



APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS FLORESTAIS DE *Eucalyptus* spp NA INDÚSTRIA DE FABRICAÇÃO DE CELULOSE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA

FRANCISCO LUIZ SANCHEZ SANTIAGO¹ & MARCOS ANTONIO DE REZENDE²

RESUMO: A crise de combustíveis derivados de petróleo a partir do ano 1970 levou as empresas do ramo florestal a avaliar a viabilidade técnica e econômica de reaproveitamento inteligente e racional de resíduos florestais como insumos energéticos até então descartados em seus processos nas florestas. A possibilidade de gerar energia com as cascas que permanecem na floresta após a colheita da madeira e resíduos florestais, tais como galhos de pequenos diâmetros das copas das árvores que são vendidos a terceiros foi o que motivou a realização deste trabalho. Para a realização do trabalho foram obtidos dados de consumo mensal de combustíveis, produção de vapor das caldeiras instaladas na unidade fabril da empresa LWARCEL CELULOSE de Lençóis Paulista no período de abril de 2011 a abril de 2012, bem como o consumo de vapor e geração de energia elétrica própria (co-geração). Foram coletados, também, dados para quantificação das cascas e resíduos florestais decorrentes da colheita do *Eucalyptus*, sua análise química e poder calorífico. Os principais resultados mostraram que a implantação da proposta de utilização das cascas e resíduos florestais representou uma receita bruta de R\$ 9,09 x 10⁶/ ano (nove milhões e noventa mil reais por ano), indicando uma economia de 84689,00 t/ano em biomassa florestal adquirida de terceiros.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduos florestais de *Eucalyptus*, co-geração de energia elétrica, biomassa florestal, poder calorífico, umidade com base úmida.

UTILIZATION OF EUCALYPTUS FOREST RESIDUES FROM THE CELLULOSE MANUFACTURING INDUSTRY FOR THERMAL AND ELECTRICAL ENERGY GENERATION.

ABSTRACT: The crisis of fossil fuels that have started in 1970 led the forest companies evaluate the technical and economic viability of rational reusing of forest residues as energy inputs that were until then discarded. The possibility to generate energy from the barks that remain in the forest after harvesting and from forest residues such as small diameter branches of the tree top, was the reason that motivated this work. Monthly fuel consumption and steam generation were obtained from the boilers installed in the manufacturing unit of the company LWARCEL CELULOSE from Lençóis Paulista, as well as steam consumption and the company own power generation (cogeneration). The data was collected from April 2011 to April 2012,. Data also were collected to quantify the barks and forest residues allowed estimate resulting from the harvest of *Eucalyptus*, their chemical analysis and calorific value. Forest residues were quantified, and their chemical and calorific value were analyzed. The main results showed that the implementation of the use of the barks and forest residues to generate energy represented a gross income of R\$ 9.09 x 10⁶ (nine million ninety thousand reais per year), indicating a saving of 84,689.00 t / year in forest biomass acquired from third parties.

KEYWORDS: *Eucalyptus* forest residues, cogeneration of electricity, forest biomass, calorific value, wood moisture content.

¹ E-mail: sanchezsantiago@uol.com.br

² IBB/UNESP-Botucatu. E-mail: rezende@ibb.unesp.br

1 INTRODUÇÃO

A evolução do consumo de energia, baseada em combustíveis fósseis, conduziu a humanidade para uma matriz energética insegura e cara. Isso tem levado muitos países a considerarem a necessidade de profundas mudanças, incluindo a intensificação do aproveitamento de outras fontes energéticas, sobretudo as renováveis, incluindo a madeira (BRITO, 2007).

A utilização energética da biomassa florestal também promove o aumento do aproveitamento de florestas comerciais existentes, pela possibilidade de utilização dos resíduos florestais, que geralmente são deixados no campo após a colheita e se constituem em potenciais fontes de energia; além disso, o aproveitamento energético de resíduos florestais pode viabilizar economicamente atividades de manejo florestais e tratamentos silviculturais (DO CANTO, 2009).

As principais barreiras existentes para a maior utilização das energias renováveis são de ordem econômica. Considera-se que em um dos fatores mais importantes na utilização de biomassa como insumo energético, independente da técnica empregada, refere-se ao custo de colheita e transporte dessa matéria-prima (GOLDEMBERG, 1998; MACEDO, 2001).

Quando os custos de produção da biomassa florestal são comparados com os de outras fontes de produção de energia, constata-se que os custos de colheita e transporte são determinantes para sua competitividade. Para que essa barreira possa ser superada são necessários estudos e investimentos em tecnologia de colheita, para que os ganhos de escala possam ser alcançados, de forma a tornar a biomassa florestal competitiva, uma vez que já existem tecnologias para sua conversão energética (GOLDEMBERG, 1998).

Muitos processos industriais em plantas químicas de papel e celulose, açúcar e álcool, alimentícias e inúmeras outras, demandam energia térmica (em forma de vapor) e energia elétrica. Impulsionados pelos crescentes custos dos insumos energéticos, quer dos combustíveis utilizados na geração de vapor, quer de energia elétrica comprada das concessionárias, as indústrias devem permanentemente buscar a forma mais econômica de utilização de energia (PEREIRA JUNIOR, 2001).

Tendo em vista os motivos expostos pretende-se estimar a quantidade de vapor e energia elétrica obtidos através da queima dos resíduos florestais como combustíveis em caldeira das indústrias de papel e celulose, madeireiros e outros que utilizam a madeira como matéria-prima e descartam na floresta seus resíduos após colheita.

Desta forma este trabalho teve como objetivo geral elaborar análise técnica de sistemas para aproveitamento de resíduos florestais de *Eucalyptus* na geração de energia térmica e elétrica nas indústrias de fabricação de celulose. Quantificar o valor energético presente na biomassa descartada durante a colheita da madeira pela empresa LWARCEL, através da sua conversão em

energia térmica e elétrica. Quantificar a redução de custo com biomassa que atualmente é adquirida de terceiros e utilizada como combustível na planta de energia da empresa. Determinar a receita bruta proveniente do aproveitamento da biomassa florestal atualmente descartada durante a colheita da madeira pela empresa estudada.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho de pesquisa foi desenvolvido na empresa Lwarcel Celulose LTDA., onde foram analisados os locais e as quantidades de resíduos florestais e cascas gerados durante a colheita do *Eucalyptus* que atualmente são descartados pela empresa em estudo. Foi também analisada a necessidade energética da unidade fabril em questão, sob os aspectos de energia térmica e elétrica. Através dos índices de controle da empresa determinaram-se as quantidades e os tipos de combustíveis utilizados na produção de vapor para aquecimento do processo e co-geração de energia elétrica.

