustrial.

A Profa. Carmen Regina Marcati do Departamento de Recursos Naturais - Ciências Florestais pela atenção, disponibilidade e boa vontade.

A CAPES – Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior pela bolsa de estudos concedida durante o curso.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE QUADROS	V
LISTA DE FIGURAS	VI
1 – RESUMO	01
2 – SUMMARY	03
3 – INTRODUÇÃO	05
4 – REVISÃO DE LITERATURA	09
5 – MATERIAL E MÉTODOS	18
5.1 – MATERIAL	19
5.1.1 – Localização e descrição da área	19
5.1.2 – A cultura	21
5.1.3 – Equipamentos	22
5.1.4 – Produtos	22
5.2 – MÉTODOS	23
5.2.1 – Preparo do material para análise	27
5.2.2 – Teor de umidade	27
5.2.3 – Análise imediata	28
5.2.4 – Densidade básica da madeira e da casca	28
5.2.5 – Poder calorífico superior	29
5.2.6 – Volume total de biomassa residual	31
5.2.7 – Vapor obtenível	32
5.2.8 – Geração de vapor	32
6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
6.1 – Teor de umidade	36
6.2 – Análise imediata	37
6.3 – Densidade básica da madeira	38
6.4 – Poder calorífico superior	39
6.5 – Granulometria	40
6.6 – Volume total de biomassa	41
6.7 – Vapor obtenível	44
6.8 – Geração de energia	45
7 – CONCLUSÕES	48
8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

LISTA DE QUADROS

Quadro	Página
1 Principais medidas e dimensionamento do material coletado na Fazenda Morro do Ouro. Botucatu, SP. 2000.....	35
2 Peso (g) e teor médio de umidade (%) das 4 classes diametrais. Botucatu, SP. 2000.	36
3 Valores da análise imediata obtida com as 4 classes diametrais de material residual coletados na Quadra 48 da Fazenda Morro do Ouro.....	37
4 Densidade básica (g/cm ³) das classes diametrais de resíduos de exploração de <i>Eucalyptus grandis</i> cultivados no Município de Botucatu/SP.....	38
5 Poder calorífico superior (kcal/kg) das 4 classes de material obtido de 3 (base peso úmido) avaliações distintas de <i>Eucalyptus grandis</i> cultivado no Município de Botucatu/SP.....	39
6 Granulometria obtida das amostras compostas	40
7 Volume (m ³) e peso (kg) de cada uma das amostras coletadas na Fazenda Morro do Ouro.....	42
8 Estimativa de volume (m ³) e peso (kg) de resíduos florestais/ha baseado nas médias das amostras coletadas na Fazenda Morro do Ouro.....	43
9 Calor necessário para produzir um quilo de vapor (temp da água de alimentação = a 90°C)	45

LISTA DE FIGURAS

Figura		Pagina
1	Fluxograma do sistema de cogeração em indústria de processamento de cana-de-açúcar	16
2	Croquis da Fazenda Morro do Ouro, localizada no Município de Botucatu/SP, com destaque para a Quadra 48, local onde foi coletado o material utilizado nas avaliações	20
3	Máquina equipada com cabeçote “Sling Shot” cortando as árvores em toros de 6 metros de comprimento.....	25
4	“Forwarder” transportando e empilhando a madeira ao longo da estrada, para posterior transporte para a indústria	25
5	Aspecto geral de área recém cortada, com a madeira empilhada ao longo de toda a área de colheita e os resíduos entre as pilhas.....	26
6	Área amostral no momento exato da coleta do material, onde já se fez o transporte de toda a madeira restando somente o resíduo.....	26
7	Aspecto da bomba calorimétrica e da amostra dentro do cadinho, pronta para análise.....	30

1 – RESUMO

O presente trabalho de pesquisa tem por objetivo estimar a composição dos resíduos e o volume de biomassa disponível para fins energéticos da exploração de *Eucalyptus grandis* em uma indústria de painéis de fibra de madeira (hardboard) localizada no Município de Botucatu, Estado de São Paulo. Para isso foram coletadas amostras no campo, referentes ao resíduo deixado por quinze árvores de *Eucalyptus* na área correspondente a um hectare, sendo estimados nas amostras o poder calorífico superior (PCS), teor de umidade, teor de cinzas, densidade básica e volume total médio da biomassa residual. Foi estimado, ainda, o vapor obtenível por quilograma de madeira queimada para avaliação preliminar de energia elétrica a ser produzida por tonelada de biomassa (kWh/tb), fornecendo subsídios para estudos futuros de viabilidade econômica de um projeto de cogeração ou geração própria de energia elétrica. Os resultados obtidos mostram os valores médios de poder calorífico superior da biomassa coletado no campo: 4001, 3907, 3845, e 3704, kcal/kg para amostras (ramos) de até

1 cm de diâmetro, de 1 a 3 cm de diâmetro, acima de 3 cm de diâmetro e casca, respectivamente. O volume total médio de biomassa residual produzido foi de 16,167 m³/ha com um peso estimado de 8375 kg/ha. Os resultados obtidos para a quantidade de vapor obtida por quilograma de madeira queimada (fator f) e o peso total de vapor fornecido pela biomassa residual foi da ordem de 36.599 kg vapor/ ha.

WASTE OF *Eucalyptus grandis* HILL EX MAIDEN EXPLORATION OF OWN ELECTRICAL ENERGY GENERATION. Botucatu, 2001. 52p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: SANDRA REGINA TARTAGLIA BAUER

Adviser: Prof. Dr. LUIZ GONZAGA DE SOUZA

2 – SUMMARY

The present research aimed to determine the waste composition and the biomass volume available to energetic exploitation of *Eucalyptus grandis* in a hardboard industry located in Botucatu, São Paulo State. Field samples were collected in the waste of fifteen *Eucalyptus grandis* trees, in a area equivalent of one hectare. In each sample were evaluated the heat combustion , the humidity content, ash content, basic density and the total mean volume of waste biomass. It was also analyzed achieved steam per kilo of burned wood to a initial evaluation of the electrical energy to be produced by each ton of biomass (kW/tb), offering subsidies to future economic availability studies of an own electrical energy generation project. The obtained data showed that the heat combustion of the wood varied

from 4021, 3907, 3845 and 3704 kcal/kg to samples (branches) of one centimeter, from one to three centimeters and to more than three centimeters of diameter and bark, respectively. The total mean volume of the waste biomass produced was 16.167 m³/ha with an estimated weight of 8375 kg/ha. The results obtained to the steam quantity obtained per each kilo of burned wood (f) and the total steam weight given by the waste biomass were 36.599,49 kg steam/ha.

Keywords: *Eucalyptus grandis*, forest residues, cogeneration, energy.

3 - INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da humanidade dependerá de sua capacidade de gerar energia, seja pela descoberta de novas fontes, seja pelo uso racional mais eficiente das atualmente existentes. Nesse contexto, destacam-se as fontes de energia renováveis e, dentre essas, a biomassa.

A crise energética, que atingiu o país na década de 70, fez com que a agroindústria brasileira se preocupasse cada vez mais com a geração própria de eletricidade. Nesse aspecto o setor sucroalcooleiro foi o que mais avanços alcançou, pois muitas indústrias de processamento de cana-de-açúcar que geravam normalmente energia elétrica para o seu próprio consumo, total ou parcialmente, atingiram em poucos anos a auto-suficiência.

Assim as indústrias de processamento de cana-de-açúcar evoluíram de simples compradoras de energia elétrica à geradoras de sua própria energia em sistema de cogeração.

O progresso no sistema de cogeração evoluiu de tal modo que algumas usinas e destilarias atingiram não apenas a auto-suficiência, como também passaram a gerar excedentes de energia elétrica devendo esses excedentes serem exportados às concessionárias.

É digno de nota o fato das usinas de açúcar e destilarias de álcool serem capazes de gerar energia elétrica usando o bagaço como combustível justamente no período de estiagem quando as hidrelétricas diminuem sua capacidade de operação em decorrência do déficit hídrico.

