



**UDESC**

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS - CAV  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**QUALIDADE DA BIOMASSA FLORESTAL  
UTILIZADA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA POR  
UMA UNIDADE COGERADORA EM LAGES-SC**

**TAMIRES LIZA DEBONI**

**LAGES, 2017**



**TAMIRES LIZA DEBONI**

**QUALIDADE DA BIOMASSA FLORESTAL UTILIZADA PARA GERAÇÃO DE  
ENERGIA POR UMA UNIDADE COGERADORA EM LAGES-SC**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Ciências Ambientais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, da Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC.

Orientador: Dr. Flávio José Simioni  
Coorientadora: Dra. Martha Andreia Brand

**LAGES, SC**

**2017**

Ficha catalográfica elaborada pelo(a) autor(a), com  
auxílio do programa de geração automática da  
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC

Deboni, Tamires Liza

Qualidade da biomassa florestal utilizada para  
geração de energia por uma unidade cogeneradora em  
Lages-SC / Tamires Liza Deboni. - Lages , 2017.  
82 p.

Orientador: Flávio José Simioni

Co-orientadora: Martha Andreia Brand

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado  
de Santa Catarina, Centro de Ciências  
Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em  
Ciências Ambientais, Lages, 2017.

1. Qualidade da biomassa florestal. 2. Pagamento  
por qualidade. 3. Geração de energia. I. Simioni,  
Flávio José. II. Brand, Martha Andreia. , .III.  
Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de  
Ciências Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação  
em Ciências Ambientais. IV. Título.

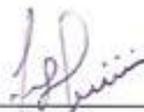
TAMIRES LIZA DEBONI

**QUALIDADE DA BIOMASSA FLORESTAL UTILIZADA PARA GERAÇÃO DE  
ENERGIA POR UMA UNIDADE COGERADORA EM LAGES-SC**

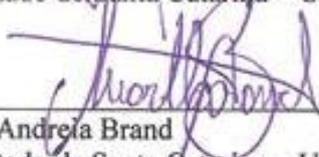
Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Ciências Ambientais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais, da Universidade do Estado de Santa Catarina.

**Banca examinadora:**

Orientador: \_\_\_\_\_

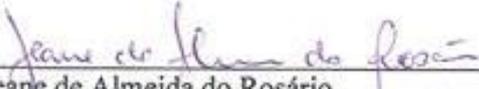
  
Prof. Dr. Flávio José Simioni  
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC/CAV

Coorientadora: \_\_\_\_\_

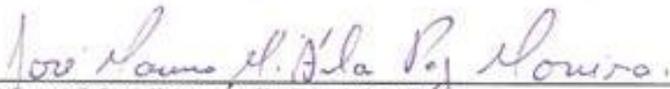
  
Profa. Dra. Martha Andreia Brand  
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC/CAV

Membros:

\_\_\_\_\_

  
Profa. Dra. Jeane de Almeida do Rosário  
Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC/CAV

\_\_\_\_\_

  
Dr. José Mauro Magalhães Ávila Paz Moreira  
EMBRAPA Florestas

Lages, 17 de julho de 2017.

À Deus acima de todas as coisas e à minha amada família por Ele concedida. De forma especial aos meus pais Candido e Miguélina por serem minha força e amparo,

Dedico.

## AGRADECIMENTOS

Por todas as orações e pedidos atendidos e pela força sempre renovada em minha fé, meu primeiro e principal agradecimento à Deus.

Aos meus pais, Candido Deboni e Miguélina B. Deboni pelos infinitos colos e amor nos momentos de dificuldade, pela presença contínua em todas as atividades da minha vida, por vibrarem e valorizarem cada pequena conquista e por orarem incansavelmente pelo nosso bem. Obrigada de todo meu coração: amo vocês de forma tão grandiosa, que me extravasa!

Agradeço às minhas irmãs Tarita C. Deboni e Taiana M. Deboni, minhas melhores amigas e companheiras: obrigada pelas longas conversas, pelo apoio, incentivo, cuidado e amor dessa vida inteira. Saber que tenho vocês me conforta e me inspira. Agradeço também aos meus cunhados Murilo e Felipe pelo carinho, trocas de conhecimentos, momentos de descontração e por sempre me receberem de portas abertas.

Às minhas sobrinhas amadas Marina e Bruna, minhas fontes de boas energias e paz. Cada sorriso e minuto junto com vocês renova minhas forças!

Agradeço em especial a todos os meus familiares e padrinhos que sempre acreditaram nas minhas conquistas e que não mediram esforços e orações para que tudo desse certo.

Ao meu orientador Prof. Flávio José Simioni e minha coorientadora Profa. Martha Andreia Brand que gentilmente nunca negaram seu auxílio, tiveram paciência nas dificuldades sempre oferecendo-se para ajudar, e dedicação, empenho e ética exemplares para meu presente e futuro profissional. Obrigada pelos incentivos e confiança depositados à mim!

Agradeço aos meus amigos do Laboratório de Gestão e Economia Ambiental (LabGEA): Roni Severis, Júlia Wahrlich, Lucas Sartor, Artur Almeida, por toda ajuda, descontração e ouvido solidário nas necessidades. De forma mais especial, agradeço ao meu parceiro da mesa ao lado, Gustavo Jarenkow, pelas caronas, companheirismo e amizade de longa data. Às amigas Flávia Arcari e Sandy Giroto e ao amigo Ricardo Vieira pelas infinitas horas de conversas, proteção, força e estímulo para seguir em frente, palavras não serão suficientes por tamanha gratidão.

À todos os amigos que de perto ou de longe fizeram-se presentes, apoiando com palavras e bons sentimentos. Cito aqui Josiani Oliveira, Vitor Becegato e Bruna Mariá.

À Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC/CAV, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e a todos os colegas da primeira turma do Mestrado. Agradeço ainda ao Programa de Monitoria na Pós-Graduação (PROMOP) pela concessão da bolsa de estudos.

Aos professores Valter Antônio Becegato, Valdeci José Costa e Jeane de Almeida do Rosário pelo suporte à pesquisa, ajuda e soma de experiências tornando este período mais valioso.

À Hochschule-Stralsund, pela oportunidade de participação no curso *Future Sustainable Energy Supply*.

Agradeço imensamente à Unidade de Cogeração Lages (UCLA) da ENGIE Brasil Energia, sendo aqui representada por José Luiz dos Santos Dutra, pelo fornecimento dos dados, suporte e informações prestados sempre de forma gentil e atenciosa.

Um agradecimento especial a todos aqueles que de alguma forma contribuíram com essa trajetória e que certamente tem toda a minha gratidão.

“Conheça todas as teorias, domine todas as técnicas, mas ao tocar uma alma humana, seja apenas outra alma humana.”

(Carl Gustav Jung)



## RESUMO

A região de Lages é um importante polo do setor florestal no estado de Santa Catarina. A economia da região é amplamente voltada à base florestal, indústrias de celulose e papel e de transformação da madeira em diferentes produtos. Em decorrência de tais usos, há um significativo volume de resíduos gerados pelas atividades produtivas. Este estudo teve como objetivo analisar a qualidade da biomassa florestal utilizada para geração de energia pela Unidade de Cogeração Lages (UCLA) da ENGIE Brasil Energia, considerando um banco de dados de parâmetros de qualidade: teor de umidade (TU), teor de cinzas (TC) e poder calorífico. Esta dissertação foi estruturada com dois capítulos correspondentes aos objetivos: o capítulo 2 contemplando o artigo intitulado como “Qualidade da biomassa florestal para geração de energia em uma unidade de cogeração” e, o capítulo 3 corresponde ao artigo “Influência da qualidade sobre o preço da biomassa florestal utilizada para a geração de energia em Lages – SC”. No primeiro artigo, foi analisada a qualidade da biomassa florestal utilizada pela UCLA entre os anos de 2005 a 2015 por meio de um banco de dados com 4.937 amostras. Os resultados indicam que houve melhoria na qualidade do combustível fornecido para a UCLA, percebido pela diminuição dos TU e TC e consequente aumento do Poder Calorífico Líquido (PCL). O TU do mix manteve-se abaixo do valor limítrofe, diminuindo seu valor ao longo do período de operação da planta, indicando possível evolução no processamento e tratamento da biomassa. A média para TC ficou acima do limite de 2% para a maioria da biomassa, inclusive do mix. No segundo artigo, foram propostos dois modelos de pagamento para aquisição da biomassa florestal considerando o conteúdo energético do material. O Modelo 1, baseia-se no PCL estimado considerando o TU e TC da biomassa; e, o Modelo 2, com o desconto do TC sobre o peso seco de biomassa e posterior estimativa do PCL considerando o TU. Para ambos os modelos foi proposta a aplicação de taxas progressivas de bônus para os materiais com PCL superior a 1.850 kcal/kg ou de desconto para os materiais com PCL inferior. Os modelos propostos podem ser utilizados para estimular a melhoria de qualidade da biomassa, podendo gerar benefícios econômicos tanto para os fornecedores (preço maior), como para a usina (maior rendimento operacional). Isto tende a provocar mudanças no comportamento dos fornecedores no sentido de melhoria da qualidade da biomassa.