2.1. Fábrica de celulose de *Eucalyptus*.

A indústria Lwarcel Celulose LTDA, pertencente ao grupo Lwart possui uma fábrica de celulose de *Eucalyptus* (branqueada), localizada no município de Lençóis Paulista no Estado de São Paulo.

2.2. Dados e parâmetros do ciclo termodinâmico e a geração de potência energética na unidade Fabril.

O ciclo termodinâmico existente na fábrica de celulose Lwarcel de Lençóis Paulista é composto basicamente por 2 (duas) caldeiras, sendo: caldeira de recuperação e caldeira de leite fluidizado para geração de vapor superaquecido a pressão 8,14 MPa. A entalpia do vapor na saída das caldeiras é de 975,5 kcal/kg (4,08 MJ/kg, 475,0 °C), e a entalpia da água de alimentação das caldeiras é de 120,28 kcal/kg (0,5 MJ/kg, 120,0 °C). O vapor saindo das caldeiras passa por dois turbos geradores (co-geração), onde o calor é convertido em trabalho na geração média de 16473,79 MWh/mês em energia elétrica (ciclo Rankine).

2.2.1. Caldeira de recuperação.

A caldeira de recuperação é utilizada para produção de vapor superaquecido. Tem por finalidade converter a energia contida no licor negro (resíduo do processo de celulose) em energia térmica e elétrica, além da recuperação de produtos químicos utilizados no processo de fabricação.

Os dados de consumo de licor negro e produção de vapor superaquecido da caldeira de leite fluidizado foram obtidos dos relatórios de controle da empresa.

2.2.2. Caldeira de leite fluidizado.

A Caldeira de leite fluidizado, um dos principais objetos de estudo deste trabalho, é utilizada para produção de vapor superaquecido.

A biomassa florestal utilizada como combustível nesta caldeira é, em sua maior parte, adquirida de terceiros, oriunda da biomassa florestal, bagaço de cana-de-açúcar e resíduos das indústrias madeireiras.

2.2.3. Consumo, custo de combustíveis e produção de vapor.

Os dados de produção de vapor das caldeiras de recuperação e leito fluidizado foram obtidos dos relatórios de controle do processo da empresa. Também foram levantados os custos e consumo dos combustíveis (biomassa) da caldeira de leito fluidizado. Todos os dados levantados são referentes ao período de abril de 2011 a abril de 2012. O mês de junho de 2011 foi descartado do levantamento porque a fábrica operou somente 23 dias neste mês. O regime operacional da empresa é de 11,67 meses por ano, 30 dias por mês e 24 horas por dia.

2.3. Geração de cascas e resíduos.

Após as colheitas semi-mecanizada e mecanizada o descarte da biomassa florestal nas florestas da empresa compõem-se em sua maior parte de cascas da madeira e resíduos que são os galhos das copas das árvores e folhas. O aproveitamento destes descartes utilizando-os como combustíveis na caldeira de leito fluidizado é objeto de estudo deste trabalho.

2.3.1. Cascas.

Após a colheita da madeira as cascas e folhas são deixadas na floresta para incorporação da massa orgânica no solo. O índice médio do total de cascas geradas nas florestas foi determinado utilizando-se 72 amostras de madeira coletadas nas florestas da empresa em pesquisa e, posteriormente, analisadas no Laboratório de Física e Biofísica da Universidade Estadual Paulista (UNESP), campus de Botucatu, SP. As amostras foram coletadas em forma de discos nas alturas de 12,5%, 37,5%, 62,5% e 87,5% da altura comercial das árvores, totalizando 4 (quatro) amostras por árvore. Para a retirada dos discos foram coletadas 6 (seis) árvores por fazenda, provenientes de 3 (três) fazendas com plantações dos gêneros de *Eucalyptus grandis* e *urograndis*. O índice de casca contida na madeira foi obtido com a utilização da Equação (1).

$$I_{casca} = \frac{M_{casca}}{M_{usc}} \quad (1)$$

onde I_{casca} é o índice de casca em relação à massa de madeira sem casca, M_{casca} é a média da massa de cascas contidas nas amostras (g) e M_{usc} é a média da massa de madeira sem cascas contidas nas amostras (g). Com auxílio dos relatórios de controle de produção da empresa, referentes à massa de madeira sem casca que foi consumida na produção de celulose e da aplicação da Equação (2), determinaram-se a quantidade total de cascas que permanecem nas florestas após a colheita da madeira.

$$M_{casca} = C_{madeira} \cdot I_{casca} \quad (2)$$

onde M_{casca} é a quantidade total de cascas úmidas que permanecem nas florestas (t/ano) e $C_{madeira}$ a média anual da massa de madeira sem cascas consumidas pelo processo de produção (t/ano).

A determinação da massa úmida das cascas a serem retiradas das florestas para geração da energia térmica e elétrica foi calculada de acordo com a Equação (3), com base na informação prestada pela empresa Areva Koblit LTDA (comunicação pessoal)³. Segundo a empresa podem ser retiradas das florestas um total de 70% dos resíduos gerados durante a colheita da madeira, pois uma parte das cascas devem permanecer nas florestas para serem incorporados ao solo como via de fornecimento de nutrientes.

$$M_{casca} = M_{casca} \cdot 0,7 \quad (3)$$

onde M_{casca} é a massa útil das cascas úmidas a serem retiradas das florestas (t/ano).

2.3.2. Resíduos.

Os índices de geração de resíduos, o preço de venda e a densidade dos galhos das copas das árvores, foram quantificados em inventários florestais informado pela empresa. O volume médio destes resíduos foram determinados com aplicação da Equação (4) para resíduos gerados nas colheitas mecanizadas e pela Equação (5) para resíduos das colheitas semi-mecanizadas.

a. Colheitas mecanizadas:

$$V_{resíduo} = I_m \cdot A_m \quad (4)$$

onde $V_{resíduo}$ é o volume dos resíduos gerados (m^3 /st/ano), I_m o índice de geração de resíduos das colheitas mecanizadas (m^3 /st/ha) e A_m a área florestal das colheitas mecanizadas (ha/ano).

b. Colheitas semi-mecanizadas:

$$V_{resíduo} = I_s \cdot A_s \quad (5)$$

onde $V_{resíduo}$ é o volume dos resíduos gerados (m^3 /st/ano), I_s o índice de geração de resíduos das colheitas semi-mecanizadas (m^3 /st/ha) e A_s a área florestal das colheitas semi-mecanizadas (ha/ano).