Além do setor sucroalcooleiro, outro segmento agroindustrial que apresenta possibilidades de gerar eletricidade em sistema de cogeração é o de processamento de madeira, que possui biomassa disponível para geração de energia térmica.

A biomassa, no Brasil, constituída em grande parte pela madeira, representou 19,71% de todos os energéticos primários consumidos em 1998 (Brasil, 1999). Desse total 9,06% foram compostos pela lenha, ou seja, $6,9 \times 10^7$ toneladas de madeira foram utilizadas para geração de calor. Do total da lenha consumida $2,7 \times 10^7$ toneladas o foram de forma indireta, principalmente na fabricação de carvão vegetal, e $4,2 \times 10^7$ toneladas de forma direta. Goldemberg (1998) afirma que a lenha é, de fato, a fonte de energia dominante nas áreas rurais.

No Brasil, país que atualmente importa parte considerável do petróleo consumido e tem graves problemas no balanço de pagamento, a biomassa de origem florestal, em virtude das tecnologias de produção disponíveis no país, após a Lei nº. 5.106 que instituiu

os incentivos fiscais para o florestamento e reflorestamento, apresenta maior probabilidade de aumentar a sua oferta e conseqüentemente a sua participação na matriz energética brasileira.

Entretanto, dentre os componentes da biomassa florestal, os resíduos florestais, apesar de representarem grande potencial para o futuro, ainda não são plenamente utilizados. Anualmente, milhares de toneladas de resíduos e árvores pequenas não comerciais, cortadas durante a exploração, são deixadas para se decompor ou queimadas no próprio terreno. Estes resíduos, se devidamente utilizados, através de tecnologia atualmente disponível, poderiam representar uma significativa contribuição às necessidades energéticas para a indústria e para o país.

Dentre as indústrias de processamento de madeira destacam-se as indústrias de fabricação de painéis de fibra de madeira (hardboard, particle board e MDF) que tendo disponível como biomassa, cascas de toras de eucalipto, folhas e gravetos depositados no campo possuem combustível necessário para atingir a auto-suficiência em energia elétrica, sem depender de outros combustíveis de alto custo, como carvão mineral ou óleo combustível.

Outra informação digna de nota é o fato de que as indústrias de fabricação de painéis de fibra de madeira, não sendo produtores sazonais, apresentam condições de gerar eletricidade o ano todo sendo auto-produtores firmes, ao contrário das indústrias de processamento de cana-de-açúcar cuja geração se restringe ao período de safra ou seja, de disponibilidade de bagaço.

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo estimar o poder calorífico superior(PCS), a composição e o volume de biomassa disponível em uma indústria de fabricação de painéis de fibra de madeira (hardboard), localizada no município de Botucatu, Estado de São Paulo.

Os dados obtidos serão utilizados para o cálculo do vapor obténível e para uma avaliação preliminar da energia a ser produzida por tonelada de biomassa (kWh/tb), fornecendo subsídios para futuros estudos de viabilidade econômica de um projeto de geração de energia elétrica.

4 – REVISÃO DE LITERATURA

O crescimento no consumo de energia se fez de maneira lenta até o século XIX, baseado no uso da lenha e de seus derivados. O uso do carvão mineral impulsionou a indústria e se manteve ativo até o aparecimento de outro recurso fóssil – o petróleo, com concentração energética ainda maior, abundante na natureza e de exploração relativamente fácil, dando início a segunda revolução industrial. A partir dos anos 40 a demanda no consumo de energia teve crescimento exponencial; estabelecendo uma distribuição desigual, com 90% da energia mundial sendo consumida por 30% da população (Acioli, 1994), chegando a um consumo *per capita* nos Estados Unidos da América dez vezes maior que no Brasil (Goldemberg, 1976).

Uma análise da evolução do balanço energético nacional demonstrou que no Brasil, em 1941, a madeira respondia por cerca de 75% do total da energia consumida,

em 1953 por 50%, em 1963 por 43% e em 1990 por 16%. No período de 1970 a 1990 a quantidade consumida permaneceu na faixa de 28 a 32 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tEP), demonstrando um mercado cativo para uso energético da madeira (Lima, 1992). Em termos absolutos o montante utilizado nos últimos 10 anos vem-se mantendo relativamente estável, com consumo entre 240 e 260 milhões de metros cúbicos anuais. Isto coloca a utilização dos recursos florestais como importante componente na geração de energia em nosso país, segundo Brito (1993).

Segundo Arruda (1996) no Brasil, em 1993, dos 282,31 milhões de metros cúbicos de biomassa florestal consumidos para diversas finalidades 237,90 milhões de metros cúbicos (84,3%) foram utilizados para fins energéticos e 44,41 milhões de metros cúbicos (15,7%) para outros fins.

Com relação à produção de energia, a de origem hidráulica foi a que mais cresceu no país, onde representava 17,87% da oferta interna bruta de energia primária em 1973, passando a 23,63% em 1978, 30,08% em 1985 e 33,10% em 1990, devido a vultosos investimentos do Governo na geração e transmissão da energia elétrica. Porém, para o futuro esta participação percentual não terá grandes possibilidades de aumento, pois para as regiões Sul, Sudeste e Nordeste o potencial de geração, através das grandes usinas hidrelétricas, encontra-se praticamente esgotado (Lima, 1992). Aliado a isso, hoje tem-se o fator ambiental a pesar contra as hidrelétricas, uma vez que a formação do lago inunda grandes áreas desalojando toda a fauna e submergindo terras produtivas, com enormes conseqüências para o ambiente.

Balbo (1990) afirma que o investimento para produção de um kWh gerado a partir do bagaço de cana (US\$ 1.000) é de custo inferior ao da energia elétrica gerada

pelas hidrelétricas (US\$ 2.000) e ao da nuclear (US\$ 6.000), além de não necessitar investir em linhas de transmissão, pois a cana-de-açúcar está distribuída ao longo do consumo.

Embora a madeira ainda seja vista por alguns como combustível do passado, ela está rapidamente emergindo como importante fonte de energia para o futuro. O renovado interesse pela madeira como combustível está sendo demonstrado não apenas nos países em desenvolvimento, mas também nos desenvolvidos e industrializados.

A participação percentual da lenha na matriz energética brasileira tem diminuído. Essa fonte de energia é a que possui melhores perspectivas de aumentar a sua participação devido a tecnologia de produção de madeira, desenvolvida no país, principalmente após a Lei nº. 5.106 que estabeleceu incentivos fiscais para o reflorestamento e florestamento. Além disso o Brasil possui terras aptas à produção de madeira sem prejuízos à produção de alimentos. Mas, embora apresente as condições para a produção de energia à partir da madeira, esta sofre forte discriminação por parte daqueles que se encarregam de traçar as políticas energéticas no Brasil; ao passo que, o que parece ser o mais sensato, seria o incentivo a tecnologias que minimizassem a remessa de divisas para o exterior (Lima, 1992).

A biomassa florestal é um recurso de baixo custo de produção por caloria se comparado a outros combustíveis. Considerando-se o alto custo de distribuição da energia produzida por grandes hidrelétricas constata-se vantagem da biomassa pela sua característica dispersa, sendo a sua utilização no meio rural e em localidades isoladas uma solução racional do ponto de vista técnico e econômico. Entretanto o consumo de lenha vem se inviabilizando ao longo dos anos pela oferta de outras alternativas tais como gás liquefeito de petróleo, óleo combustível e eletrificação rural a preços subsidiados (Brasil, 1986).

Usualmente, os inventários florestais indicam o volume de madeira do fuste, não informando sobre a produção representada pela copa. Sabe-se, contudo, que povoamentos plantados para fins energéticos, onde as árvores são exploradas com tamanho relativamente reduzido, a madeira da copa não representa volume significativo. Mas, tem sido freqüente a procura por tabelas de cubagem de árvores de eucalipto de grande porte com a copa representando parte considerável de seu volume total (Campos *et al.*, 1992). Com a demanda de energia proveniente da madeira os produtos utilizados marginalmente como combustível estão se tornando mais procurados, implicando na necessidade de utilização mais completa e eficiente dos recursos disponíveis. Com relação a isso, Campos *et al.* (1992) enfatizam a preocupação em relação a utilização da árvore inteira como fonte de energia.