**Palavras-chave:** Qualidade da biomassa florestal. Pagamento por qualidade. Geração de energia.



## ABSTRACT

The Lages region is an important pole of the forestry sector in the state of Santa Catarina. The economy of the region is largely focused on the forest base, pulp and paper industries and the transformation of wood into different products. As a result of these uses, there is a significant volume of waste generated by productive activities. The objective of this study was to analyze the quality of the forest biomass used for energy generation by the Lages Cogeneration Unit (UCLA) of ENGIE Brasil Energia, considering a database of quality parameters: moisture content, ash content and calorific value. This dissertation was structured with two chapters corresponding to the objectives: chapter 2 contemplating the article entitled "Quality of forest biomass for power generation in a cogeneration plant", and chapter 3 corresponds to the article "Influence of quality on the price of forest biomass used for energy generation in Lages - SC ". In the first article, the quality of forest biomass used by UCLA between 2005 and 2015 was analyzed through a database with 4,937 samples. The results indicate that there was an improvement in the quality of fuel supplied to UCLA, perceived by the decrease of moisture content (TU) and ashes (TC) and consequent increase of the Net Calorific Value (PCL). The TU of the mix remained below the limit value, decreasing its value throughout the period of operation of the plant, indicating possible evolution in the processing and treatment of biomass. The mean for TC was above the 2% limit for most biomass, including the mix. In the second article, two payment models were proposed for the acquisition of forest biomass considering the energy content of the material. Model 1 is based on the multiple linear regression equation considering the TU and TC of the biomass and Model 2 discounts the TC of the biomass dry weight and, later, is based on the simple linear regression equation considering the TU. For both models it was proposed the application of progressive bonus rates for materials with PCL higher than 1,850 kcal/kg or discount for materials with lower PCL. The proposed models can be used to stimulate the improvement of biomass quality, which can generate economic benefits for both suppliers (higher price) and for the plant (higher operating efficiency). This tends to encourage changes in the behavior of suppliers in the sense of improving the quality of biomass.

**Keywords:** Quality of forest biomass. Payment by quality. Power generation.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Quantidades de biomassa consumidas pela UCLA de 2005 a 2015.....	29
Figura 2 – Boxplot para comparação do TU entre os grupos contendo os tipos de biomassa estudados .....	31
Figura 3 – Evolução do teor de umidade (%) do material casca ao longo do período de fornecimento à UCLA .....	32
Figura 4 – Evolução do teor de umidade (%) do material cavaco ao longo do período de fornecimento à UCLA .....	33
Figura 5 – Evolução do teor de umidade (%) da serragem ao longo do período de fornecimento à UCLA .....	34
Figura 6 – Evolução do teor de umidade (%) do blend (mix) ao longo do período de fornecimento à UCLA .....	34
Figura 7 – Boxplot para comparação do TC entre os grupos contendo os tipos de biomassa estudados .....	36
Figura 8 – Evolução do teor de cinzas (%) da casca ao longo do período de fornecimento à UCLA .....	37
Figura 9 – Evolução do teor de cinzas (%) do cavaco ao longo do período de fornecimento à UCLA .....	38
Figura 10 – Evolução do teor de cinzas (%) da serragem ao longo do período de fornecimento à UCLA .....	39
Figura 11 – Evolução do teor de cinzas (%) do blend (mix) ao longo do período de fornecimento à UCLA .....	39
Figura 12 – Boxplot para comparação do PCL entre os grupos contendo os tipos de biomassa estudados .....	41
Figura 13 – Evolução do poder calorífico líquido (kcal/kg) da casca ao longo do período de fornecimento à UCLA .....	42
Figura 14 – Evolução do poder calorífico líquido (kcal/kg) do cavaco ao longo do período de fornecimento à UCLA .....	43
Figura 15 – Evolução do poder calorífico líquido (kcal/kg) da serragem ao longo do período de fornecimento à UCLA .....	43
Figura 16 – Evolução do poder calorífico líquido (kcal/kg) do blend (mix) ao longo do período de fornecimento à UCLA .....	44
Figura 17 – Esquema de etapas dos Modelos 1 e 2 para pagamento da biomassa florestal.....	59

Figura 18 – Preços por PCL para cavaco considerando o pagamento por peso e pelo Modelo 1 .....	60
Figura 19 – Pagamento por qualidade do cavaco segundo o modelo 2: a) Peso Líquido do cavaco com DC normal e DC com diferentes taxas (i); b) Relação entre PCL e TU; c) Relação entre preço por tonelada de material com variação do TU.....	61
Figura 20 – Comparação do preço do cavaco segundo os critérios de peso, PCL e PCL com bônus/desconto .....	63
Figura 21 – Preços por PCL para serragem pelo Modelo 1 .....	64
Figura 22 – Pagamento por qualidade da serragem segundo o modelo 2: a) Peso Líquido da serragem com DC normal e DC com diferentes taxas (i); b) Relação entre PCL e TU; c) Relação entre preço por tonelada de material com variação do TU.....	65
Figura 23 – Comparação do preço da serragem segundo os critérios de peso, PCL e PCL com bônus/desconto .....	66
Figura 24 – Preços por PCL para casca pelo Modelo 1 .....	68
Figura 25 – Pagamento por qualidade da casca segundo o modelo 2: a) Peso Líquido da casca com DC normal e DC com diferentes taxas (i); b) Relação entre PCL e TU; c) Relação entre preço por tonelada de material com variação do TU.....	69
Figura 26 – Comparação do preço da casca segundo os critérios de peso, PCL e PCL com bônus/desconto para casca para o Modelo 2 .....	70
Figura 27 - Comparação do preço por peso correspondente ao PCL para casca, cavaco e serragem para: a) Modelo 1 e, b) Modelo 2 .....	71
Figura 28 – Comparação entre os valores finais para as amostras do banco de dados considerando 10 toneladas de material: a) para cavaco; b) para serragem; c) para casca.....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Quantidade de amostras por tipo de biomassa florestal e seus respectivos períodos de fornecimento para a UCLA.....	27
Tabela 2 - Teores de umidade da biomassa florestal utilizada para geração de energia na UCLA .....	31
Tabela 3 - Valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação dos teores de cinzas dos materiais .....	36
Tabela 4 – Valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação do Poder Calorífico Líquido dos materiais .....	41
Tabela 5 – Taxas de crescimento (i) propostas empiricamente para o cálculo do DC para cada tipo de material .....	57
Tabela 6 – Exemplos de Bônus/Desconto para cavaco, serragem e casca .....	58
Tabela 7 – Exemplos de cálculo do valor total para diferentes TC e TU de cavaco.....	63
Tabela 8 – Exemplos de cálculo do valor total para diferentes TC e TU de serragem .....	67
Tabela 9 – Exemplos de cálculo do valor total para diferentes TC e TU de casca .....	72

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

<b>BEN</b>	Balanco Energético Nacional
<b>DC</b>	Desconto de cinzas
<b>EPE</b>	Empresa de Pesquisa Energética
<b>EQM</b>	Erro Quadrático Médio
<b>MME</b>	Média Móvel Exponencial
<b>PC</b>	Poder Calorífico
<b>PCI</b>	Poder Calorífico Inferior
<b>PCL</b>	Poder Calorífico Líquido
<b>PCS</b>	Poder Calorífico Superior
<b>TC</b>	Teor de Cinzas
<b>TU</b>	Teor de Umidade
<b>UCLA</b>	Unidade de Cogeração Lages

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	19
1.1. OBJETIVOS .....	21
<b>1.1.1. Objetivo Geral</b> .....	21
<b>1.1.2. Objetivos Específicos</b> .....	21
1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	21
<b>2. QUALIDADE DA BIOMASSA FLORESTAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA EM UMA UNIDADE DE COGERAÇÃO</b> .....	23
Resumo.....	23
Abstract .....	23
2.1. INTRODUÇÃO .....	24
2.2. MATERIAL E MÉTODOS .....	26
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	28
<b>2.3.1. Teor de umidade</b> .....	30
<b>2.3.2. Teor de cinzas</b> .....	35
<b>2.3.3. Poder calorífico</b> .....	40
2.4. CONCLUSÕES .....	45
REFERÊNCIAS.....	46
<b>3. INFLUÊNCIA DA QUALIDADE SOBRE O PREÇO DA BIOMASSA FLORESTAL UTILIZADA PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA EM LAGES - SC</b> ...	51
Resumo.....	51
Abstract .....	51
3.1. INTRODUÇÃO .....	52
3.2. MATERIAL E MÉTODOS .....	54
<b>3.2.1. Análise exploratória dos dados</b> .....	54
<b>3.2.2. Modelo 1: Pagamento por PCL considerando TU e TC</b> .....	55
<b>3.2.3. Modelo 2: Pagamento por PCL, considerando TU após desconto do TC</b> .....	56
<b>3.2.4. Comparação entre os Modelos 1 e 2</b> .....	58
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	59
<b>3.3.1. Cavaco</b> .....	59
<b>3.3.2. Serragem</b> .....	64
<b>3.3.3. Casca</b> .....	67
<b>3.3.4. Comparação entre os Modelos 1 e 2</b> .....	72
3.4. CONCLUSÃO .....	74
REFERÊNCIAS.....	75
<b>4. CONCLUSÃO GERAL</b> .....	79
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	81



## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Os sistemas de geração e uso de energia em todo o mundo estão passando por grandes transformações. Muitas dessas mudanças estão sendo conduzidas por políticas governamentais, seja para colocar os países em um caminho de transição com baixa emissão de carbono, reduzir a poluição do ar, garantir a independência e a segurança da energia, ou reduzir custos e melhorar a eficiência. Em 2016, a geração global de eletricidade renovável cresceu cerca de 6,0% e representou aproximadamente 24,0% da potência global. A energia hidrelétrica continuou sendo a maior fonte de energia renovável (cerca de 70%), seguida de eólica (16%), bioenergia (9%) e solar (5%) (IEA, 2017).

A bioenergia (energia gerada a partir da conversão de produtos sólidos, líquidos e gasosos derivados da biomassa) é a maior fonte de energia renovável fornecendo calor e eletricidade, bem como combustíveis para transporte. O uso da biomassa continuou crescendo nos últimos anos e pode desempenhar um papel fundamental na descarbonização dos sistemas elétricos, fornecendo uma fonte estável de eletricidade de baixa carga de carbono (FAO, 2017).

Segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN) da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2016), no ano de 2015 a participação de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira foi de 75,51%, sendo que destes, 64,0% provém de fonte hídrica, 8,0% de biomassa, 3,5% eólica e 0,01% solar. Ou seja, no Brasil, a maior parte da elevação da demanda por energia tem sido sustentada por investimentos na geração de energia por hidrelétricas devido ao grande potencial hídrico do país. Porém, há uma instabilidade desta fonte na matriz energética decorrente dos ciclos de chuvas. Por essa razão, o Brasil tem despontado cada vez mais na busca de outras fontes alternativas para geração de energia total, sendo atualmente, líder no mercado mundial na utilização da biomassa (16% do total mundial), seguido por Estados Unidos e Alemanha (IEA, 2013).