As áreas das florestas das colheitas mecanizadas e semi-mecanizadas foram obtidas dos relatórios de controle da empresa. A conversão do volume total de resíduos gerados (colheitas mecanizadas + semi-mecanizadas) para massa de resíduos foi obtida com aplicação da Equação (6).

$$M_{resíduo} = \left(\frac{\rho_{resíduo} \cdot V_{resíduo}}{1000} \right) \quad (6)$$

onde $M_{resíduo}$ é a massa total de resíduos úmidos gerados (t/ano), $V_{resíduo}$ o volume total dos resíduos úmidos gerados (m^3 /ano) e $\rho_{resíduo}$ a densidade dos resíduos úmidos (kg/m^3).

A conversão do volume dos resíduos de m^3 st (metro cúbico stereo de madeira empilhada) para m^3 (metro

³ Areva Koblit LTDA, localizada na Avenida Cônsul Vilares, 291, Recife, PE. Comunicação pessoal, 2013.

cúbico de madeira sólida) foi obtida aplicando-se o índice: $1 \text{ m}^3 = 1,5 \text{ m}^3 \text{st}$.

A Figura 1 ilustra o fluxograma do processo de preparação e utilização da madeira, identificando os pontos no processo onde ocorre o descarte dos resíduos florestais que atualmente são vendidos a terceiros, as cascas que permanecem nas florestas, a biomassa florestal adquirida de terceiros e os locais onde são gerados e distribuídos o vapor superaquecido e saturado.

2.3.3. Fluxograma do processo de preparação e utilização da madeira.

A Figura 1 ilustra o fluxograma do processo de preparação e utilização da madeira, identificando os pontos no processo onde ocorre o descarte dos resíduos florestais que atualmente são vendidos a terceiros, as cascas que permanecem nas florestas, a biomassa florestal adquirida de terceiros e os locais onde são gerados e distribuídos o vapor superaquecido e saturado.

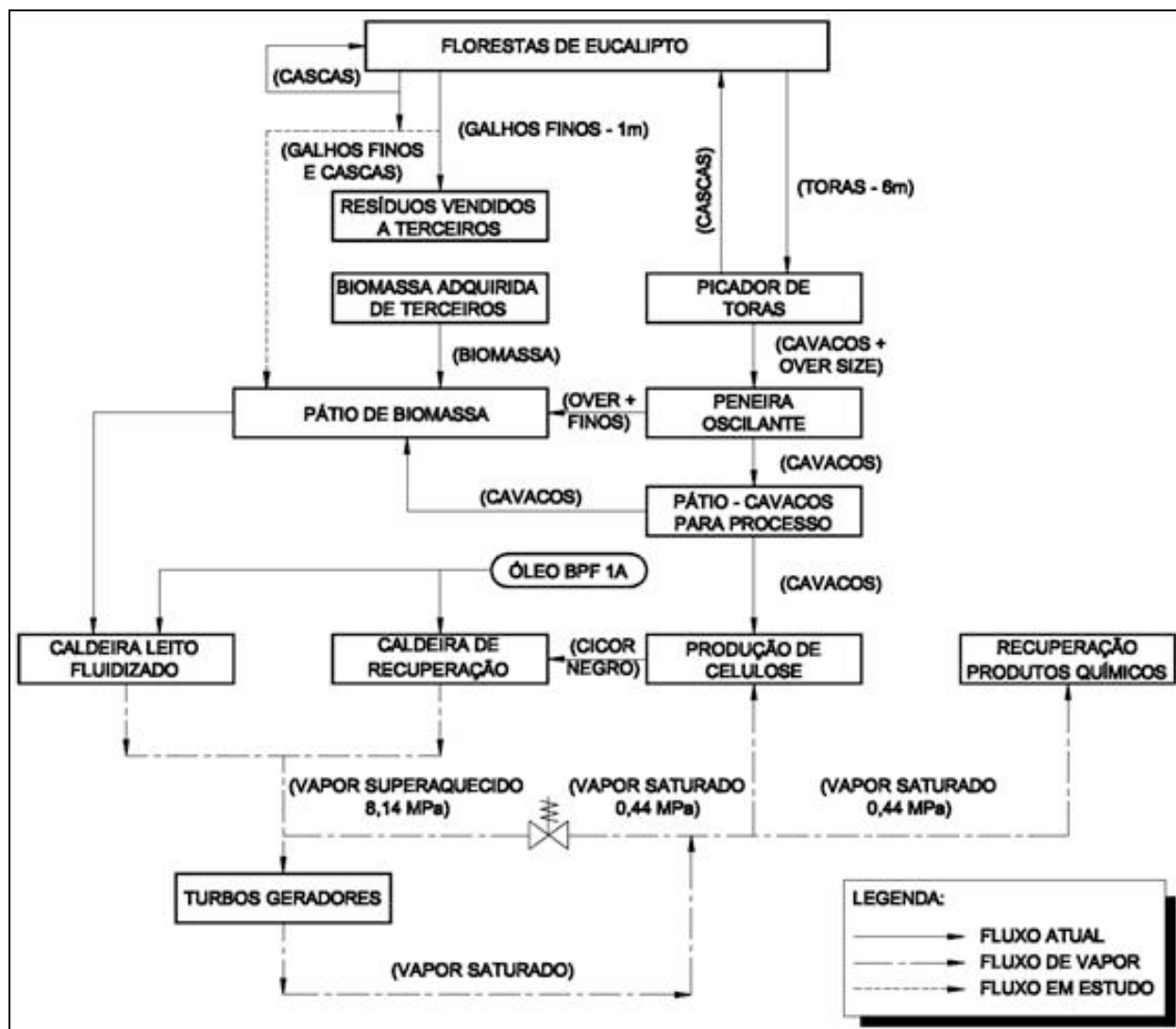


Figura 1 - Fluxograma do processo de preparação e utilização da madeira, do destino das cascas/resíduos florestais e fluxo de geração de vapor e energia elétrica.

2.4. Determinação do teor de umidade com base em massa úmida das cascas e resíduos.

Para obtenção do teor de umidade das cascas, foram coletadas 10 amostras de cascas úmidas com volume de 300 cm^3 que posteriormente foram levadas em estufa para secagem, em uma temperatura de $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, durante um período de 24 h. O teor de umidade dos resíduos foi obtido pelo mesmo método das cascas com aproveitamento das 72 amostras de *Eucalyptos* (Tabela 2). As análises foram elaboradas no Laboratório de

Física e Biofísica da UNESP em Botucatu, SP. O teor de umidade com base em massa úmida das cascas e resíduos foi determinado de acordo com as Equações (7).

$$u = \frac{M_u - M_0}{M_u} \cdot 100 \quad (7)$$

onde M_u a massa úmida da amostra (g), M_0 a massa seca da amostra (g) e “u” o teor de umidade com base em massa úmida da amostra (%).