Os resíduos florestais deixados no terreno após a exploração se constituem numa apreciável fonte potencial de energia que não deve ser descartada. No Brasil existiam, aproximadamente, 300 milhões de hectares de florestas nativas produtivas e mais de 5 milhões de hectares de florestas plantadas, segundo Mendonça Filho (1986). A utilização dos resíduos florestais significa, em última análise, a exploração total da árvore.

Somente uma empresa do setor de celulose, a Champion Papel e Celulose Ltda. – a terceira maior fabricante de papel do país – alcançou em 1989 um valor de plantio de 13.500 hectares. Praticamente toda a produção de chapa de fibra está baseada na utilização da madeira de eucalipto. Em 1980 essa produção foi de 1 milhão de m³, equivalente a um corte anual de 22.000 hectares de plantações de eucalipto, segundo Lima (1996).

A biomassa é uma forma de energia solar armazenada, isto é, as árvores usam a energia solar na fotossíntese para converter CO₂ e H₂O em produtos de alto teor energético, segundo Karchesy & Koch (1979).

No processo de combustão a energia armazenada nos carboidratos é liberada e aproveitada para geração de calor, vapor ou eletricidade. A quantidade de energia liberada pela madeira na combustão é conhecida como poder calorífico da madeira (Brito, 1986).

Na determinação do poder calorífico, geralmente, se usa o calorímetro. Os valores assim obtidos correspondem ao poder calorífico superior e são ligeiramente superiores aos observados na prática pelo fato de o calorímetro ser fechado e os produtos da combustão permanecem enclausurados. Assim, ao se resfriar, o vapor d'água é condensado e libera o calor de vaporização (Soares & Hakkila, 1987). Ainda segundo esses mesmos autores, a energia gerada pelo combustível depende do poder calorífico e do conteúdo de umidade do mesmo. O poder calorífico da madeira não varia de maneira significativa entre as espécies mas, segundo os mesmos autores, os resíduos florestais podem apresentar poder calorífico diferente da madeira proveniente de mesma espécie, devido às diferenças nas proporções de resina, lignina e celulose.

Brito (1986) afirma que o teor de umidade é, talvez, o fator de maior influência sobre o uso da madeira para energia. Primeiro, a presença de água representa poder calorífico negativo, pois parte da energia liberada é consumida na vaporização da água. Além disso se o teor de umidade for muito variável pode dificultar o processo de combustão, havendo necessidade constante de ajustes no sistema.

O limite em que a madeira deixa de ser considerada como combustível situa-se em torno de 65% de umidade em base úmida; para um aproveitamento eficiente esse valor deve ser inferior a 45%. Por este motivo a madeira extraída de uma floresta deve ser mantida algum tempo em estoque, para secagem natural. O tempo de secagem é de difícil

previsão, uma vez que é dependente da espécie, do local de origem, da forma em que a madeira será transformada e dos limites de umidade aceitáveis para cada processo (ELETROBRÁS, 1993).

Segundo Phillips (1979) um quilograma de madeira contém cerca de 4780 kcal/kg de energia independentemente da espécie florestal. Por outro lado Howard (1979) citado por Soares & Hakkila (1987) afirma que vários estudos indicam que a maioria das coníferas têm poder calorífico entre 4.589 kcal/kg e 5.019 kcal/kg. A resina tem poder calorífico bem maior que a madeira, da ordem de 9.393 kcal/kg.

Por este motivo as coníferas, que contêm maior quantidade de resina, têm maior poder calorífico, por unidade de peso, que as folhosas (Hakkila, 1984).

A tendência geral da silvicultura, segundo Ferreira (1972), é a obtenção de maiores volumes de madeira em menor espaço de tempo, mas a alta produção volumétrica nem sempre está associada à madeira de boa qualidade. Torna-se, portanto, necessário estudar as variações das qualidades da madeira em função dos tratos culturais, das condições edafo-climáticas e até da origem das sementes empregadas. Para o estudo de tais relações a densidade básica vem sendo utilizada como índice de qualidade da madeira; para a indústria de celulose e papel a importância da densidade da madeira é caracterizada pela necessidade de se conhecer o peso seco da madeira no controle das operações industriais, rendimento e uniformidade da matéria prima (Ferreira, 1972).

A crescente demanda de madeira, principalmente para produção de celulose e papel, carvão vegetal e geração direta de energia, tem motivado o emprego de técnicas que visam maximizar a utilização da árvore como um todo.

Com o encarecimento das operações de exploração florestal, aliado à crescente demanda de matéria-prima, atenção especial tem sido dada ao uso de resíduos florestais pela indústria madeireira, destacando-se casca, serragem, ponteiros, ramos, folhas e raízes (Martins & Brito, 1996).

Segundo o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (Brasil, 1989) a autoprodução de energia elétrica pode ser obtida através da utilização direta dos energéticos em processo de cogeração, caracterizado pela obtenção de duas formas de energia (térmica e elétrica) através de um único energético. A escolha do energético dependerá da disponibilidade local e da economicidade da cada alternativa.

Se considerada a continuidade e confiabilidade da produção de energia elétrica, a autoprodução pode ser classificada em:

- Firme: geração constante ao longo do ano;
- Sazonal: geração variável ao longo do ano;
- Aleatória (de curto prazo): geração esporádica que depende de ocorrências como grandes precipitações pluviométricas, ventos, etc.

Segundo Campos (1987) a modernização das usinas com a instalação de caldeiras mais eficientes (de alta pressão) e melhorias no processo industrial acabaria por abrir caminho para que, a médio prazo, existam mais perspectivas para a cogeração se expandir.

De acordo com Lorenz (1987), a conversão parcial da energia térmica em turbinas fornece a energia mecânica necessária para o acionamento de equipamentos e geração de energia elétrica. São condições necessárias para o aumento da geração de energia

elétrica, o aumento da eficiência de conversão termodinâmica nas turbinas e o aumento de pressão e temperatura do vapor gerado pelas caldeiras.

Segundo Balbo & Padovani Neto (1987) o sistema de conversão e utilização de energia na indústria de processamento de cana é o de cogeração. De forma resumida é representada pelo fluxograma mostrado na Figura 1. Esse sistema deve ser concebido para conferir às usinas a auto-suficiência energética (gerar toda a energia consumida a partir, exclusivamente, da queima do bagaço próprio).

Figura 1 – Fluxograma do sistema de cogeração em indústria de processamento de cana-de-açúcar.

Para Brito (1985) a transformação de um combustível em eletricidade é realizada com rendimento de 35 a 40%, e representa custos adicionais consideráveis ligados

à instalação e operação das instalações de geração, transmissão e distribuição. Assim, o incentivo ao uso da eletricidade de origem térmica está condicionado a uma análise estratégica, pois estará ligado ao depreciação das reservas energéticas do País.

O campo de aplicação da eletricidade de origem térmica é, portanto, limitado. Mesmo assim seu desenvolvimento, quando realizado em bases racionais, poderá permitir um aumento geral da eficiência da indústria e da qualidade de vida da população constituindo, portanto, um importante fator de desenvolvimento econômico e social.

Segundo Payne (1989) a indústria açucareira havaiana é tradicionalmente eficiente em energia, fornecendo eletricidade excedente para a rede de energia elétrica das comunidades locais. As caldeiras são de alta pressão (32 a 85 kgf/cm²), completamente instrumentadas e com controle automático e as fornalhas são projetadas para queimar bagaço em suspensão, o que é possível com o bagaço finamente dividido, havendo, na maioria dos casos, uma única caldeira por unidade industrial.