Segundo a FAO (2017), das economias emergentes, o Brasil tem uma das maiores proporções de energias renováveis utilizadas para geração de calor (37%), principalmente devido ao uso de biomassa (90% desse total) em diferentes setores de indústrias como de alimentos (NASCIMENTO, 2007), papel e celulose (SANTIAGO, 2013) e etanol (CABRAL et al., 2016).

A avaliação do potencial de biomassa dos resíduos das cadeias de abastecimento agropecuário e florestal, incluindo os resíduos de processamento industrial, começa com a análise da produção agrícola e florestal. É necessária a identificação de indústrias

agroalimentares e de processamento de madeira existentes para determinar quais resíduos são produzidos em cada estágio do processo de produção (FAO, 2017).

De uma forma geral, o aumento na geração de resíduos provenientes do desdobramento da madeira no mundo possuindo diferentes composições, podem intensificar os impactos sanitários e ambientais caso sejam dispostos de maneira inadequada. Além disso, a geração de resíduos, e sua consequente não utilização, retrata enorme desperdício de matéria-prima e energia (FARAGE et al., 2013). A biomassa da madeira é uma fonte de energia renovável e neutra em CO<sub>2</sub>, que, se usada de forma sustentável e eficiente, pode contribuir para um ambiente mais limpo (IEA, 2017).

Sob este aspecto, o estado de Santa Catarina e, em especial a região de Lages é um polo significativo do setor de base florestal (HOFF e SIMIONI, 2004; SIMIONI e HOEFLICH, 2007; HOFF et al., 2008). A economia da região é amplamente voltada à base florestal, com indústrias que atuam na transformação da madeira em diferentes produtos e com celulose e papel. Em decorrência de tais usos, há um relevante volume de resíduos gerados por esse tipo de indústria, para os quais foram elaboradas investigações em estudos de quantidade e qualidade da biomassa (BRAND et al., 2001; BRAND e NEVES, 2005; SIMIONI e ANDRADE, 2006). Esses estudos culminaram com a instalação, da Unidade de Cogeração Lages da ENGIE (UCLA) Brasil Energia, no ano de 2004. Os estudos indicaram ainda, tendência de aumento do uso desses materiais como combustível para geração de energia (SIMIONI e HOEFLICH, 2010; BRAND e COSTA, 2007).

Diversos fatores podem estar associados às variações na qualidade da biomassa florestal produzida, com influência direta sobre seu aproveitamento para produção de energia elétrica, representando uma oportunidade de pesquisa que contempla a temática relacionada ao uso eficiente de recursos naturais renováveis.

Com base nisso, o desenvolvimento de trabalhos nesta área pode favorecer e estimular as empresas a implantar melhorias nos processos produtivos, no intuito de conseguir um produto de qualidade mais elevada que poderá melhorar a eficiência de geração. Ou seja, poderá ser possível a produção de mais energia com uma mesma quantidade de biomassa. Além disso, mudanças na eficiência energética da biomassa florestal poderão proporcionar maior viabilidade econômica (mercado de compra e venda de material mais efetivo) e benefícios ambientais, já que a destinação adequada reduz as chances de contaminação do solo, recursos hídricos e dispersão de partículas na atmosfera. Sendo assim, justifica-se a realização de estudos

que, como este, propiciem o fortalecimento da cadeia de produção de energia baseada em biomassa florestal, analisando a evolução da qualidade do combustível e propondo sugestões de melhoria.

## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1. Objetivo Geral

Analisar a qualidade da biomassa florestal utilizada para geração de energia pela UCLA da ENGIE Brasil Energia, considerando o teor de umidade, teor de cinzas e poder calorífico.

### 1.1.2. Objetivos Específicos

- a) Analisar a evolução da qualidade dos diferentes tipos de resíduos florestais utilizados para geração de energia pela UCLA, compreendendo o período de atuação da unidade desde o início de sua operação (de 2005 a 2015);
- b) Propor uma forma de pagamento pela aquisição da biomassa baseada na compra por conteúdo energético do combustível, considerando o TU e o TC.

## 1.2. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação foi estruturada em dois capítulos, além desta introdução e da conclusão geral, de forma que cada capítulo corresponde a um objetivo específico.

O capítulo 2 contempla o artigo intitulado “Qualidade da biomassa florestal para geração de energia em uma unidade de cogeração”, no qual foi analisado um banco de dados com parâmetros de qualidade de TU, TC e PCL de 4.937 amostras de biomassa florestal da UCLA. Foi observada a evolução da qualidade da biomassa utilizada para geração de energia entre os anos de 2005 a 2015. As médias dos diferentes tipos de materiais para cada parâmetro foram comparadas e, calculou-se ainda, a média móvel exponencial do período para os três materiais mais adquiridos pela unidade (cavaco, serragem e casca).

O capítulo 3 corresponde ao artigo “Influência da qualidade sobre o preço da biomassa florestal utilizada para a geração de energia em Lages – SC”. Neste, foram propostos dois modelos de pagamento pela biomassa florestal adquirida pela UCLA considerando o conteúdo energético do material em substituição ao pagamento por peso. Obteve-se equações para estimar o PCL por regressão linear múltipla para o Modelo 1 (TU e TC) e simples para o Modelo 2 (TU), sendo que para este último foi feito o abatimento do TC sobre o peso seco do material.



## 2. QUALIDADE DA BIOMASSA FLORESTAL PARA GERAÇÃO DE ENERGIA EM UMA UNIDADE DE COGERAÇÃO

### Resumo

A utilização da biomassa florestal para finalidades energéticas como alternativa para diminuição do uso de fontes não renováveis tem sido cada vez mais explorada. O objetivo deste estudo foi analisar a evolução da qualidade de diferentes tipos de resíduos florestais utilizados para geração de energia em uma Unidade de Cogeração, instalada no município de Lages, Santa Catarina, Brasil. Foram analisadas 4.937 amostras pertencentes a um banco de dados oriundo de uma série histórica, desde o início da operação da planta em 2005 até 2015. Foram analisadas as propriedades de teor de umidade, teor de cinzas e poder calorífico dos materiais amostrados. Os resultados apontaram a existência de sete principais tipos de resíduos florestais utilizados como combustível: casca, casca lavada, casca seca, cavaco florestal, cavaco, maravalha e serragem, além do blend (mistura de todos os resíduos utilizada na caldeira). A análise dos dados mostrou que há baixa variabilidade de umidade nos materiais enquanto os teores de cinzas apresentaram-se bastante elevados e com alta variação. O poder calorífico do combustível da caldeira teve um aumento a partir de 2011 que se justifica pela melhoria da qualidade da biomassa florestal fornecida, principalmente devido a redução dos teores de umidade e cinzas.

**Palavras-chave:** Resíduos. Teor de Umidade. Teor de Cinzas. Poder Calorífico.

### Abstract

The use of forest biomass for energy purposes as an alternative to reducing the use of non-renewable sources has been increasingly exploited. This study aimed to analyse the evolution of the quality of different types of forest residues used for energy generation in a cogeneration plant, located in the city of Lages, Santa Catarina, Brazil. 4937 samples were analysed belonging to a database coming from a historical series, since the beginning of plant operation in 2005 to 2015. The evaluated properties were moisture content, ash content and calorific value of the sampled material. The results showed the existence of seven major types of forest residues used as fuel: bark, washed bark, dry bark, forest chip, industrial chip (waste), wood shavings and sawdust, besides blend (mix of all residues used in the boiler). Data analysis showed that there is low moisture variability in materials while the ash content values were high and presented a great variation. The calorific value of the boiler fuel had an increase from

2011 that is justified by improving the quality of provided forest biomass, mainly due to the reduction of moisture and ash content.

## 2.1. INTRODUÇÃO

A utilização de biomassa tem ganhado crescente interesse desde que se percebeu que o seu uso pode diminuir a dependência de combustíveis fósseis para geração de energia (LI et al., 2012; KOSOV et al., 2014; NISHIGUCHI e TABATA, 2016). Outro aspecto é a redução dos seus problemas ambientais associados, já que a combustão direta de biomassa é uma técnica promissora para fornecer calor para as indústrias, residências e instalações agrícolas, onde caldeiras de biomassa podem substituir fornos a óleo e a gás (SAIDUR et al., 2011). A utilização de biomassa para produção de energia é considerada neutra em carbono, desde que sua colheita seja realizada a partir de uma fonte obtida de forma sustentável (ACDA e DEVERA, 2014).

A biomassa florestal que, atualmente, é usada para produzir bioenergia, pode ser oriunda de diferentes partes da planta ou de seu processamento, tais como: árvores em idade de colheita ou árvores mortas por distúrbios, materiais de desbaste, resíduos da colheita, subprodutos de processos florestais e industriais ou ainda de florestas plantadas para este uso (florestas energéticas) (KETIKIDS et al., 2016).

Apesar da vantagem ambiental, social e econômica da utilização da biomassa florestal como combustível, esses materiais de origem florestal ainda são subutilizados. Algumas barreiras que restringem a utilização da biomassa florestal para produção de energia estão relacionadas: à existência de variações sazonais e limitações na disponibilidade da biomassa e os elevados custos de produção; às limitações técnicas existentes no processo de conversão; e, uma logística da cadeia de abastecimento de combustível complexa, devido à dependência de algumas características físicas e químicas da biomassa florestal (AKHTARI et al., 2014). Além disso, a cadeia de geração de energia por biomassa florestal depende também do tipo de floresta, das práticas de colheita regionais e locais e, ainda, da localização, tamanho e concepção de instalações de armazenamento desse material disponíveis (KRIGSTIN e WETZEL, 2016).

A combustão da biomassa é fortemente afetada pelas suas propriedades físico-químicas (FOURNEL et al., 2015). A composição química da madeira, bem como o TU, TC, poder calorífico superior (PCS) e PCL podem sofrer alterações com o tratamento aplicado à mesma, considerando desde sua colheita até o uso final. Logo, torna-se necessário controlar as variações destas características para a otimização do uso do material para geração de energia (BRAND, 2010; FURTADO et al., 2012).