2.5. Determinação da densidade do lenho

A densidade dos resíduos obtida pela razão entre a massa úmida e volume úmido, foi determinada pelo método gravimétrico por imersão em água. Foram utilizadas 72 amostras de *Eucalyptus* e as análises foram elaboradas no Laboratório de Física e Biofísica da UNESP em Botucatu, SP. A densidade dos resíduos florestais foi determinada com aplicação da Equação (8).

$$\rho_{\text{resíduo}} = \frac{M_{\text{ucc}}}{V_{\text{cc}}} \quad (8)$$

onde $\rho_{\text{resíduo}}$ é a densidade do resíduo para o teor de umidade com base em massa úmida (g/cm^3), M_{ucc} a média da massa das amostras dos discos com cascas para teor de umidade com base em massa úmida (g) e V_{cc} a média do volume das amostras dos discos com casca para teor de umidade com base em massa úmida (cm^3).

2.6. Determinação do poder calorífico das cascas que permanecem nas florestas e dos resíduos florestais vendidos a terceiros após a colheita da madeira.

2.6.1. Poder calorífico superior (PCS) das cascas e dos resíduos.

O poder calorífico superior (PCS) foi determinado pelo método da bomba calorimétrica utilizando o calorímetro da Marca Junke & Kunkel KG. O procedimento foi realizado no Laboratório de Física Aplicada do Departamento de Física e Biofísica da UNESP de Botucatu – SP. O PCS das cascas e dos resíduos (lenho) da espécie estudada foi determinado segundo a norma da ABNT NBR 8963. As amostras foram moídas e transformadas em pastilhas, que posteriormente foram secas em estufa à temperatura de 103 ± 5 °C obtendo uma massa seca (M_s) de aproximadamente de 1 g. Em seguida as pastilhas foram inseridas na bomba calorimétrica e efetuada a combustão. A constante do calorímetro (K) foi determinada previamente usando o ácido benzoico que possui poder calorífico superior definido de 6318 Kcal/kg. O valor médio encontrado para esta constante foi de 489 g. Para o cálculo do PCS em kcal/kg foram coletadas 18 amostras de cascas e resíduos nas florestas da empresa em estudo e utilizou-se a Equação (9). A massa de água (M_a), utilizada no calorímetro foi de 2500 g. E (Δt) representa o gradiente de temperatura antes e após a combustão.

$$\text{PCS} = \frac{(K + M_a)}{M_s} \cdot \Delta t \quad (9)$$

2.6.2. Poder calorífico inferior (PCI) das cascas e dos resíduos.

Segundo Brito et al. (2008), a relação entre o PCI e o PCS é regida pela quantidade de hidrogênio presente na composição química elementar da madeira. Considerando-se que, em geral, seu teor na madeira é constante (em torno de 6%), a energia a ser consumida

para a evaporação da água a ser formada durante a combustão será também constante: 324 Kcal/kg de água. Utilizou-se, portanto, a Equação (10) para determinação do PCI das cascas e dos resíduos:

$$\text{PCI} = \text{PCS} - 324 \quad (10)$$

onde PCI o poder calorífico inferior da amostra (kcal/kg).

2.6.3. Poder calorífico líquido (PCLu) das cascas e dos resíduos.

Ainda segundo Brito et al. (2008), na prática dificilmente a madeira será usada na condição anidra. É necessário considerar a água livre e a água higroscópica contida no seu interior. A água da madeira expressa pelo seu teor de umidade é talvez o fator que maior influência exerce sobre a liberação de energia. No processo de combustão, a primeira etapa consiste na sua vaporização, o que significa um dispêndio de energia da ordem de 600 Kcal/kg de água. Portanto, o teor de umidade representa poder calorífico negativo, pois para sua eliminação é necessária energia da própria madeira durante o processo de combustão. Tem-se, então, o denominado poder calorífico líquido (PCLu) das cascas e dos resíduos, definido por Brito et al. (2008) e adotado neste trabalho conforme apresentado na Equação (11).

$$\text{PCLu} = \text{PCI} \cdot \left(\frac{100 - u}{100} \right) - 6 \cdot u \quad (11)$$

onde PCLu é o poder calorífico líquido da amostra com teor de umidade u (kcal/kg), PCI o poder calorífico inferior da amostra (kcal/kg) e “ u ” o teor de umidade da amostra de casca ou resíduo com base em massa úmida (%).

2.7. Cálculos para aproveitamento das cascas, resíduos e equivalência dos custos com biomassa florestal adquirida de terceiros para geração da energia elétrica e térmica da empresa.

A quantidade de vapor que pode ser obtido com a queima das cascas e dos resíduos (atualmente descartados pela empresa) na caldeira de leito fluidizado foi abordada conforme recomendado por Pera (1990), com a utilização da Equação (12).

$$V = \frac{M_t \cdot 1000 \cdot \mu \cdot \text{PCLu}}{\Delta h} \quad (12)$$

onde V é a quantidade de vapor que se pode obter com a queima das cascas e dos resíduos na caldeira de leito fluidizado (kg/h), M_t a massa úmida das cascas ou dos resíduos atualmente descartados (t/h), μ o rendimento da caldeira de leito fluidizado (%), PCLu o poder calorífico líquido das cascas ou dos resíduos (kcal/kg) e Δh a diferença das entalpias entre o vapor gerado e a água de alimentação da caldeira de leito fluidizado (kcal/kg).

Os valores de entalpias do vapor gerado na caldeira de leito fluidizado e água de alimentação foram obtidos através do diagrama de Mollier apresentado por Perry (1974). A equivalência em biomassa adquirida de terceiros, economizada com a queima das cascas e resíduos descartados foi calculada aplicando-se a Equação (13).

$$M_{\text{biomassa}} = \frac{V}{I_{\text{consumo}}} \quad (13)$$

onde M_{biomassa} é a massa equivalente em biomassa úmida adquirida de terceiros, economizada com a queima das cascas e resíduos florestais (t/h), V a quantidade de vapor que se pode obter com a queima das cascas e dos resíduos (t/h) e I_{consumo} o índice de consumo de biomassa para produção de vapor na caldeira de leito fluidizado (t (vapor) / t (biomassa)).

O índice de consumo de biomassa para a produção de vapor na caldeira de leito fluidizado foi obtido com o auxílio dos dados referentes à produção de vapor nesta caldeira e o consumo da biomassa rejeitada na peneira oscilante do processo de fabricação mais a biomassa adquirida de terceiros, com aplicação da Equação (14).

$$I_{\text{consumo}} = \frac{P_{\text{vapor}}}{C_{\text{biomassa}}} \quad (14)$$

onde P_{vapor} é a média da produção de vapor da caldeira de leito fluidizado (t/mês) e C_{biomassa} a média do consumo de biomassa da caldeira de leito fluidizado (t/mês).