Isto contrasta com a maior parte das nossas áreas açucareiras onde pouca ou nenhuma eletricidade é exportada. As caldeiras são geralmente de baixa pressão (10 a 16 kgf/cm²) e se utilizam muitas unidades pequenas. A instrumentação é mínima, com controle manual e quando necessário queima-se combustível suplementar, em geral madeira.

5 – MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido na fazenda da empresa Duratex S/A e no laboratório do Departamento de Recursos Naturais – Ciências Florestais- FCA do Campus de Botucatu- UNESP, e envolveu a coleta no campo, de amostras de resíduos da exploração florestal de eucalipto, com o objetivo de estimar o poder calorífico superior (PCS), a composição e o volume de biomassa disponível depois da exploração florestal, cálculo do vapor obtenível para avaliação preliminar da energia elétrica a ser produzida por tonelada de biomassa (kWh/tb), fornecendo subsídios para estudos futuros de viabilidade econômica de um projeto de geração de energia elétrica.

5.1 – MATERIAL

5.1.1 – Localização e descrição da área

A coleta do material no campo foi conduzida em área de reflorestamento de *Eucalyptus grandis*, com 6 anos de idade na fazenda Morro do Ouro, localizada no município de Botucatu/SP, de propriedade da empresa Duratex S/A (Figura 2).

Suas coordenadas geográficas são: latitude 23°00'41'' S e longitude 48°31'53'' W, com altitude aproximada de 800 metros. A propriedade é dividida em quadras dimensionadas de acordo com a produtividade e capacidade de corte da Empresa.

Na área de coleta o tipo de solo predominante é o Latossolo Vermelho Amarelo álico, A moderado, textura média e relevo descrito como suave ondulado.

O clima predominante , segundo a classificação de Koppen é do tipo Cwa com temperatura média de 20,3°C e precipitação anual média de 1.537 mm, com maiores precipitações nos meses de outubro a março , e julho e agosto os meses mais secos.

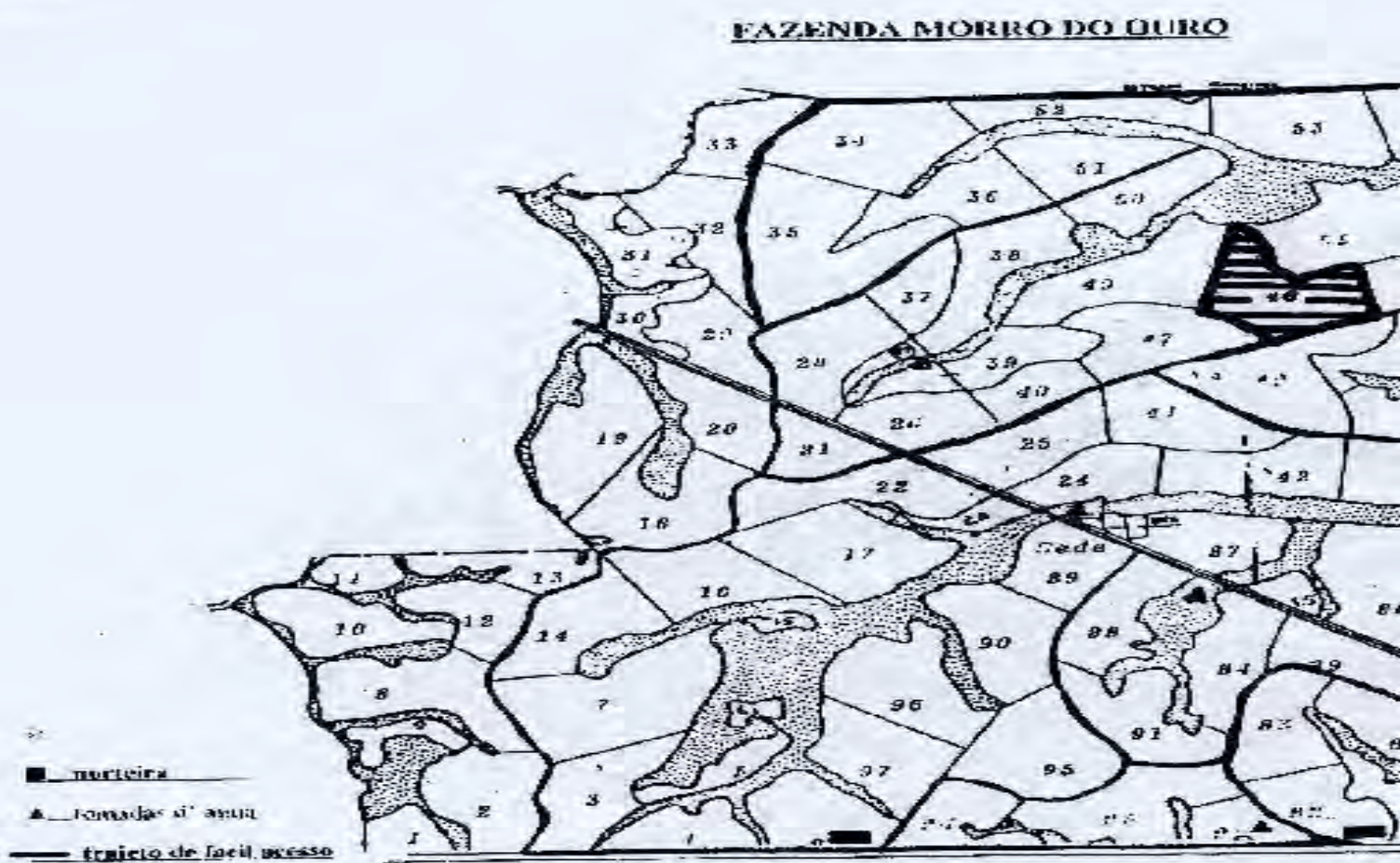


Figura 2 – Croquis da Fazenda Morro do Ouro, localizada no município de Botucatu-SP, com destaque para a Quadra 48, local onde foi coletado o material utilizado nas avaliações.

5.1.2 – A cultura

A Quadra autorizada para coleta do material e representativa da média da produtividade na região foi a de número 48 com área de 31,58 ha. O plantio na quadra foi realizado durante o mês de outubro de 1994 utilizando-se o espaçamento de 3 metros entre linhas e 2 metros entre as mudas na linha, com a colheita tendo sido efetuada em outubro/novembro de 2000. O plantio das mudas tem por objetivo obter madeira para a produção de chapa dura de fibra (hardboard). Para o estudo foi selecionado 1 ha desse reflorestamento dentro da Quadra autorizada para coleta. A Quadra em questão se insere na média representativa da produtividade do reflorestamento desta fazenda, em termos de incrementos $\text{m}^3/\text{ha}/\text{ano}$. O volume total de madeira colhida foi de 11.306 m^3 , com produtividade média de $358 \text{ m}^3/\text{ha}$.

Antecedendo o plantio das mudas o solo foi corrigido, visando o fornecimento de cálcio para as plantas, através da aplicação e incorporação de 600 kg/ha de calcário dolomítico e 300 kg/ha de gesso agrícola.

A adubação de plantio foi feita através da aplicação nos sulcos de 300 kg/ha da formulação NPK 06-30-06 com a adição de 0,3% de boro e 0,5% de zinco.

Noventa dias após o plantio das mudas foi efetuada a primeira adubação em cobertura aplicando-se 250 kg/ha da formulação NPK 10-00-20 adicionando-se 0,3% de boro e 0,5% de zinco. Essa adubação em cobertura foi feita com a aplicação superficial da formulação ao redor das mudas. A segunda adubação em cobertura foi realizada um ano após o plantio com a aplicação, em área total, de 250 kg/ha da formulação NPK 10-

15-20 acrescida de 0,3% de boro e 0,5% de zinco. Dois anos após o plantio foi realizada a terceira e última adubação em cobertura com a aplicação de 250 kg/ha da formulação NPK 10-15-20 com adição de 0,3% de boro e 0,5% de zinco aplicados a lanço em área total.