Sobre o TU, sabe-se que a combustão de biocombustíveis com elevada umidade é possível, porém fica associada a algumas desvantagens. Uma delas é o calor latente que precisa ser despreendido na câmara de combustão para evaporar a água e que, por consequência, não é utilizado para geração de energia, ou seja, há uma redução do poder calorífico (PC) do material. Além disso, uma caldeira que opera com combustível de alto TU deve ter dimensões maiores para o mesmo rendimento térmico. Pode causar ainda instabilidades operacionais, já que o dissipador de calor adicional fornecido pela umidade aumenta o risco de emissões nocivas (ALAMIA et al., 2015).

Os processos de combustão também acabam gerando grandes quantidades de cinzas (GIRÓN et al, 2013), dependendo também do tipo e da qualidade da biomassa. As cinzas contribuem para as emissões de partículas e problemas operacionais, tais como incrustações e corrosão. Podem perturbar o processo de combustão, reduzir a eficiência e levar a interrupções não desejadas do processo, além de níveis mais elevados de compostos de uma combustão incompleta incluindo o monóxido de carbono (CO) (OBERNBERGER et al., 2006; VERMA et al., 2011).

Sabendo-se de que as propriedades físicas e químicas influenciam diretamente a qualidade da biomassa como material combustível, Brand (2010) ressalta que a melhoria de tais propriedades sujeitas a manejo e tratamento, podem tornar o material mais atrativo para sistemas de geração de energia, que a princípio poderiam ter maior qualidade energética, tornando-o competitivo com outros combustíveis.

Sobre a região da realização do estudo, o município de Lages, no estado de Santa Catarina/Brasil, há um significativo volume de resíduos gerados pela indústria de base florestal, sobre os quais foram realizados levantamentos quantitativos e qualitativos (BRAND et al., 2001; BRAND e NEVES, 2005; SIMIONI e ANDRADE, 2006), que culminaram com a instalação, em 2004, de uma unidade de geração de energia elétrica – a UCLA da ENGIE Brasil Energia. Diante desses investimentos, estudos prospectivos na região indicaram uma tendência de aumento do uso de resíduos da indústria como combustível para geração de energia (BRAND e COSTA, 2007, SIMIONI e HOEFLICH, 2010).

Decorrida mais de uma década da implantação da unidade de geração de energia, estudos preliminares indicam que ocorreram significativas transformações na qualidade e no preço da biomassa florestal (BRAND et al., 2009). Parte dessas variações podem estar associadas às inovações tecnológicas do setor (SIMIONI et al., 2015) e às melhorias na

silvicultura de espécies de rápido crescimento (SAMPAIO e MAZZOCHIN, 2010), diferenciando cada vez mais o material que chega nas usinas de transformação.

Neste contexto, considerando a perspectiva de utilização da biomassa florestal para finalidades energéticas, o objetivo do presente estudo foi analisar a evolução da qualidade dos diferentes tipos de resíduos florestais utilizados para geração de energia pela UCLA, compreendendo o período de atuação da unidade desde o início de sua operação (de 2005 a 2015).

## 2.2. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa é quantitativa e temporal, na qual analisa-se uma série histórica de dados de qualidade de biomassa de 10 anos: 2005-2015. Representa o universo de fornecedores de biomassa florestal para a UCLA da ENGIE Brasil Energia, considerando dados primários da qualidade da biomassa.

Os dados foram fornecidos pela UCLA, contemplando o teor de umidade, teor de cinzas e poder calorífico (superior e líquido) da biomassa de cada fornecedor, desde o início da operação da unidade (de 2005 a 2015) e também do blend (mix) utilizado como combustível na geração de energia. A UCLA também forneceu as informações referentes as quantidades adquiridas de cada material, bem como o total anual de biomassa florestal utilizada pela usina. Toda a biomassa florestal utilizada na usina é oriunda de plantios ou do processamento industrial da madeira de espécies do gênero *Pinus*, principalmente da espécie *Pinus taeda*, que é mais cultivada na região de abrangência da UCLA.

As amostras foram coletadas como uma atividade rotineira de controle de qualidade do material comprado pela usina. Ao total, o banco de dados possuía 4.937 amostras do TU, TC, PCS e PCL dos diferentes tipos de biomassa adquirida dos fornecedores. As análises foram realizadas com base na norma NBR 14929 para teor de umidade (ABNT, 2003a), NBR 13999 para teor de cinza (ABNT, 2003b) e DIN 51900 para poder calorífico (DIN, 2000).

Primeiramente, o banco de dados foi agrupado de acordo com os fornecedores da biomassa. Das 255 nomenclaturas de fornecedores registradas, foi feito o agrupamento daquelas que se referiam a um mesmo fornecedor resultando assim em 30 grupos de fornecedores, além do grupo referente ao material misturado que efetivamente entra na caldeira (mix). Fornecedores com menos de 5 amostras de material analisadas, não foram utilizados nesta pesquisa (total de 143 amostras de 87 fornecedores). Dados de propriedades incompletos ou

faltantes, sem data de coleta, sem identificação do fornecedor ou tipo de material também foram descartados (306 amostras).

Materiais com número de análises inferior a 10, não foram utilizados: casca peneirada, cavaco seco, destopo seco, refilo seco (17 amostras no total). Com isso, obteve-se uma planilha final com 2169 dados de análises referentes a 24 diferentes fornecedores e 7 diferentes categorias de material: casca, casca lavada, casca seca, cavaco florestal, cavaco, maravalha e serragem. As amostras do blend (mix) totalizaram 2159 dados. A Tabela 1 apresenta o total de análises viáveis utilizadas para este artigo, de 4328, com o respectivo período de fornecimento dos dados.

Tabela 1 - Quantidade de amostras por tipo de biomassa florestal e seus respectivos períodos de fornecimento para a UCLA.

<b>Biomassa</b>	<b>Nº de amostras</b>	<b>Período de fornecimento</b>
Casca	1135	2005 a 2015
Casca Lavada	103	2005 e 2007
Casca seca	61	2007 e 2008
Cavaco Florestal	50	2007 a 2015
Cavaco	290	2005 a 2015
Maravalha	19	2006 a 2008
Serragem	511	2005 a 2015
Blend (mix)	2159	2005 a 2015
<b>Total</b>	<b>4328</b>	<b>2005 a 2015</b>

Para todos os tipos de biomassa foram elaborados gráficos de dispersão com o objetivo de identificar e excluir dados atípicos, considerados *outliers*. Para tanto, optou-se por excluir das análises os dados que se situavam abaixo do limite mínimo ( $\mu - 2\sigma$ ) e acima do limite máximo ( $\mu + 2\sigma$ ) especificados. Com este procedimento, restaram 4.181 amostras para a análise do teor de umidade, 4.163 para o teor de cinzas e 4.142 para o poder calorífico.

Após este procedimento, a qualidade da biomassa dos diferentes tipos de materiais fornecidos para a UCLA, foi analisada estatisticamente pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade, além da apresentação do desvio padrão e do coeficiente de variação (CV). Foram elaborados gráficos boxplot para fins de comparação entre os materiais estudados para TU, TC e PCL, sendo utilizados para estes, os dados de: mínimo, limite inferior, 1º quartil, média, mediana, 3º quartil, limite superior e máximo. Para os dados dos três principais tipos de

biomassa com maior número de amostras (casca, cavaco e serragem), além do mix, foram elaborados gráficos de dispersão contendo a Média Móvel Exponencial (MME) como indicativo da tendência de evolução da biomassa. Optou-se por analisar o teor de umidade, teor de cinzas e poder calorífico líquido separadamente, de acordo com cada tipo de resíduo analisado.

A MME é utilizada como previsão de séries temporais identificando tendências (ALBIERO et al., 2012). Para isso, foi calculada com base na Equação (1), a seguir:

$$\hat{y}_{t+1} = y_t + \alpha(y_t - \hat{y}_t) \quad (1)$$

Após a MME, foi calculado o Erro Quadrático Médio (EQM) pela Equação (2), visto que quanto menor é seu valor, maior é a qualidade da regra de previsão (SICSÚ, 2012). Foi utilizada a ferramenta Solver para identificação do valor de  $\alpha$  que proporcionaria a minimização do EQM.

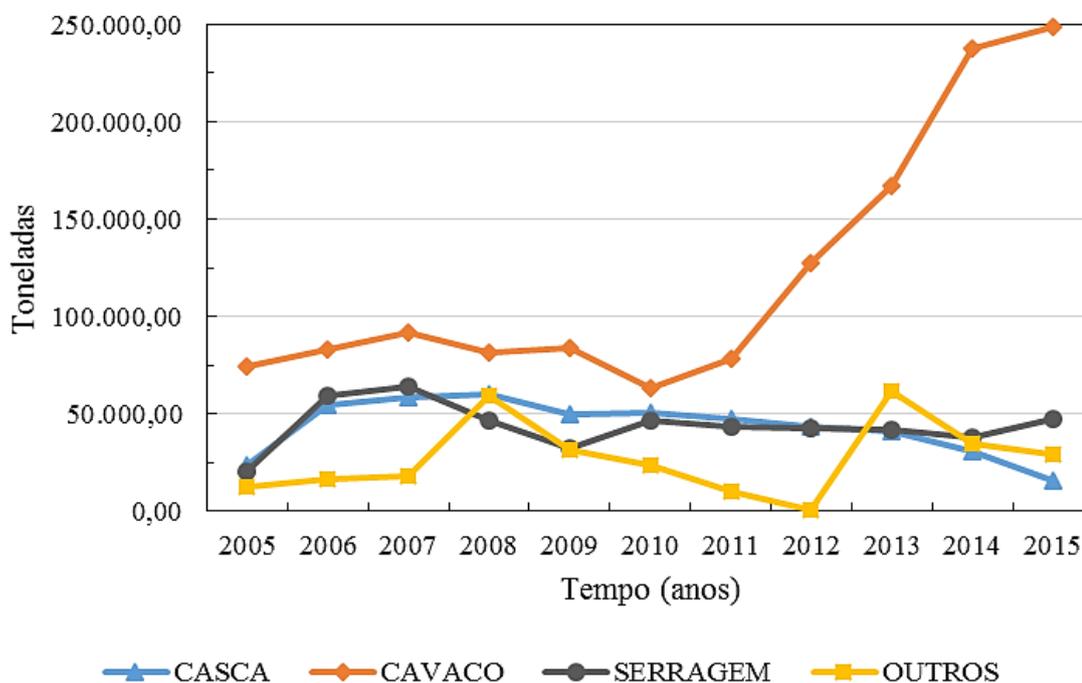
$$EQM = \frac{\sum_{t=1, \dots, n} [e(t)]^2}{n} \quad (2)$$

Como forma de complemento e entendimento dos processos realizados pela UCLA, foram obtidas informações a partir de questionário semiestruturado aplicado aos gestores da empresa. Os questionamentos auxiliaram na discussão e na justificativa de eventuais acontecimentos ao longo da série temporal de dados.