A energia elétrica obtida (co-geração) pela empresa com o vapor gerado utilizando-se as cascas e resíduos como combustíveis foi calculado com aplicação da Equação (15).

$$E_{\text{elétrica}} = \frac{V}{I_{\text{elétrica}}} \quad (15)$$

onde $E_{\text{elétrica}}$ é a energia elétrica que pode ser gerada com a queima das cascas e resíduos florestais (MWh) e $I_{\text{elétrica}}$ o índice de consumo de vapor para produção de energia elétrica nos turbo geradores 1 e 2 (t (vapor) / MWh (gerado)).

O índice de consumo de vapor para produção de energia elétrica foi obtido com auxílio dos dados referentes ao consumo de vapor e produção de energia elétrica (co-geração) dos turbo geradores 1 e 2, obtido com aplicação da Equação (16).

$$I_{\text{elétrica}} = \frac{C_{\text{vapor}}}{E_{\text{elétrica}}} \quad (16)$$

onde C_{vapor} é a média do consumo de vapor utilizado para co-geração de energia elétrica (t/mês) e $E_{\text{elétrica}}$ a

média de produção de energia elétrica gerada nos turbo geradores 1 e 2 (MWh/ mês).

A receita obtida pela empresa com a venda dos resíduos florestais a terceiros foi obtida multiplicando o preço de venda praticado pelo volume de resíduos vendidos. Para o cálculo da receita bruta equivalente a redução da quantidade de biomassa adquirida de terceiros com a utilização das cascas e resíduos, foi utilizado o custo médio mensal da biomassa adquirida de terceiros durante os meses de janeiro a outubro de 2011.

3 RESULTADO E DISCUSSÃO

3.1. Cálculo do aproveitamento das cascas como combustível para geração de energia elétrica e térmica da unidade industrial.

3.1.1. Geração média de cascas a serem retiradas das florestas.

A Tabela 1 contém os dados de consumo mensal de madeira sem casca consumida pela empresa Lwarcell Celulose no período de 12 meses. O valor médio mensal encontrado foi de 55898 ± 3971 toneladas conforme apresentado na tabela. O consumo médio anual de madeira sem casca foi obtida considerando o regime operacional da empresa de 11,67 meses/ano resultando um valor anual de 652330 toneladas.

Tabela 1 - Consumo mensal de madeira sem cascas da unidade fabril, segundo Lwarcel Celulose (2011-2012).

Meses	Consumo Mensal (t/mês)
abr-2011	59845
mai-2011	60228
jul-2011	61479
ago-2011	55350
set-2011	48641
out-2011	57487
nov-2011	51177
dez-2011	56222
jan-2012	54655
fev-2012	51562
mar-2012	58945
abr-2012	55189
Média	55898±3971

Consumo médio anual = 652330,00 t/ano. (11,67 meses/ano).

A Tabela 2 contém os valores de massa úmida de casca (Mucasca) sendo o valor médio apresentado na tabela de $98,41 \pm 53,12$ gramas e os valores da massa de madeira úmida sem casca (Musca), cujo valor médio encontrado foi de $661,70 \pm 370,73$ gramas.

O valor do índice de casca será a razão entre Mucasca e o valor de Musca (Equação 1). O valor encontrado foi de 0,1487.

Tabela 2 - (folha 1). Determinação da massa úmida da madeira com casca (Mucc), da massa úmida de madeira sem casca (Musc), volume de madeira com casca (Vcc), massa úmida de casca (Mucasca), massa de água (MH₂O) e teor de umidade com base em massa úmida (u) do gênero de *Eucalyptus* spp.

(continua)

Amostras	Mucc	Musc	Vcc	Mucasca	MH ₂ O	u
	(g)	(g)	(cm ³)	(g)	(g)	(%)
1	757,18	662,08	723,20	95,10	365,58	48,28
2	593,08	520,04	570,01	73,04	284,60	47,99
3	445,37	388,92	409,01	56,45	218,84	49,14
4	241,21	195,83	215,00	45,38	106,26	44,05
5	1025,18	907,35	955,50	117,83	501,28	48,90
6	667,87	588,75	615,40	79,12	322,38	48,27
7	531,89	450,67	477,60	81,22	237,54	44,66
8	218,44	183,35	194,90	35,09	96,89	44,36
9	1029,60	901,71	952,80	127,89	499,04	48,47
10	675,69	617,20	604,90	58,49	333,47	49,35
11	439,58	385,66	391,20	53,92	213,50	48,57
12	226,61	191,61	198,80	35,00	106,13	46,83
13	1003,68	895,95	926,30	107,73	503,32	50,15
14	746,71	662,12	675,80	84,59	360,68	48,30
15	435,91	380,81	391,70	55,10	206,92	47,47
16	324,46	262,75	287,60	61,71	146,63	45,19
17	890,73	738,81	824,00	151,92	421,48	47,32
18	706,59	608,50	669,00	98,09	344,30	48,73
19	359,91	306,70	341,90	53,21	173,17	48,11
20	157,31	129,42	141,20	27,89	76,58	48,68
21	1067,87	894,94	1003,20	172,93	530,70	49,70
22	704,35	608,00	667,50	96,35	352,30	50,02
23	451,84	384,57	434,30	67,27	222,57	49,26
24	185,83	154,21	174,50	31,62	91,19	49,07
25	949,36	837,55	870,50	111,81	462,32	48,70
26	700,11	619,39	634,70	80,72	335,39	47,91
27	477,45	418,98	426,20	58,47	227,98	47,75
28	210,78	176,36	187,70	34,42	98,77	46,86
29	937,24	825,46	855,20	111,78	451,90	48,22
30	671,83	624,25	607,40	47,58	341,69	50,86
31	466,48	419,69	418,60	46,79	228,77	49,04
32	198,89	166,57	174,30	32,32	92,14	46,33
33	1601,23	1353,82	1513,30	247,41	772,94	48,27
34	1291,53	1104,09	1245,10	187,44	608,82	47,14
35	604,30	501,71	572,50	102,59	274,13	45,36
36	357,35	291,31	320,60	66,04	156,23	43,72
37	1372,60	1158,54	1267,90	214,06	668,65	48,71
38	1141,14	962,90	1081,20	178,24	532,44	46,66
39	769,40	636,84	724,90	132,56	338,27	43,97
40	371,95	300,78	336,90	71,17	172,93	46,49

Tabela 2 - (folha 2). Determinação da massa úmida da madeira com casca (Mucc) da massa úmida de madeira sem casca (Musc), volume de madeira com casca (Vcc), massa úmida de casca (Mucasca), massa de água (MH₂O) e teor de umidade com base em massa úmida (u) do gênero de *Eucalyptus* spp.