5.1.3 - Equipamentos

Para a realização do projeto de pesquisa foram utilizados os seguintes equipamentos:

- calorímetro PARR- modelo 1281 - Calorímetro
- jogo de peneiras,
- higrômetro Denver – Instrument, modelo IR-200
- destilador;
- moinho de facas;
- balança eletrônica digital;
- forno Mufla;
- estufa.

5.1.4 - Produtos

- placas de Petri;
- sacos plásticos e de papel;

- papel absorvente;
- serrote;
- machado pequeno;
- facção;
- óleo mineral.
- trena de 50 metros;
- fita métrica.

5.2 – MÉTODOS

As árvores foram derrubadas em outubro/novembro de 2000 e após a retirada do fuste com casca e diâmetro acima de 6cm, destinado a produção de chapas pela indústria, restou no local a biomassa considerada resíduo de exploração.

O corte das árvores é totalmente mecanizado onde uma máquina – denominada “Sling Shot” – derruba, desgalha e processa as árvores formando pilhas baixas ao longo da área, conforme Figura 3; uma segunda máquina - denominada “Forwarder”, apresentada na Figura 4 remove e empilha os toros de madeira em local de fácil acesso para os caminhões que farão, então, o transporte para a indústria.

Na Figura 5 pode-se observar os toros de madeira recém cortados empilhados ao longo de toda a área trabalhada pela Sling Shot; entre os toros são deixados todos os resíduos que não serão utilizados pela indústria. A Figura 6 mostra o aspecto da área onde foi coletado o material para estudo no momento exato da coleta.

Na área de amostragem demarcou-se 1 hectare onde foram coletados 15 ponteiros ao acaso (ainda com os ramos e as folhas) com comprimento médio de 4,47m e diâmetro menor ou igual a 6 cm na base onde foi cortado. Esses ponteiros foram separados, cortando-se os ramos com as folhas, medida a sua espessura de metro em metro a partir da base, comprimento total e diâmetro da base. Os ramos foram, então, separados e identificados em relação ao seu ponteiro de origem e as folhas foram retiradas e descartadas.

Todo o material coletado, madeira e ramos, foram utilizados nas avaliações separadamente, com exceção das folhas que foram descartadas e deixadas no campo.

Após a coleta dos resíduos no campo as amostras foram levadas para armazenamento em local protegido de intempéries, para classificação, determinação da umidade, densidade, poder calorífico superior e análise imediata da madeira e da casca.



Figura 3 – Máquina equipada com cabeçote “Sling Shot” cortando as árvores em toros de 6 metros de comprimento.



Figura 4 – “Forwarder” transportando e empilhando a madeira ao longo da estrada para posterior transporte para a indústria.



Figura 5 – Aspecto geral de área recém cortada, com a madeira empilhada ao longo de toda a área de colheita e os resíduos entre as pilhas.



Figura 6 – Área amostral no momento exato da coleta do material, onde já se fez o transporte de toda a madeira, restando somente o resíduo.

5.2.1 – Preparo do material para análise

A totalidade do material coletado no campo foi dividido em 4 classes, sendo 3 classes baseadas no diâmetro, descritas a seguir: ramos até 1 cm de diâmetro, ramos e pontas de 1 a 3 cm de diâmetro, pontas acima de 3,0 cm de diâmetro e a casca formando a quarta e ultima classe.

As amostras foram, separadamente, transformadas em cavacos com o uso de facão e machado, e moídas em moinho de faca pertencente ao Departamento de Recursos Naturais - Ciências Florestais FCA/UNESP. Os cavacos, após a moagem, foram misturados formando uma amostra composta para cada uma das classes. Todo o material utilizado no trabalho foi, após separação em suas respectivas classes, acondicionado em sacos de polietileno devidamente identificados e colocados em local protegido de umidade e luz.

5.2.2 – Teor de umidade

O teor médio de umidade da madeira do tronco e dos ramos grossos, bem como da casca do tronco e dos ramos finos (abaixo de 1 cm de diâmetro) foram, dentro de cada uma das classes descritas anteriormente, determinados no higrômetro Denver-Instrument, Modelo IR-200, pertencente ao Departamento de Recursos Naturais – Ciências Ambientais FCA/UNESP. Amostras de 20 gramas do material coletado no campo já triturado, de cada uma das classes, foram colocadas no higrômetro, trabalhando a 105°C de temperatura.

Esse equipamento fornece diretamente a umidade do material, sem necessidade de cálculos ou transformações.

5.2.3.-Análise imediata

A análise imediata - teor de matérias voláteis (MV), teor de cinzas (CZ) e teor de carbono fixo (CF) - foi feita, seguindo a norma D-1762-84 da American society for testing and materials (ASTM, 1996), no Departamento de Recursos Naturais – Ciência do Solo da Faculdade de Ciências Agronômicas/UNESP.

5.2.4 – Densidade básica da madeira

Do material coletado no campo e seco ao ar, foram separadas 5 amostras de cada classe pesando 20 g. Cada amostra devidamente identificada, foi imersa e mantida em água destilada até a completa saturação, constatada por sucessivas pesagens de acordo com Vital (1984). Antes de cada pesagem o excesso de água superficial foi removido com o uso de papel absorvente.

Após a saturação, o material foi acondicionado em recipiente de vidro e, separadamente, mantido em estufa a 105°C até peso constante.

A determinação da densidade foi efetuada pelo método do Máximo Teor de Umidade tendo sua fórmula descrita por Foelkel *et al.* (1971):

$$d_b = \frac{1}{\frac{P_m - P_{as}}{P_{as}} - 0,346}$$

Onde: P_m = peso ao ar das amostras saturadas após a remoção da água superficial

P_{as} = peso do material seco, conseguido através da secagem em estufa

Os resultados obtidos foram expressos em g/cm³.

5.2.5 – Poder calorífico superior

O poder calorífico superior das 4 classes de amostras foi determinado no laboratório do Departamento de Gestão e Tecnologia Agroindustrial, da FCA/UNESP, utilizando a bomba calorimétrica PARR Modelo 1281-Calorimeter. Nesse equipamento a amostra com umidade natural é pesada em balança digital e, em seguida, colocada num cadinho preso a tampa da bomba (Figura 7). Após tampa-la o equipamento pede, através do painel de controle, que seja inserido o peso da amostra. Com isso o equipamento faz os cálculos baseados no peso fornecido da amostra e apresenta os resultados expressos em cal/g. A unidade de calor no Sistema Internacional é o Joule (J), mas optou-se pela caloria/grama (cal/g) ou kcal/kg, por ser uso corrente no Brasil.



Figura 7 – Aspecto da tampa da bomba calorimétrica e da amostra dentro do cadinho, pronta para a análise.

5.2.6 – Volume total de biomassa residual

O volume total de biomassa que permanece na área após o corte das árvores foi calculado a partir da média de todo o material coletado no campo. Dessa forma as médias das 15 amostras coletadas para cada uma das 4 classes diamétricas serviu de base para os cálculos utilizados na estimativa do volume de material residual/ hectare.

O cálculo do volume/ponteiro foi efetuado através da fórmula*:

$$V = \frac{\pi * d^2 * h}{12}$$

onde: V = volume em m³;

π = 3,1416;

d = diâmetro;

h = altura

Após o cálculo do volume médio por ponteiro o resultado foi multiplicado por 1666,7 que é o número médio de árvores/ha, resultando no volume total por hectare de material residual.

* - Profa. Dra. Maria Aparecida Mourão Brasil – comunicação pessoal.

5.2.7 – Vapor obtenível

Para o cálculo do vapor que se pode obter a partir de um quilo de madeira queimada, sempre levando-se em conta as perdas que ocorrem na fornalha e na caldeira, foram utilizados os cálculos preconizados por (Hugot, 1963) adaptados para madeira, onde o calor transmitido ao vapor é dado por:

$$M_v = (4250 - 4850w - q) \alpha * \beta * \eta$$

onde:

M_v = calor transmitido ao vapor por kg de madeira queimada, em kcal

w = umidade da madeira (%)

q = calor sensível da fumaça em kcal

α = perdas pelos sólidos não queimados = 0,98

β = perdas por radiação e convecção = 0,97

η = perdas causadas por deficiências na combustão = 0,96

5.2.8 – Geração de vapor

Para o cálculo da potência de um gerador acionado por uma turbina, será simulada a turbina a vapor em contra-pressão .