### 2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A usina, ao longo do período de operação, adquiriu e utilizou em maior quantidade três tipos principais de biomassa florestal: casca, cavaco e serragem (Figura 1). Na categoria “outros” estão inclusos o cavaco florestal e a maravalha, além de resíduos de poda urbana, costaneiras, destopo e toretes, cujos parâmetros de qualidade não foram avaliados sistematicamente pela UCLA.

Figura 1 - Quantidades de biomassa consumidas pela UCLA de 2005 a 2015



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

É perceptível que o cavaco, desde o início da operação da usina, tem sido o material mais importante no volume total de biomassa. O volume de cavaco oscilou em torno de 75 mil toneladas entre 2005 a 2011, representando cerca de 40% do total de biomassa. Contudo, após o ano de 2011, verifica-se um aumento significativo chegando próximo de 250 mil toneladas em 2015, representado mais de 70% do volume.

Fatos que podem justificar o aumento da demanda energética a partir de 2014 no Brasil, e que está contribuindo para o crescimento da compra de biomassa são: o estímulo por parte governamental à compra de equipamentos eletroeletrônicos (queda de preços), a realização de eventos de grande porte no país, aumento na renda da classe média, estiagens sucessivas no país, nos últimos anos, resultando na queda da produção de energia das hidrelétricas e aumentando a demanda das termelétricas.

Já a proporção de casca e serragem, desde o início da operação da UCLA manteve-se relativamente constante. O volume de serragem oscilou em torno de 50 mil toneladas anuais, com diminuição da participação entre 2007 e 2009. Enquanto que a casca, com exceção dos três primeiros anos de operação, apresentou queda constante do volume adquirido, passando de 60 mil toneladas em 2008 para 16 mil toneladas em 2015. No que tange aos outros materiais, houve significativa alteração das quantidades adquiridas, oscilando entre 0,5% e 24%.

### 2.3.1. Teor de umidade

As análises revelaram que entre os tipos de materiais, o que teve maior média para o TU (Tabela 2) foi a casca lavada pelo fato de ter passado por um processo de lavagem visando diminuir a quantidade de materiais contaminantes (como por exemplo, terra, pedra e outros que resultam em cinzas). O trabalho de Deng (2013) procurou determinar a viabilidade de se realizar essa lavagem do combustível para melhorar suas características. Os resultados mostraram que o potássio, enxofre e cloro contidos na biomassa (prejudiciais ao funcionamento da caldeira), podem ser removidos na lavagem. Porém, o estudo revelou que o procedimento de lavagem não promoveu alteração na fusibilidade das cinzas da madeira.

Ainda de acordo com a Tabela 2, verifica-se que a serragem foi o segundo material com maior TU (59,38%). A casca (53,89%) e o cavaco florestal (52,50%) aparecem na sequência, sendo que o cavaco florestal apresentou média estatisticamente igual à casca e casca seca. A maravalha é o que detém menor umidade sendo utilizada para dosar o mix. Porém, a quantidade adquirida desse combustível é pequena devido tanto a sua menor geração nos processos, quanto ao alto valor agregado deste material. A maravalha é utilizada na região, como exemplo, em cama de aviários, na produção de suínos e para cobertura de solo em cultivos de cebola, possuindo maior valor de remuneração no mercado para estas finalidades.

De uma forma geral, os coeficientes de variação dos materiais foram relativamente baixos, demonstrando que há pequena variabilidade nas características do material fornecido e que, em especial, o mix é o material mais uniforme. O TU médio do combustível (mix) que está entrando na caldeira é menor que o valor encontrado na literatura para umidade da madeira recém-cortada: 65% na base úmida, variando com as condições de colheita e ambiente (DE FUSCO et al., 2015). Além disso, o mix atende ao valor ideal para viabilidade de uso em caldeiras que é abaixo de 60% (BRUTTI e SIMIONI, 2006). Salienta-se que a qualidade do mix está diretamente relacionada com a granulometria, TU e TC da matéria-prima que o compõe.

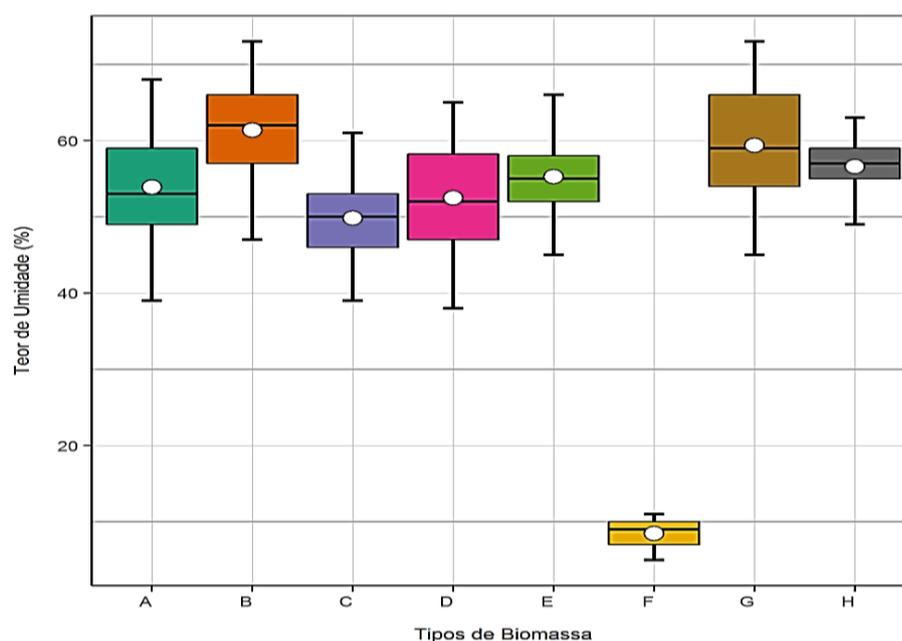
Tabela 2 - Teores de umidade da biomassa florestal utilizada para geração de energia na UCLA

Material	Teor de Umidade (%)			
	Nº de amostras	Média*	Desvio Padrão	CV
Casca	1102	53,89 e	6,46	11,99
Casca Lavada	100	61,39 a	6,42	10,46
Casca seca	57	49,82 f	4,86	9,75
Cavaco Florestal	46	52,50 ef	7,01	13,35
Cavaco	273	55,27 d	4,52	8,19
Maravalha	17	8,47 g	1,66	19,63
Serragem	502	59,38 b	6,62	11,16
Blend (mix)	2084	56,60 c	2,78	4,91
<b>Total</b>	<b>4181</b>			

\*As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A partir da Figura 2 é possível uma comparação da variabilidade entre os tipos de biomassa utilizados pela usina. A maravalha e o mix foram os que apresentaram menor variabilidade dos dados entre si, porém a maravalha revelou ser um material de características bastante diferentes em comparação aos demais.

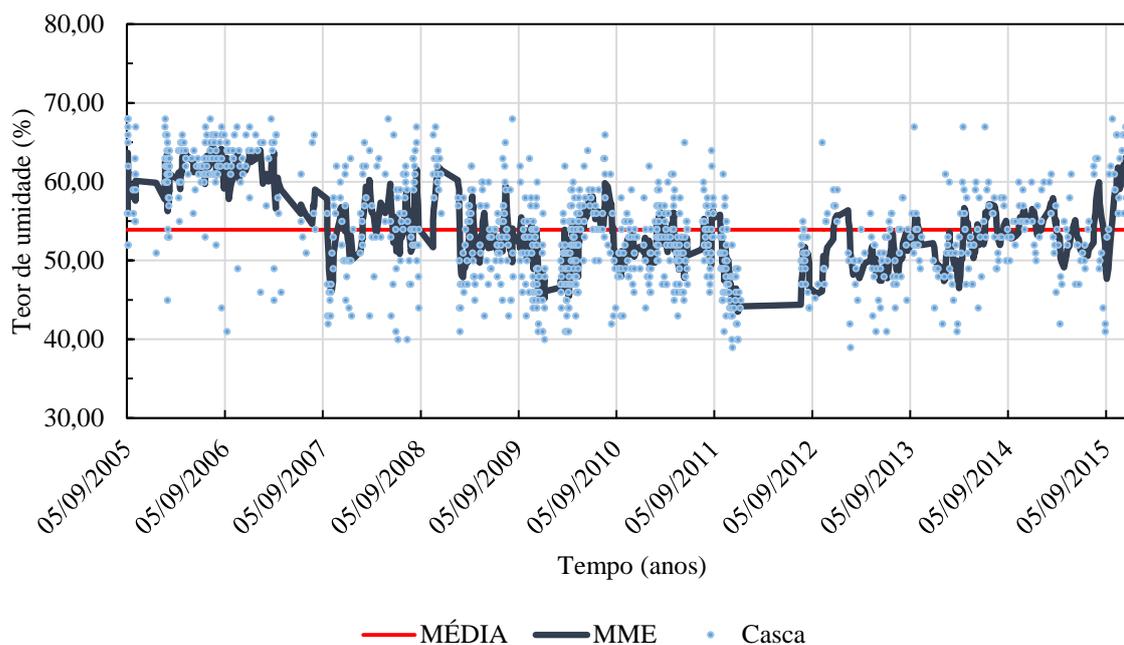
Figura 2 – Boxplot para comparação do TU entre os grupos contendo os tipos de biomassa estudados



Nota: legenda para os tipos de biomassa equivalem: A = Casca, B = Casca Lavada, C = Casca seca, D = Cavaco Florestal, E = Cavaco, F = Maravalha, G = Serragem e H = Blend (mix)

Além do mix, outros três combustíveis com maior número de análises merecem destaque: casca, cavaco e serragem, pois são as categorias de biomassa que compõem a maior proporção da mistura que entra na caldeira. A casca, com 1102 amostras (Figura 3) apresentou valores com pequena dispersão em relação à média.