(conclusão)

Amostras	Mucc (g)	Musc (g)	Vcc (cm ³)	Mucasca (g)	MH ₂ O (g)	u (%)
41	1316,14	1169,23	1195,90	146,91	627,33	47,66
42	826,84	754,28	746,60	72,56	400,70	48,46
43	528,84	468,51	474,40	60,33	249,57	47,19
44	278,88	233,59	244,60	45,29	126,07	45,21
45	1391,33	1232,74	1277,50	158,59	681,41	48,98
46	953,92	861,46	869,40	92,46	467,70	49,03
47	616,48	541,57	557,90	74,91	295,42	47,92
48	314,51	265,81	276,90	48,70	144,22	45,86
49	1825,02	1570,8	1707,00	254,22	915,24	50,15
50	1175,67	1015,1	1116,00	160,57	568,77	48,38
51	740,96	624,53	721,30	116,43	341,05	46,03
52	378,86	305,06	347,60	73,80	176,52	46,59
53	1606,44	1391,46	1513,80	214,98	826,19	51,43
54	1049,28	910,28	1028,80	139,00	521,50	49,70
55	634,91	534,32	607,00	100,59	302,80	47,69
56	334,49	276,18	304,10	58,31	163,70	48,94
57	1559,40	1383,94	1475,20	175,46	779,60	49,99
58	1149,29	1027,67	1078,00	121,62	558,01	48,55
59	823,14	708,38	756,10	114,76	364,25	44,25
60	421,05	355,62	384,20	65,43	192,32	45,68
61	1707,97	1511,33	1563,10	196,64	815,31	47,74
62	1350,28	1210,27	1229,60	140,01	643,79	47,68
63	784,72	690,53	694,50	94,19	358,27	45,66
64	422,83	352,42	377,70	70,41	191,61	45,32
65	1397,32	1240,14	1302,20	157,18	704,12	50,39
66	873,01	786,84	797,80	86,17	442,49	50,69
67	609,64	546,35	548,40	63,29	308,79	50,65
68	352,04	301,35	316,50	50,69	168,74	47,93
69	1304,52	1173,62	1209,40	130,9	683,64	52,41
70	973,94	885,66	891,90	88,28	507,63	52,12
71	683,12	608,96	613,20	74,16	335,24	49,07
72	334,82	286,16	298,60	48,66	164,17	49,03
Média	760,11±420,05	661,70±370,73	702,88±395,81	98,41±53,12	368,12±209,91	48,43±1,94

Como o valor anual encontrado para o consumo de madeira sem casca apresentado na Tabela 1 foi de 652330 toneladas, a quantidade de casca gerada no período de um ano foi determinada multiplicando este valor pelo índice de casca, encontrando um valor aproximado de 97000 toneladas por ano.

Conforme as normas e procedimentos adotados pelas empresas brasileiras como a empresa Areva Kobritz, podem ser retiradas 70% das cascas do povoamento florestal sendo que 30% desse material deve ser incorporado ao solo para auxiliar na manutenção da sua fertilidade. Assim a quantidade de casca a ser retirada do solo será de 67900 toneladas anuais.

Passando para toneladas mensais no regime adotado de 11,67 meses por ano, obtém-se um valor de produção de casca de 5818,34 toneladas meses, o que resulta um valor de 8,08 toneladas por hora.

3.1.2. Teor de umidade com base em massa úmida das cascas.

Os valores de umidade com base em massa úmida das cascas estão apresentados na Tabela 3. O valor médio encontrado foi de 20,52±1,54%.

Tabela 3 - Massa úmida de casca (Muc), massa seca de casca (M0c), massa de água (MH₂O) e teor de umidade com base em massa úmida (u) das amostras de cascas de *Eucalyptus* spp.

Amostra	Muc (g)	M0c (g)	MH ₂ O (g)	U (%)
1	89,33	71,85	17,48	19,57
2	85,50	67,28	18,22	21,31
3	67,49	55,25	12,24	18,14
4	78,31	63,78	14,53	18,55
5	68,82	55,11	13,71	19,92
6	77,28	60,21	17,07	22,09
7	82,77	65,78	16,99	20,53
8	92,04	73,38	18,66	20,27
9	71,35	55,07	16,28	22,82
10	59,61	48,34	11,27	18,91
Média	77,25±10,42	61,61±8,17	15,61±2,56	20,21±1,52

3.1.3. Poder calorífico das cascas.

Os valores médios de Poder Calorífico, obtidos com aplicação das Equações (9), (10), (11) e Tabela 4, foram:

PCS = 18,88 MJ/kg = 4514 kcal/kg, PCI = 17,53 MJ/kg = 4190 kcal/kg e PCLu = 13,48 MJ/kg = 3222 kcal/kg.

Tabela 4 - Poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico líquido (PCLu) das amostras de cascas de *Eucalyptus* spp para teor de umidade com base em massa úmida de 20,21%.

Amostras de Cascas	PCS		PCI		PCLu	
	(MJ/kg)	(kcal/kg)	(MJ/kg)	(kcal/kg)	(MJ/kg)	(kcal/kg)
1	18,90	4517	17,55	4193	13,49	3225
2	19,00	4542	17,65	4218	13,57	3244
3	18,55	4433	17,19	4109	13,21	3157
4	18,76	4484	17,40	4160	13,38	3198
5	18,74	4480	17,39	4156	13,37	3195
6	18,57	4438	17,21	4114	13,23	3161
7	18,52	4427	17,17	4103	13,19	3152
8	18,56	4435	17,20	4111	13,22	3159
9	18,97	4533	17,61	4209	13,55	3237
10	18,76	4484	17,40	4160	13,38	3198
11	19,87	4750	18,52	4426	14,27	3410
12	19,80	4731	18,44	4407	14,21	3395
13	19,69	4707	18,34	4383	14,12	3376
14	18,49	4420	17,14	4096	13,17	3147
15	18,49	4419	17,13	4095	13,16	3146
16	19,06	4555	17,70	4231	13,62	3254
17	18,54	4431	17,18	4107	13,20	3156
18	18,66	4460	17,30	4136	13,30	3179
Média	18,88±0,45	4514±108	17,53±0,45	4190±108	13,48±0,36	3222±86

3.1.4. Quantidade de vapor que pode ser produzido com a queima das cascas.

Nas condições operacionais da caldeira de leito fluidizado, foram determinadas: Pressão do vapor na saída da caldeira = 8,14 MPa (83 kgf/cm²), temperatura do vapor na saída da caldeira = 475 °C, entalpia do vapor na saída da caldeira = 975,5 kcal/kg, temperatura da água de alimentação da caldeira = 120,0 °C e a entalpia da água de alimentação = 120,28 kcal/kg. Aplicando-se a Equação (12) tem-se: $M_{casca} = 8,08$ t/h, $\mu = 0,78$ (rendimento da caldeira 78 %), $PCL_u = 3222$ kcal/kg, $\Delta h = 855,22$ kcal/kg (975,5 - 120,28), resultando $V = 23744$ kg/h = 23,74 t/h (vapor superaquecido a 8,14 MPa).