As características desta turbina são:

Eficiência: 75%

Perda mecânica na turbina: 0,4%

Perda no redutor: 2%

Perda no gerador: 4%

Para o vapor será utilizada a unidade kg e a potência gerada em kWh

$1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal} = 3.596 \text{ kJ}$ (Campello,1990).

6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Quadra amostrada, com área total de 31,58 ha, apresentou rendimento total de 11.306 m³ de madeira com produtividade de 358,01 m³/ha de madeira.

No Quadro 1 são apresentados os dados de comprimento, diâmetro raio, volume e circunferência medida metro a metro de cada um dos ponteiros coletados.

Quadro 1 – Principais medidas e dimensionamento do material coletado na Fazenda Morro do Ouro. Botucatu, SP. 2000.

Amostra	Compr. (m)	Circunferência (cm)						Diâm. na base(cm)	Raio na Base(cm)	Volume (m3)**
		Base	1m	2m	3m	4m	Ponteiro			
1	4.45	24.0	16.5	13.5	10.2	5.1	3.7	7.64	3.82	0.0068
2	4.17	17.7	16.8	14.1	9.0	*	3.8	5.63	2.82	0.0035
3	4.91	19.9	18.3	15.6	13.3	10.3	5.3	6.33	3.17	0.0052
4	4.36	18.8	17.6	17.5	12.4	8.9	5.0	5.98	2.99	0.0041
5	3.98	17.1	15.6	11.5	7.4	*	4.5	5.44	2.72	0.0031
6	4.58	25.1	16.6	12.5	9.8	6.3	3.9	7.99	3.99	0.0077
7	4.62	25.6	16.8	13.1	9.9	5.9	3.4	8.15	4.07	0.0080
8	4.23	17.9	16.5	13.8	9.2	*	2.9	5.70	2.85	0.0036
9	4.82	22.3	20.2	16.4	12.9	9.8	4.1	7.10	3.55	0.0064
10	5.07	25.7	22.8	17.6	13.2	10.3	3.9	8.18	4.09	0.0089
11	3.86	18.2	16.8	12.1	6.9	*	4.4	5.79	2.9	0.0034
12	4.62	25.7	17.0	13.1	10.4	6.9	4.5	8.18	4.09	0.0081
13	4.74	20.1	18.5	15.8	13.4	10.5	5.5	6.40	3.20	0.0051
14	4.83	22.1	20.3	16.6	11.7	9.4	3.8	7.03	3.52	0.0063
15	3.92	19.1	16.4	11.5	6.2	*	4.3	6.08	3.04	0.0038
média	4.48	*	*	*	*	*	*	6.78	3.39	0.0056

(*) média menor que 4 m

(**) volume calculado a partir do material acima de 3 cm de diâmetro somente

Observando-se, no Quadro 1, o diâmetro dos ponteiros coletados nota-se grande variabilidade (de 5,44 a 8,18 cm). De acordo com informações fornecidas por técnicos da Empresa proprietária da área, o processamento é feito até o limite de 6 cm de diâmetro com casca. Mas, pode-se observar valores maiores que 8 cm, demonstrando que, na

realidade, o resíduo está também relacionado com o comprimento do fuste e não só com o diâmetro.

6.1 – Teor de umidade

O teor médio de umidade, determinado pelo higrômetro Denver Instrument – Modelo IR-200 e feito separadamente para cada uma das classes resultou em valores muito próximos em todas as 5 repetições efetuadas para cada amostra. O equipamento possui balança de precisão interna e calcula a umidade através da perda de peso de pequenas amostras até peso constante, momento em que emite o relatório final. No Quadro 3 pode-se constatar a umidade média de todas as amostras compostas e conseguida com o material armazenado no campo, ou seja, através de secagem natural somente.

Quadro 2 – Peso (g) e teor de umidade (%) das 4 classes diametrais. Botucatu, SP.2000

Peso/Classe	Até 1 cm Ø	De 1 a 3 cm Ø	acima de 3 cm Ø	Casca
Peso inicial (g)	1,007	1,003	1,003	0,414
Peso final (g)	0,848	0,856	0,417	0,348
Perda de peso (g)	0,159	0,147	0,068	0,066
Umidade (%)	15,86	14,66	14,02	15,94

Os resultados mostraram que o teor de umidade variou de 14,02% para ramos acima de 3 cm de diâmetro a 15,94% para a casca, resultados próximos entre si.

6.2 – Análise imediata

Os dados relacionados no Quadro 3 revelaram que, com relação ao teor de cinzas, a casca apresenta valores médios superiores à madeira, estando esses resultados de acordo com aqueles obtidos por Brito & Barrichelo (1978).

Altos teores de cinzas em materiais combustíveis podem resultar em emissão de partículas, tornando necessária a instalação de equipamentos para a separação de partículas dos gases da combustão. Todos os valores, tanto da casca quanto da madeira, apresentaram teores de cinzas próximos àqueles normalmente citados na literatura, conforme atestam Brito & Barrichelo (1978).

Quadro 3 – Valores da análise imediata obtidos com as 4 classes diamétrais de material residual coletados na Quadra 48 da Fazenda Morro do Ouro.

Classe	Material Volátil (%)	Carbono fixo (%)	Cinzas (%)
Ramos até 1cm Ø	83.72	14.64	1.63
Ramos 1 a 3 cm Ø	85.60	12.96	1.44
Acima de 3 cm	92.44	6.8	0.76
Casca	81.39	16.74	1.86

6.3 – Densidade básica da madeira

A densidade básica é, segundo Foelkel *et al.* (1971), característica complexa resultante da combinação de diversos fatores. Possui relação com as dimensões das fibras, espessura das paredes, volume dos vasos, entre outros, podendo portanto, haver certas variações.

Analisando os valores constantes do Quadro 4 verifica-se que os mesmos estão de acordo com os valores médios encontrados na literatura (Ferreira, 1972; Foelkel *et al.*, 1971).

Quadro 4 – Densidade básica (g/cm^3) das 4 classes diametrais de resíduos de exploração de *Eucalyptus grandis* cultivados no Município de Botucatu/SP.

Amostra/Classe	Até 1 cm Ø	de 1 a 3 cm Ø	acima de 3 cm Ø
1	0,544	0,547	0,539
2	0,541	0,546	0,537
3	0,549	0,535	0,534
4	0,536	0,549	0,542
Média	0,543	0,544	0,538

Os resultados da densidade básica média serão utilizados, posteriormente, no cálculo do peso de cada uma das classes amostrais.

6.4 – Poder calorífico superior (PCS)

A análise dos dados constantes do Quadro 5 revelou que o maior valor encontrado para o poder calorífico superior (PCS) foi detectado nos ramos até 1 cm de diâmetro, devido, provavelmente, aos extrativos presentes em maior quantidade nesse material, pois sabe-se que tais compostos são os que apresentam os maiores valores em relação ao poder calorífico, dentre todos os compostos presentes nas diferentes partes de uma árvore.

No entanto, a utilização prática desse material como combustível é dificultada por suas pequenas dimensões que dificultam o manuseio. Esses fatos já foram destacados por Martins & Brito (1996) que obtiveram resultados semelhantes, embora tenham trabalhado com o fuste mais a copa total, inclusive folhas, o que não ocorreu no presente trabalho.

Quadro 5 – Poder calorífico superior (kcal/kg) das 4 classes de material obtido(base peso úmido) de 3 avaliações distintas de *Eucalyptus grandis* cultivado no Município de Botucatu/SP.