Figura 3 – Evolução do teor de umidade (%) do material casca ao longo do período de fornecimento à UCLA



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

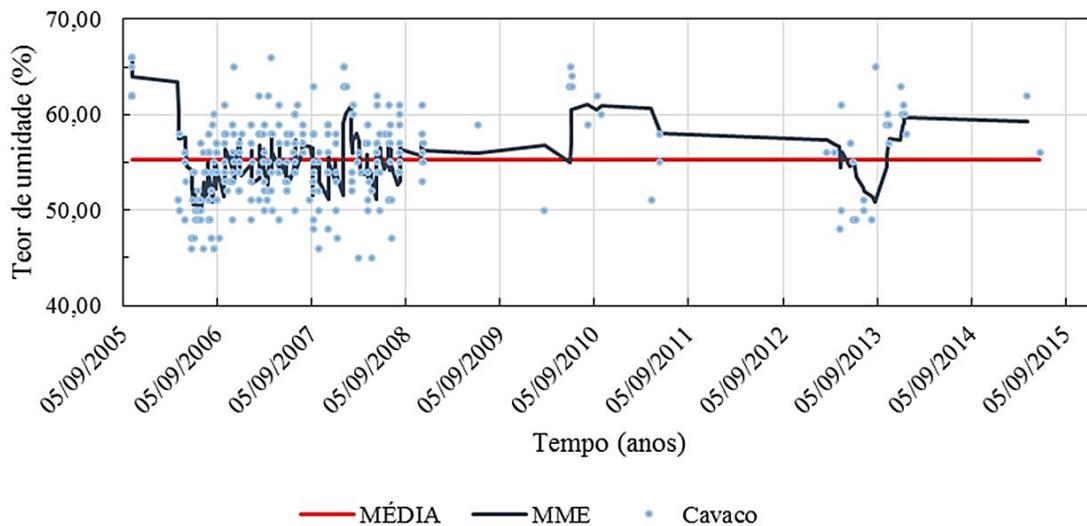
A dispersão dos dados revelou uma tendência de queda na umidade ao longo do período de operação da planta. Porém, houve períodos com compra de combustível de melhor qualidade (menores TU entre 2009 e 2013), que voltaram a se elevar posteriormente. Em períodos de alta demanda por energia, a necessidade de maior quantidade de biocombustível leva a compra de biomassa com maior TU. Porém, foi verificada por parte da usina que há um indicativo de minimização ainda maior no uso da casca como biomassa, principalmente devido à baixa qualidade do material, o que já pode ser evidenciado e confirmado pela Figura 1.

Percebe-se, também, a ausência de dados no período de fornecimento referente ao final do ano 2011 e meados do ano 2012 que, segundo informações fornecidas pela UCLA, foi em função de ajustes contratuais com o laboratório responsável pelas análises, sendo realizadas apenas análises emergenciais.

O cavaco (273 amostras) é o combustível com menor variabilidade de resultados depois do mix. A dispersão dos resultados (Figura 4) evidencia um período de amostragem mais

intenso nos primeiros anos de operação da usina, a fim de padronizar a qualidade do material comprado, visto que esta é a biomassa comprada e utilizada em maior quantidade na usina (Figura 1). Porém, após esse período o cavaco apresentou regularidade na qualidade em termos de TU. Isso porque os fornecedores desta biomassa, desde sua geração na indústria, realizam operações para a melhoria da qualidade energética deste produto, como coleta, armazenamento e transporte diferenciados em relação as outras categorias de resíduos. Atualmente, a UCLA coleta amostras aleatórias para fins de controle eventual da qualidade do combustível.

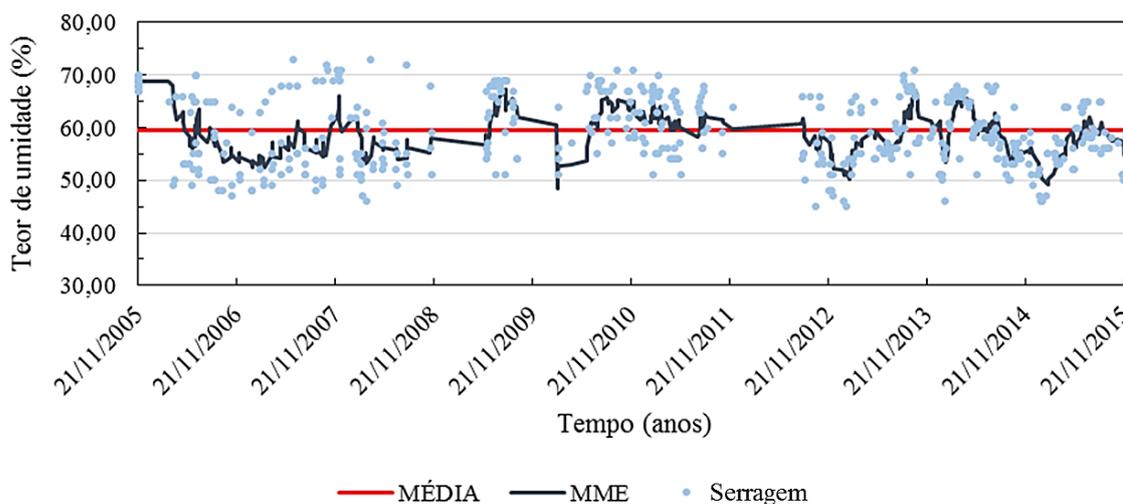
Figura 4 – Evolução do teor de umidade (%) do material cavaco ao longo do período de fornecimento à UCLA



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Para a serragem (502 amostras), desde o início da operação da UCLA houve oscilação em torno do valor limitante de operação da caldeira (60%), embora os resultados apontem para a queda da umidade, bem como dados mais homogêneos principalmente entre os anos de 2014 e 2015 (Figura 5): não se observa forte tendência (nem de aumento, nem de queda), ou seja, o material tem pouca oscilação de suas características. O TU da serragem tende a ser mais alto em relação aos outros tipos de biomassa em função de sua menor granulometria, que resulta em maior área superficial da partícula, aumentando a área de contato com a água. A menor granulometria contribui também para a formação de pilhas mais compactadas, onde a perda de umidade é dificultada ao longo do tempo de estocagem da biomassa. A serragem é armazenada em pilhas a céu aberto em muitas indústrias na região, que fornecem este material para a usina.

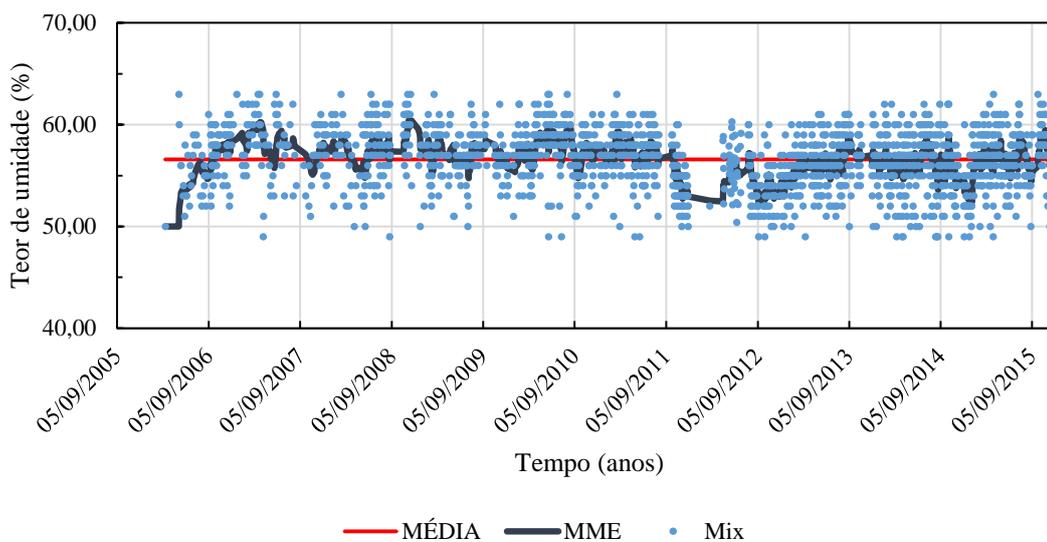
Figura 5 – Evolução do teor de umidade (%) da serragem ao longo do período de fornecimento à UCLA



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

A análise do mix é de extrema importância para se ter um controle da qualidade do processo. A UCLA tem uma grande preocupação em amostrar frequentemente esse combustível (Figura 6). O extenso banco de dados do blend permite maior confiabilidade no perfil de evolução e, tomando como base os 60% de TU operacional da caldeira.

Figura 6 – Evolução do teor de umidade (%) do blend (mix) ao longo do período de fornecimento à UCLA



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

A dispersão dos valores de TU do mix foi baixa ao longo do período de operação da planta como pode ser visualizado na Figura 5 e também pelos baixos valores do coeficiente de variação e desvio padrão. Isso demonstra que a mistura entre os resíduos utilizados na usina para geração de energia tem sido feita de forma a atender o TU operacional da planta (60%), mesmo quando houve alteração nos tipos e volume de cada tipo de biomassa comprada pela UCLA. Contudo, cabe observar que 6,96% das amostras tiveram TU excedendo os 60%, salientando a importância em se mensurar essa propriedade para não comprometer a eficiência de geração de energia.