3.1.5. Massa de biomassa adquirida de terceiros que se pode economizar com a queima das cascas na caldeira de leito fluidizado.

Com aplicação da Equação (14) e auxílio da Tabela 5, foi calculado o índice de consumo (Iconsumo) de biomassa na caldeira de leito fluidizado, sendo: $P_{vapor} = 46699$ t/mês, $C_{biomassa} = 16879$ t/mês, $I_{consumo} = 2,77$ t(vapor)/t(biomassa). Com aplicação da Equação (13) tem-se: $V = 23,74$ t/h, $M_{biomassa} = 8,57$ t/h (6170 t/mês).

Tabela 5 - Produção de vapor (P_{vapor}), consumo de biomassa ($C_{biomassa}$) e índice de consumo de biomassa ($I_{consumo}$) da caldeira de leito fluidizado, segundo Lwarcel Celulose (2011-2012).

Período	Produção de Vapor (P_{vapor})	Biomassa da Peneira Oscilante	Biomassa de Terceiros	Total de Biomassa ($C_{biomassa}$)	Índice de consumo ($I_{consumo}$)
(mês)	(t/mês)	(t/mês)	(t/mês)	(t/mês)	(tvapor/tbiomassa)
abr-11	49013	836	17983	18819	2,60
mai-11	48975	957	19810	20767	2,36
jul-11	46896	861	13960	14821	3,16
ago-11	47484	913	15619	16532	2,87
set-11	45507	1290	13773	15063	3,02
out-11	44926	889	14733	15622	2,88
nov-11	44508	776	15019	15795	2,82
dez-11	44728	939	16206	17145	2,61
jan-12	44333	794	15664	16458	2,69
fev-12	42718	682	15141	15823	2,70
mar-12	46712	743	16043	16786	2,78
abr-12	54591	740	18182	18922	2,89
Média	46699±3136	868±158	16011±1807	16879±1780	2,77±0,21

3.2. Cálculo do aproveitamento dos resíduos florestais vendidos a terceiros como combustível para geração de energia elétrica e térmica da unidade industrial.

3.2.1. Geração média de resíduos florestais vendidos a terceiros.

Com base nos dados apresentados nas Tabelas 2 e 6, aplicação das Equações (4), (5) e (6) e informações quantitativas sobre a geração de resíduos, foi determinado: $I_m = 8$ m³st/ha, $A_m = 3006,87$ ha/ano resultando: $V_{resíduo} = 24055$ m³st/ano e $I_s = 4,00$ m³st/ha, $A_s = 577,38$ ha/ano resultando: $V_{resíduo} = 2310$ m³st/ano, totalizando: $V_{resíduo} = 26365$ m³st/ano. Sendo $1m^3 = 1,5$ m³st, $V_{resíduo} = 17577$ m³/ano (madeira sólida), $presíduo = 1081$ kg/m³, e regime operacional da empresa, teremos: $M_{resíduo} = 19000$ t/ano ou 2,26 t/h (massa úmida).

Tabela 6 - Área florestal da colheita mecanizada (A_m), da colheita semi-mecanizada (A_s) praticada pela empresa, segundo Lwarcel Celulose (2012).

Ano	Total (ha/ano)	Mecanizada (A_m) (ha/ano)	Semi-mecanizada (A_s) (ha/ano)
2009	3471,95	2833,55	638,40
2010	3694,94	3115,50	579,44
2011	3585,85	3071,57	514,28
Média	3584,25±111,5	3006,87±151,7	577,38±62,09

3.2.2. Teor de umidade com base em massa úmida dos resíduos.

Com aplicação das Equações (7) e (8) e auxílio da Tabela 2 determinou-se: Mucc = 760,11 g, MH₂O = 368,12 g, resultando u = 48,43 %.

3.2.3. Poder calorífico dos resíduos.

Os valores médios de Poder Calorífico obtidos com aplicação das Equações (9), (10), (11) e dados apresentados na Tabela 7, foram: PCS = 20,14 MJ/kg = 4813 kcal/kg, PCI = 18,78 MJ/kg = 4489 kcal/kg e PCLu = 8,47 MJ/kg = 2025 kcal/kg.

Tabela 7 - Poder calorífico superior (PCS), poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico líquido (PCLu) das amostras dos resíduos de *Eucalyptus* spp para teor de umidade com base em massa úmida de 48,43%.

Amostras de Resíduos	PCS		PCI		PCLu	
	(MJ/kg)	(kcal/kg)	(MJ/kg)	(kcal/kg)	(MJ/kg)	(kcal/kg)
1	20,04	4790	18,69	4466	8,42	2013
2	20,21	4831	18,86	4507	8,51	2034
3	20,44	4886	19,09	4562	8,63	2062
4	20,37	4869	19,02	4545	8,59	2053
5	19,97	4773	18,61	4449	8,38	2004
6	20,00	4779	18,64	4455	8,40	2007
7	20,21	4830	18,85	4506	8,51	2033
8	20,21	4830	18,85	4506	8,51	2033
9	20,01	4782	18,65	4458	8,40	2009
10	19,92	4760	18,56	4436	8,36	1997
11	20,35	4864	18,99	4540	8,58	2051
12	20,55	4911	19,19	4587	8,68	2075
13	19,91	4758	18,55	4434	8,35	1996
14	20,12	4808	18,76	4484	8,46	2022
15	19,94	4765	18,58	4441	8,37	2000
16	20,44	4885	19,08	4561	8,63	2062
17	19,77	4725	18,42	4401	8,28	1979
18	20,06	4794	18,70	4470	8,43	2015
Média	20,14±0,22	4813±53	18,78±0,22	4489±53	8,47±0,11	2025±27

3.2.4. Quantidade de vapor que pode ser produzido com a queima dos resíduos.

Nas condições operacionais da caldeira de leito fluidizado descritas (Item 3.1.4.) e aplicação da Equação (12) tem-se: M_{resíduo} = 2,26 t/h, $\mu = 0,78$ (rendimento da caldeira 78 %), PCLu = 2025 kcal/kg, $\Delta h = 855,22$ kcal/kg (975,5 - 120,28), resultando V = 4174 kg/h = 4,17 t/h (vapor superaquecido a 8,14 MPa).