Amostra/Classe	até 1 cm Ø	de 1 a 3 cm Ø	acima de 3 cm Ø	Casca
1	3.978,89	3.901,96	3.840,85	3.683,82
2	4.005,93	3.910,01	3.846,36	3.698,17
3	4.018,81	3.911,81	3.850,22	3.732,35
Desvio padrão (s)	20,37	5,25	4,71	24,93
Média PCS	4.001,21*	3.907,93*	3.845,81*	3.704,48*

(*) Significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

6.5 - Granulometria

As amostras compostas de cada uma das 4 classes de material foram, após a moagem, classificadas em peneiras obtendo-se os resultados apresentados no Quadro 6. Pelo fato de todas as amostras terem sido moídas num mesmo moinho suas partículas resultaram muito parecidas em termos granulométricos tendo 100% das partículas passado pela peneira de crivo de 2,00 mm.

Quadro 6 – Granulometria obtida das amostras compostas.

Peneira	Peso retido (g)	% retida acumulada
2,0 mm	0,00	0,00
1,0 mm	16,98	16,98
0,84 mm	11,21	28,19
0,297 mm	63,36	91,55
< 0,297 mm	8,45	100,00
Total	100,00	100,00

A análise dos dados constantes do Quadro 6 revela que todas as amostras possuem grânulos menores que 2 mm e 71,81% possui granulometria menor que 0,84 mm mostrando-se aptas, em termos granulométricos, para a determinação do poder calorífico superior e para a análise imediata.

6.6 – Volume total de biomassa

Os resultados da pesagem de todo o material coletado no campo estão relacionados no Quadro 7.

De posse desses resultados, e a partir da média dos pesos e volumes, foi calculado o peso e o volume médio do material residual de um hectare, baseado numa população média de 1.666,7 árvores (Quadro 8).

A produtividade da quadra, segundo informações da indústria foi de 358,01 m³/ha. Contribuindo assim cada árvore com 0,215 m³ de madeira para a indústria. De acordo com a densidade obtida para a madeira (0,538g/cm³) pode-se supor que cada árvore pesou em média 115.670g, fornecendo cada hectare cortado aproximadamente 193 toneladas de madeira .

Os resultados médios da densidade básica ,constante do Quadro 4, foram multiplicados pelo volume respectivo das classes amostrais, fornecendo o peso de cada uma das amostras. A soma dos volumes das classes amostrais resulta no volume total de cada amostra (Quadro 7).

Quadro 7 – Volume (m³) e peso (kg) de cada uma das amostras coletadas na Fazenda Morro do Ouro.

Árvore	Material acima de 3 cm de Ø		Material abaixo de 3 cm Ø		Total	
	Volume	Peso	Volume	Peso	Volume	Peso
1	0,0068	3,658	0,0045	2,448	0,0113	6,106
2	0,0035	1,883	0,0023	1,251	0,0058	3,134
3	0,0052	2,797	0,0034	1,849	0,0086	4,646
4	0,0041	2,205	0,0028	1,523	0,0069	3,728
5	0,0031	1,667	0,0021	1,142	0,0052	2,803
6	0,0077	4,142	0,0051	2,774	0,0128	6,913
7	0,0080	4,304	0,0049	2,665	0,0129	6,969
8	0,0036	1,937	0,0024	1,305	0,0060	3,242
9	0,0064	3,443	0,0044	2,393	0,0108	5,836
10	0,0089	4,788	0,0054	2,937	0,0143	7,725
11	0,0034	1,829	0,0023	1,251	0,0134	3,080
12	0,0081	4,357	0,0053	2,883	0,0134	7,240
13	0,0051	2,743	0,0034	1,849	0,0085	4,592
14	0,0063	3,389	0,0042	2,285	0,0105	5,674
15	0,0038	2,044	0,0025	1,360	0,0063	3,404
Média	0,0056	3,012	0,0037	2,013	0,0097	5,025

Quadro 8 – Estimativa de volume (m³) e peso (kg) de resíduos florestais/hectare baseado nas médias das amostras coletadas na Fazenda Morro do Ouro.

Árvore	amostra		hectare	
	Volume (m ³)	Peso (kg)	Volume (m ³)	Peso (kg)
1	0,0113	6,106	18,834	10176,87
2	0,0058	3,134	9,667	5223,44
3	0,0086	4,464	14,334	7743,49
4	0,0069	3,728	11,500	6213,46
5	0,0052	2,809	8,667	4681,76
6	0,0128	6,916	21,334	11526,90
7	0,0129	6,969	21,500	11615,23
8	0,0060	3,242	10,000	5403,44
9	0,0108	5,836	18,000	9726,86
10	0,0143	7,725	23,834	12875,26
11	0,0134	3,080	22,224	5133,44
12	0,0134	7,240	22,334	12066,91
13	0,0085	4,592	14,167	7653,49
14	0,0105	5,674	17,500	9456,86
15	0,0063	3,404	10,500	5673,45
Média	0,0097	5,025	16,167	8375,17

O material residual com diâmetro acima de 3 cm representa 2,6% em relação à produtividade média da Quadra (358,01m³/ha). O material abaixo de 3 cm de diâmetro representa somente 1,7% em relação ao total. A somatória de todo o material residual coletado representa volume de 16,167 m³/ha, equivalente a 4,51% do total colhido por hectare.

No entanto, a utilização de toda a copa, mesmo que sem folhas, é problemática por apresentar grande número de pequenos ramos dificultando o manuseio e tornando o transporte menos eficiente.

6.7 - Vapor obtenível

Com os resultados obtidos é possível estimar a quantidade de vapor conseguido por quilograma de madeira queimada, dentro de determinadas condições operacionais.

A quantidade de kcal/kg de madeira queimada é de 314 kcal/kg. A quantidade de calor transmitida ao vapor por quilograma de madeira queimada foi calculada em 2929,36 kcal/kg. Dessa forma, a quantidade de vapor obtido por quilo de madeira queimada, é calculada a partir do calor necessário para produzir 1 kg de vapor, conforme os dados relacionados no Quadro 9, montado de acordo com o Diagrama de Mollier para vapor d'água.

Quadro 9 – Calor necessário para produzir 1 kg de vapor (Temp. da água de alimentação=90°C).

Pressão de vapor (kg/cm ²)	Saturado ou superaquecido (°C)	Calor necessário (kcal/kg vapor)
6	Saturado	569
8	Saturado	572
10	Saturado	574
10	250	612
15	300	635
20	350	659
25	375	670
30	400	681

Tomando-se como referência a pressão do vapor a 25 kg/cm², constante do Quadro 9, o calor necessário para produzir um quilograma de vapor é 670 kcal. Multiplicando-se esse valor pela quantidade de calor transmitida ao vapor por quilo de madeira queimada (2929,36 kcal/kg) resulta o fator f, que é igual a 4,37 kg de vapor por quilo de madeira queimada. Esse fator multiplicado pela média do peso dos resíduos florestais (8375,17 kg/ha) resulta em 36.599,49 quilos de vapor produzido por hectare de madeira residual.

6.8 – Geração de Energia

Baseado na quantidade de vapor obtido pode ser feita a simulação da energia gerada por um hipotético gerador acionado por turbina a vapor de contra-pressão, com as seguintes características:

- Vapor de entrada: 25 bar (saturado)

- Vapor de saída: 2,5 bar à 127°C
- Eficiência da turbina: 75%
- Perda mecânica na turbina: 0,4%
- Perda no redutor: 2%
- Perda no gerador: 4%

O cálculo do consumo específico kg de vapor/kWh é feito de acordo com os dados a seguir:

Entalpia de entrada: 670 kcal/kg (D.M)

Entalpia teórica de saída: 622 kcal (D.M)

Variação teórica de entalpia: $670 - 622 = 48$ kcal/kg de vapor (D.M)

Temperatura teórica de saída: 127°C > 95% de título (D.M)

Eficiência da turbina: 75%

Variação entálpica real: $48 \times 0,75 = 36$ kcal/kg

Por se tratar de uma simulação, uma vez que a unidade industrial utilizada como parâmetro para todos os cálculos não possui turbina a vapor e por isso não esta, atualmente, apta para a cogeração de energia elétrica, a variação entálpica real de vapor poderia ser aproveitada no processo industrial.