### **2.3.2. Teor de cinzas**

Conhecer o comportamento do combustível é essencial para projetar e operar os sistemas de queima de forma segura e eficiente. As cinzas desempenham um papel importante na dinâmica do sistema de geração. As análises deste parâmetro de qualidade são feitas visando o controle da biomassa adquirida para evitar problemas posteriores com seu tratamento, destinação ou operação das caldeiras. Segundo informações da usina, a caldeira foi projetada para operar com valor limite de 2% de TC.

Quanto menor é o TC do material, melhor será a qualidade do mix. Altos TC podem vir a formar depósitos de cinza sobre a grelha ou as paredes da superfície da caldeira. Tal acúmulo acaba por causar a diminuição da eficiência do queimador (aglomeração das partículas de cinza no combustor), danos no queimador (corrosão dos componentes do queimador), além de problemas de manutenção (necessidade de desligamento do sistema para remoção dos aglomerados de cinzas) (NUNES et al., 2016).

As categorias de biomassa que tem a casca em sua composição foram os que tiveram maior TC, podendo os valores serem considerados elevados para biomassa para geração de energia (Tabela 3). A casca, que é um dos três tipos de biomassa mais utilizados na usina (Figura 1) contribuiu para o aumento de média do TC do mix.

O cavaco florestal e o mix tiveram médias de TC estatisticamente iguais, bem como foram semelhantes estatisticamente o cavaco florestal, cavaco, maravalha e serragem, com as menores médias de TC. Essas categorias de biomassa tiveram TC que pode ser considerado baixo, indicando pouca contaminação da biomassa por substâncias inorgânicas que contribuem para o aumento das cinzas. Porém, os coeficientes de variação para todos os materiais foram muito elevados (alta variabilidade).

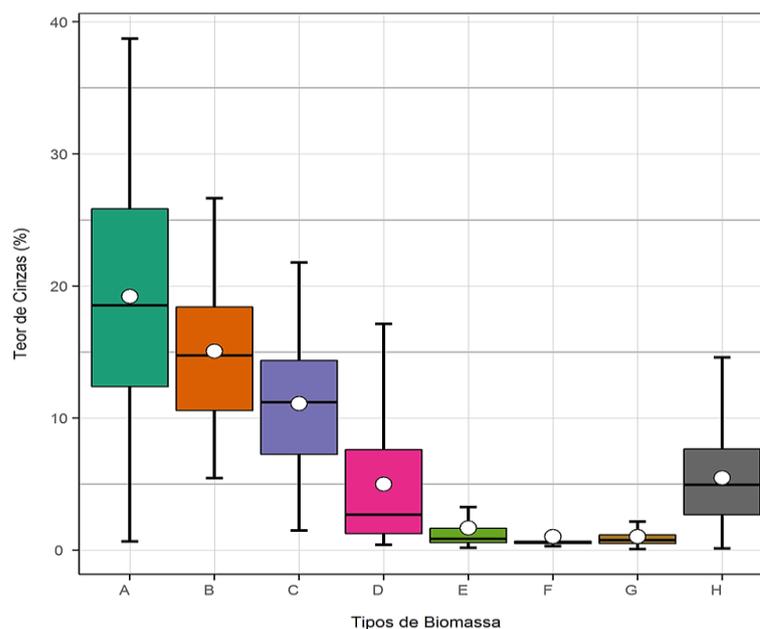
Tabela 3 - Valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação dos teores de cinzas dos materiais

Material	Teor de Cinzas (%)			
	Nº de amostras	Média*	Desvio Padrão	CV
Casca	1103	19,21 a	8,71	45,36
Casca Lavada	100	15,07 b	5,40	35,79
Casca Seca	59	11,10 c	5,10	45,94
Cavaco Florestal	48	4,99 de	5,02	100,59
Cavaco	274	1,67 e	2,05	122,60
Maravalha	18	1,03 e	1,43	139,10
Serragem	495	1,03 e	0,95	91,88
Blend (mix)	2066	5,46 d	3,27	59,93
<b>Total</b>	<b>4163</b>			

\*As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Analisando a comparação dos dados referentes ao TC dos combustíveis através da Figura 7, percebe-se que, de fato a casca (incluindo casca lavada e casca seca) é o material que apresenta valores mais elevados, bem como maior variabilidade de TC entre as amostras. Cavaco, maravalha e serragem foram os materiais mais uniformes e com menores teores de cinzas.

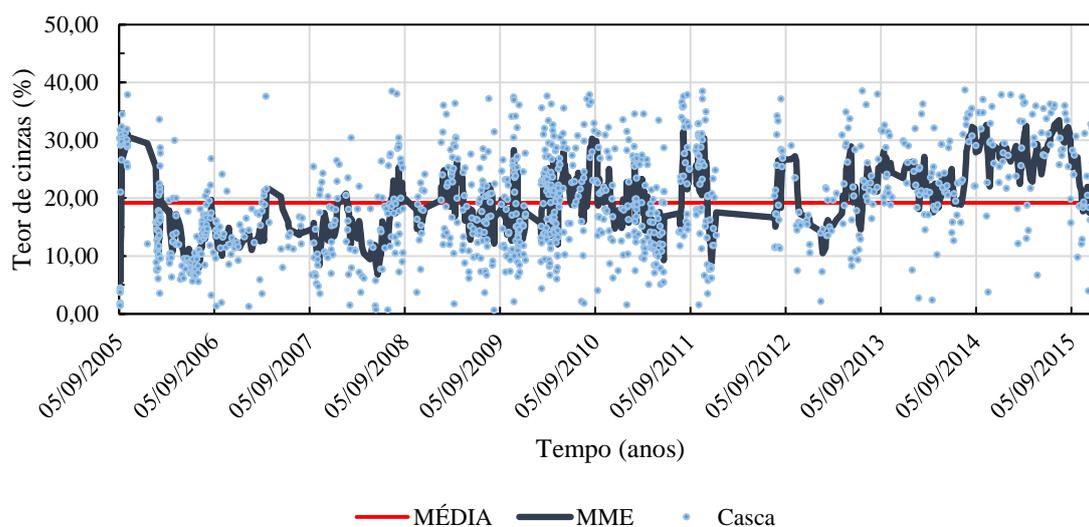
Figura 7 – Boxplot para comparação do TC entre os grupos contendo os tipos de biomassa estudados



Nota: legenda para os tipos de biomassa equivalem: A = Casca, B = Casca Lavada, C = Casca seca, D = Cavaco Florestal, E = Cavaco, F = Maravalha, G = Serragem e H = Blend (mix)

A elevada média para TC da casca é visualizada na Figura 8. Há amostragem desse material ao longo de toda série histórica de operação da usina. As análises apontaram uma elevação nos valores de TC, principalmente a partir de 2011, salientando a necessidade de continuar amostrando esse material para finalidades de controle de operação da caldeira.

Figura 8 – Evolução do teor de cinzas (%) da casca ao longo do período de fornecimento à UCLA



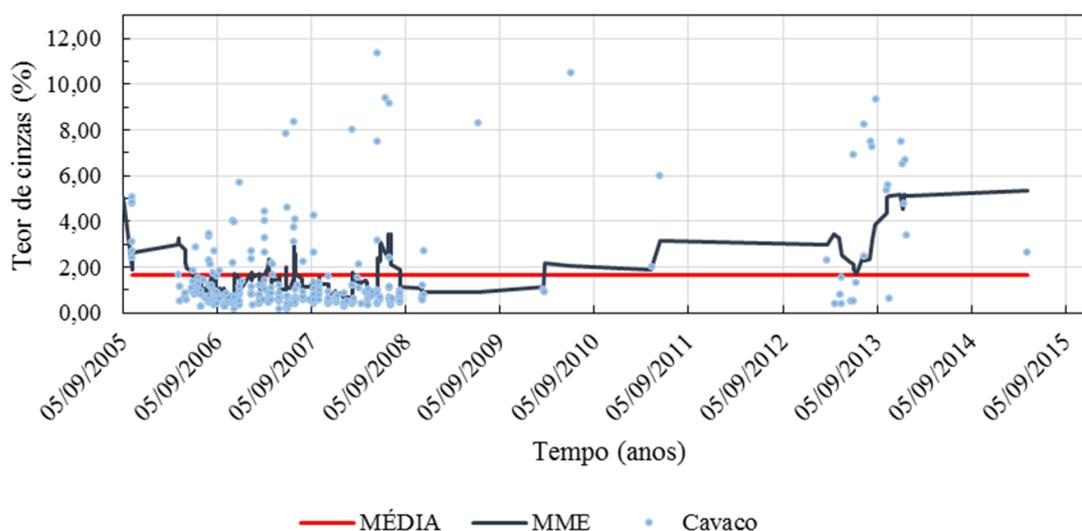
Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

A grande quantidade de amostras de casca se deve justamente pelos altos teores de cinzas, necessitando, portanto, de controle frequente da qualidade deste combustível. Por se tratar da camada mais externa da árvore, a casca carrega consigo grandes quantidades de impurezas (matéria inorgânica, principalmente terra e pedras), durante todas as etapas de tratamento da biomassa (colheita, transporte, processamento industrial, estocagem). Isso explica os altos teores de cinza nesse tipo de material, uma vez que a casca tem quantidades de cinzas na sua composição que não superam os 5%, sendo o restante devido a material contaminante.

Com esse monitoramento, a empresa consegue atuar junto aos fornecedores (visando sugerir melhorias em seus processos, por exemplo) sempre que o TC estiver muito alto, já que a cinza é um dos maiores problemas da queima da casca processada. Outro fator importante é que com maior número de análises da casca, a usina consegue chegar a uma mistura melhor no mix e o resultado pode ser visto nos dados referentes às análises deste material.

A Figura 9 mostra que a maioria das amostras de cavaco ficou próxima ou ainda abaixo do valor médio, porém, por se tratar de valores tão baixos, um número reduzido de amostras com valores elevados contribuem de forma significativa para o aumento da variabilidade dos dados.