3.2.5. Massa de biomassa adquirida de terceiros que se pode economizar com a queima dos resíduos na caldeira de leito fluidizado.

De maneira similar à calculada para as cascas com aplicação das Equações (13), (14) e auxílio da Tabela 5 tem-se: V = 4,17 t/h, I_{consumo} = 2,77 t(vapor)/t(biomassa), resultando: massa de biomassa que

pode ser economizada M_{biomassa} = 1,51 t/h (1087 t/mês).

3.3. Cálculo da energia elétrica que pode ser obtida com o aproveitamento das cascas e resíduos descartados pela empresa.

Com aplicação da Equação (16) foram obtidos os dados da Tabela 8. Foram determinados: o consumo de vapor e energia elétrica gerada sendo: no turbo gerador 1 de 86429 t/mês, e11187 MWh/mês e turbo gerador 2 de 49834 t/mês 5287 MWh/mês totalizando C_{vapor} igual a 136263 t/mês e E_{elétrica} igual a 16474 MWh/mês resultando um índice de energia elétrica de (E_{elétrica}) igual a 8,27 t(vapor)/MWh. O vapor obtido com a queima das cascas e resíduos foi de (23,74+4,17), V = 27,91 t/h e com aplicação da Equação (15) determinou-se: E_{elétrica} = 3,37 MWh/h (2430 MWh/mês).

Tabela 8 - Consumo de vapor e geração de energia elétrica nos turbo geradores da empresa, segundo Lwarcel Celulose (2012).

Período	TURBO GERADOR 1		TURBO GERADOR 2	
	Consumo de Vapor	Energia Gerada	Consumo de Vapor	Energia Gerada
(mês-ano)	(t/mês)	(MWh/mês)	(t/mês)	(MWh/mês)
abr-11	75848	9927	56559	6957
mai-11	82830	11025	50328	5306
jul-11	91185	11858	45628	4437
ago-11	89236	11587	46542	4571
set-11	87071	11110	45215	4446
out-11	89171	11472	47724	4727
nov-11	86608	11274	48164	4709
dez-11	86040	11146	48998	5053
jan-12	89319	11558	50208	4947
fev-12	84617	10799	47055	4733
mar-12	88791	11306	49693	5106
abr-12	86437	11178	61899	8455
Média	86429±4053	11187±488	49834±4831	5287±1203

3.4. Determinação da receita atualmente obtida pela empresa com a venda dos resíduos florestais a terceiros.

A receita atualmente obtida pela empresa com a venda dos resíduos gerados na colheita mecanizada foi: valor de venda R\$ 3/m³st, volume de resíduo Vresíduo = 24055 m³st/ano, receita R\$ 72165,00/ano. Receita obtida da colheita semi-mecanizada: valor de venda R\$ 35,00/m³st, volume de resíduo Vresíduo = 2310 m³st/ano, receita R\$ 80850,00/ano. A receita total obtida: R\$ 153015,00/ano.

3.5. Determinação da receita bruta que pode ser obtida pela empresa com a queima das cascas e dos resíduos florestais na caldeira de leito fluidizado.

Os valores da massa de biomassa economizada com a queima das cascas e resíduos foram: Mbiomassa = 7257 t/mês = 84689 t/ano (itens 3.1.5. + 3.2.5.), custo unitário com biomassa adquirida de terceiros R\$ 109,12/ t (Tabela 9). A receita bruta obtida com a queima das cascas e resíduos considerando a receita obtida com a venda (item 3.4.) apresentou o valor de: (84689 x 109,12) - 153015,00, resultando: R\$ 9,09 x 10⁶/ ano (nove milhões e noventa mil reais por ano).

Tabela 9 - Custo unitário da biomassa adquirida de terceiros, utilizada como combustível na caldeira de leito fluidizado, segundo Lwarcel Celulose (2012).

Período meses de 2012	Custo da Biomassa (R\$/t)
Jan.	106,30
Fev.	107,40
Mar.	107,60
Abr.	109,00
Mai.	109,20
Jun.	108,70
Jul.	111,10
Ago.	110,30
Set.	110,90
Out.	110,70
Média	109,12±1,65

4 CONCLUSÕES

Os resultados da pesquisa permitiram concluir que:

- O aproveitamento dos resíduos e 70% das cascas geradas nas florestas da empresa para geração de energia térmica e elétrica representou uma receita bruta de R\$ 9,09x10⁶ por ano (nove milhões e noventa mil reais por ano);

b) A média de energia elétrica a ser gerada com a queima dos resíduos e 70% das cascas representou 15% da energia elétrica total gerada pela empresa;

c) O procedimento adotado neste trabalho pode ser adotado por outras empresas do ramo madeireiro representando economia para as mesmas e consequentemente uma redução de seus custos com biomassa.

d) É extremamente importante que cada empresa aproveite seus próprios resíduos para a geração da sua própria energia evitando assim problemas de movimentação e descarte desse material evitando danos ambientais.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRITO, J. O. et al. Florestas energéticas. In: ALBUQUERQUE, A. C. S.; SILVA, A. G. **Agricultura tropical: quatro décadas de inovação tecnológicas, institucionais e políticas**. Brasília: Embrapa Informações Tecnológicas, 2008. v. 1, pt 8, cap. 3, p. 735-751.

BRITO, J. O. O uso energético da madeira. **Estudos Avançados.**, São Paulo, v. 21, n. 59, abr. 2007. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=SO103-40142007000100015&Ing=en&nrm=iso>. acesso em: 01 Dez. 2012.

DO CANTO, J. L. **Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia**. 2009. 121 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. MG. 2009.

GOLDEMBERG, J. **Energia, meio ambiente & desenvolvimento**. São Paulo: Editora USP, 1998. 125 p.

MACEDO, I. C. **Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil: situação atual, oportunidades de desenvolvimento**. Brasília, DF: CGEE, 2001. 10 p.

PERA, H. **Geradores de vapor: um compêndio sobre conversão de energia com vistas à preservação da ecologia**. 2. ed. São Paulo: Fama, 1990. 571 p.

PEREIRA JÚNIOR, V. B. **Alternativas para a co-geração de energia de uma indústria de chapas de fibra de madeira**. 2001. 115 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

ARNOLD, H.R. Propiedades físicas y químicas de las sustancias. En: PERRY, R.H.; GREEN, D.W.; MALONEY, J.O., (Eds). **Perry: Manual del ingeniero químico**. 6. ed. México: McGraw-Hill, 1992. vol. 1. Sec. 3. p.416-419.