A conversão das unidades utilizadas tem a seguinte relação, segundo Campello (1990):

$$1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal} = 3,596 \text{ kJ}$$

A energia transferida para o eixo da turbina é dada pela relação entre a variação teórica entálpica e pela conversão de 1 kWh para kcal, ficando:

$$36/860 = 0,042 \text{ kWh/kg de vapor}$$

O consumo nos bornes do gerador é igual a:

$$0,042 \times 0,96 \times 0,98 \times 0,996 = 0,03935 \text{ kWh/kg vapor}$$

De acordo com os valores de vapor obtenível (item 6.7) pode-se calcular a potência nos bornes do gerador, resultando a energia gerada pela biomassa residual/hectare.

$$36.599,49\text{kg/hectare} \times 0,03935 \text{ kWh/kg} = 1.440,19 \text{ kWh/hectare}$$

7 – CONCLUSÕES

Baseado nas condições experimentais em que o presente estudo se desenvolveu e na análise dos resultados obtidos pode-se apresentar as seguintes conclusões:

- a média do poder calorífico superior da madeira foi significativamente menor que o dos ramos com diâmetro de até 1 cm;
- a quantidade de energia útil obtida foi de 1.440,19 kWh/ha utilizando-se a turbina a vapor em contra-pressão com 75% de rendimento.
- a utilização desse potencial energético depende de estudos de natureza econômica com relação aos custos de coleta e transporte do material residual e dos investimentos em equipamentos.

8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A quantidade de madeira retirada por ano pela Duraflora S.A, para utilização nos processos industriais da Duratex S/A, é 660 mil metros cúbicos de madeira/ano e a produtividade é 250 cúbicos de madeira por hectare, portanto a empresa corta 2640 hectares de madeira/ano. Sabendo-se que a quantidade de vapor produzido por hectare de madeira residual foi de 36.599,49 kg /hectare, conseguindo-se obter 96.622,65 toneladas de vapor/ano.

Nas condições avaliadas para a turbina a vapor em contra-pressão com rendimento de 75%, a quantidade de energia útil obtida é de 1.440,19 kWh/hectare (1,44 MWh), ou seja 3.802,1 MWh/ano.

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACIOLI, J.L. *Fontes de energia*. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1994. 138p.

ARRUDA, G. Eucalipto tem muitas utilidades. *Jornal MADEIRA & CIA*. Curitiba, 1996. Alternativa Editora Ltda, Curitiba, 1996. 3(25):5.

ASTM – *Annual books of ASTM standards*. Section 4, v.04-10, 1996.

BALBO, J. M. Geração de energia elétrica a partir da utilização do bagaço da cana-de-açúcar.

In: _____. Relatório FRA/BALBO. Sertãozinho, Atílio Balbo S/A Açúcar e Álcool, 1990.

BALBO, J.M., PADOVANI NETO, A . Excedente de energia elétrica e sobra de bagaço para diferentes concepções e sistemas de conversão e utilização de energia aplicáveis a indústria sucro-alcooleira. *Stab*, Piracicaba, v.6, n.2, p.52-58, 1987.

BRASIL, Ministério da Indústria e do Comércio – MIC. *Energia da biomassa: alavanca de uma nova política industrial*. Secretaria de Tecnologia Industrial, 1986. 52p.

BRASIL, Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. *Manual do autoprodutor*. Brasília, v.1, 16p. 1989.

BRASIL, Ministério das Minas e Energia. *Balanço Energético Nacional*. Brasília, 1999. 153p.

BRITO, J.O., BARRICHELO, L.E.G. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. *IPEF*. n.16, p.63-70, 1978.

BRITO, J. O. Madeira para a floresta: a verdadeira realidade do uso de recursos florestais. *Silvicultura* 11 (41) : 188 - 193, 1986.

BRITO, J. O . Expressão da Produção Florestal em unidades energéticas. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7º , *Anais*. Curitiba, 1993.

- BRITO, S.S. Geração termo e hidrelétrica. In: LA ROVERE (coord.), *Economia e tecnologia da energia*. Rio de Janeiro. Marco Zero/Finep, 1985p.83-107.
- CAMPELLO, S.B. Ciclos térmicos – cogeração de energia. Recife. COMUNICARTE. 107p. 1990.
- CAMPOS, M.M. Alguns aspectos da cogeração de energia. *Brasil Açucareiro*, Rio de Janeiro. V.105, n.2-3, p.36-40, 1987.
- CAMPOS, J.C.C., DA SILVA, J.A., VITAL, B.R., Volume e biomassa do tronco e da copa de eucalipto de grande porte. *Revista Árvore*, Viçosa. 16(3), p. 319-336. 1992.
- ELETROBRÁS. *Plano 2015 – Estudos Básicos*. Vol.III, 1993.
- FERREIRA, M. Variação da densidade básica da madeira de povoamentos comerciais de *Eucalyptus grandis* Hill Ex Maiden nas idades de 11, 12, 13, 14 e 16 anos. *IPEF*. n.4, p.65-89, 1972.
- FOELKEL, C.E.B., BRASIL, M.A.M., BARRICHELO, L.E.G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. *IPEF*. n.2/3, p.65-74, 1971.
- GOLDEMBERG, J. As diferentes fontes de energia. In: *Energia no Brasil*. São Paulo: Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 1976. P.1-42.

GOLDEMBERG, J. *Energia, Meio ambiente & Desenvolvimento*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1998. 125p.

HAKKILA, P. Forest chips as fuel for heating plants in Finland. *Folia Forestalia* nº. 586: 1 - 62. 1984.

HUGOT, E. Producción de vapor. In: __. *Manual para ingenieros azucareros*. México: Compãnia Editorial Continental, 1963. p.603-693.

KARCHESY, J. & KOCH, P. Energy production from hardwoods growing on southern pine sites. U. S. Forest Service, *General Technical Report* SO - 24, 1979. 59 p.

LIMA, C.R., Madeira: fonte alternativa e renovável de energia – I. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, 4. São Carlos, *Anais*, 1992, EESC/USP. P.91-104.

LIMA, W.P., *Impacto ambiental do eucalipto*. 2^a ed., São Paulo, Edusp, 301p. 1996.

LIMA, C.R., BAJAY, S.V. A reposição florestal obrigatória e o planejamento energético regional. In: SIMPÓSIO EM ENERGIA NA AGRICULTURA 1, 1999, Sinergia Botucatu: *Anais*. v.1, 31-36p., 1999.

- LORENZ, K. Balanço energético em usinas e destilarias e excedentes energéticos. *Brasil Açucareiro*, Rio de Janeiro. V.105,n.2-3, p.11-14, 1987.
- MARTINS, A. L. P. S., BRITO, J. O. Caracterização química e energética de resíduos de exploração da madeira de *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore*. v.20, n.3, p.367-370, 1996.
- MENDONÇA FILHO, W. F. Aspectos atuais da exploração florestal no Brasil - sistemas e mecanização. *Silvicultura*, v. 11 n. 41, p. 120 – 127, 1986.
- PAYNE, J.H. Diferenças regionais no processamento da cana-de-açúcar. In: _____. *Operações unitárias na produção de açúcar de cana*. São Paulo, Nobel/Stab, 1989. P.217-222.
- PHILLIPS, D. R. *Forest residue: a significant source of energy*. Southern Lamberman, Dec. 15:101 – 103. 1979.
- SMITH, D.M. Maximum moisture content method for determining specific gravity of small wood samples. *U.S. Forest Products Laboratory*. Report n°. 2014. 8p., 1954.
- SOARES, R. V.; HAKKILA, P. Potencial energético dos resíduos de desbastes em plantações de *Pinus taeda* no Estado do Paraná, Brasil. *Revista Floresta.*, p.73-94, 1987.
- VITAL, B.R. Métodos de determinação da densidade da madeira. *SIF*. n.1, p.21, 1984.