Figura 9 – Evolução do teor de cinzas (%) do cavaco ao longo do período de fornecimento à UCLA

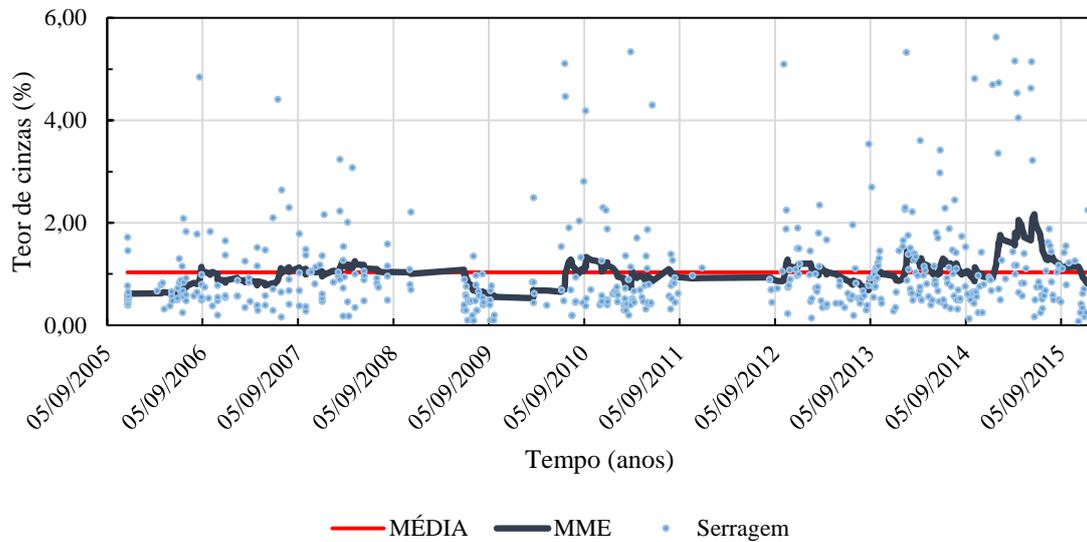


Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

O cavaco em sua grande maioria é gerado em processos de serrarias e estocado em silos para depois ser carregado nas caçambas e transportado até a usina. Ou seja, a possibilidade de contaminação com terra ou outros materiais é reduzida. Por isso, os resultados das amostras coletadas sempre apontam baixos TC. Em virtude disso, a UCLA faz apenas coletas por amostragem aleatória dentre alguns fornecedores para controle, principalmente nas primeiras cargas de cada fornecedor.

Casca e serragem tem uma participação percentual semelhante sobre a quantidade total de biomassa florestal comprada pela usina, porém o número de amostragens feitas na serragem é muito menor, também pelo fato de se tratar de um material com pouca contaminação e conseqüentemente baixos teores de cinzas (Figura 10).

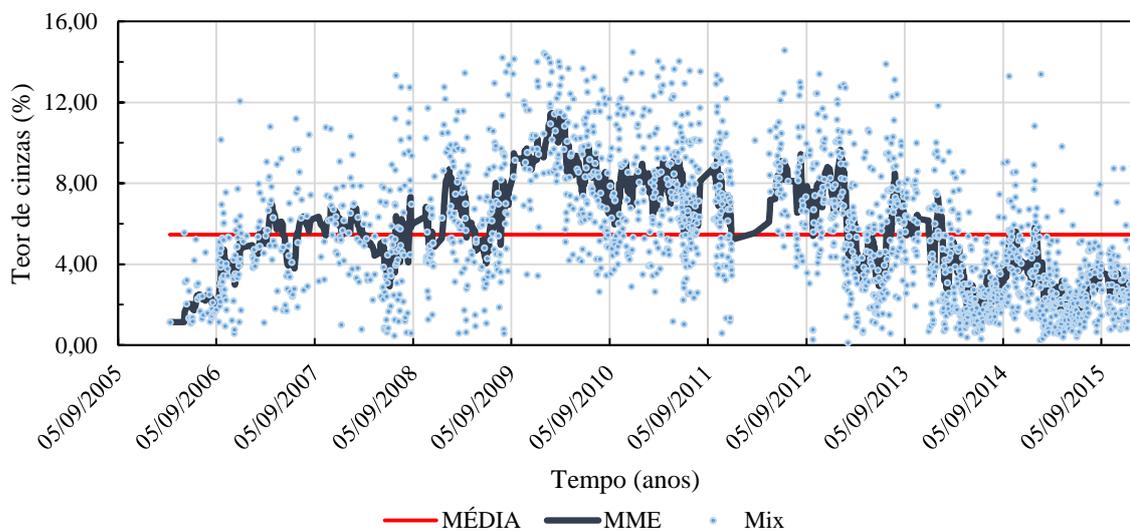
Figura 10 – Evolução do teor de cinzas (%) da serragem ao longo do período de fornecimento à UCLA



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Por isso, análises do combustível da caldeira são frequentemente realizadas para o controle de operação, visando utilizar o blend com melhor qualidade possível para gerar energia (Figura 11). Os resultados apontam que após o início da operação da usina, até o início de 2012 havia uma forte tendência de aumento no TC do combustível. A partir do final do mesmo ano, a UCLA conseguiu adequar a composição do mix de forma que tem apresentado tendência de queda no TC.

Figura 11 – Evolução do teor de cinzas (%) do blend (mix) ao longo do período de fornecimento à UCLA



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

As características da cinza resultante dos processos de combustão têm uma ampla variação de tamanho, forma e composição. Através do conhecimento da sua composição química e as propriedades físicas, é possível prever a tendência para formar depósitos nos componentes da caldeira, bem como o seu potencial para causar corrosão, erosão e à abrasão e qual o destino possível para tal produto (NUNES et al., 2016).

Sua forma de destinação mais comumente utilizada é a aplicação no solo como corretivo da acidez e fonte de nutrientes (CAMPANHARO et al., 2008; SOFIATTI et al., 2007), incorporação na massa de materiais cerâmicos (como a cerâmica vermelha) processados em indústrias (BORLINI et al., 2005; MEDEIROS, 2010), adição ao concreto ou clínquer de cimento (VASKE, 2012; FULLER et al., 2015). A UCLA tem seguido a tendência de destinar as cinzas para aplicação no solo como corretivo da acidez e fonte de nutrientes, fornecendo as cinzas para empresa agroflorestais da região.

### **2.3.3. Poder calorífico**

O poder calorífico (PC) é a energia térmica liberada por unidade de massa ou volume de um combustível durante sua combustão completa. O valor determinado pelo equipamento (bomba calorimétrica) é o PCS o qual demonstra a capacidade máxima de energia térmica produzida pelo combustível (BRAND, 2010). Porém, o hidrogênio de constituição tem efeito sobre o PCI durante a combustão do material em presença do oxigênio ( $O_2$ ), devido ao calor de vaporização do vapor de água ( $H_2O$ ) (VASSILEV et al., 2010). Na biomassa úmida, a energia produzida pela combustão acaba sendo consumida para evaporar a umidade livre do material (além de sua água de constituição), reduzindo assim a energia disponível para geração de energia. Para fins energéticos o valor que de fato deve ser observado é o PCL que é calculado através do PCI, descontando também a energia perdida pela evaporação da água livre presente no combustível (SAIDUR et al., 2011; ACQUAH et al., 2016; MOTGHARE et al., 2016).

Segundo as informações fornecidas pela usina, a caldeira foi projetada para operar com um PCL mínimo de 1850 kcal/kg, ou seja, a mistura de todo material comprado dos fornecedores deveria atingir esse limite mínimo.

As amostragens feitas pelo laboratório da UCLA (Tabela 4) resultaram em diferença estatisticamente significativa entre as médias dos materiais, sendo a maravalha o combustível com maior valor de PCL obtido, seguido da casca seca e cavaco florestal, que apresentaram médias estatisticamente iguais. A média de PCL mais baixa foi da casca lavada. Os CV não

foram elevados, com destaque maior para a maravalha e o mix que foram os menores valores, resultando em uma baixa variabilidade dos PCL nestas categorias de biomassa.

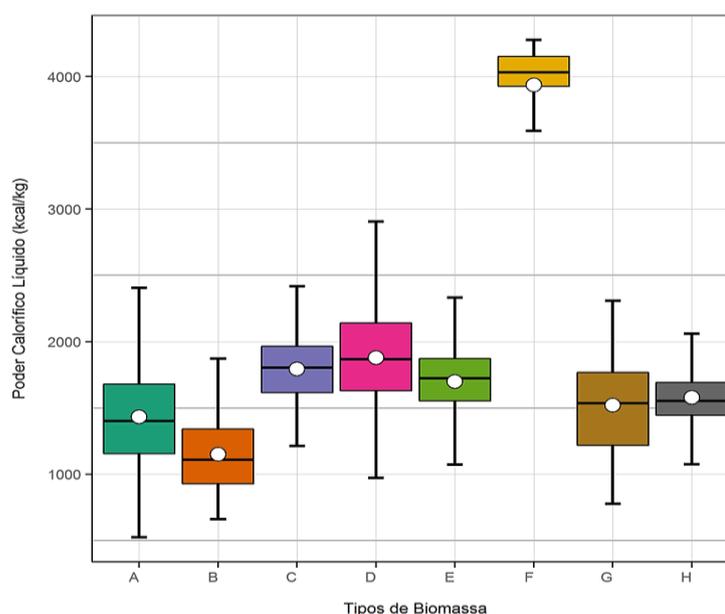
Tabela 4 – Valores de média, desvio padrão e coeficiente de variação do Poder Calorífico Líquido dos materiais

Material	Poder Calorífico Líquido (kcal/kg)				
	Nº de amostras	Média*	Desvio Padrão	CV (%)	
Casca	1104	1432,65	f	363,31	25,36
Casca Lavada	98	1150,52	g	288,21	25,05
Casca seca	57	1793,72	bc	279,84	15,60
Cavaco Florestal	47	1879,55	b	443,37	23,59
Cavaco	271	1699,96	c	260,97	15,35
Maravalha	18	3937,72	a	350,99	8,91
Serragem	489	1519,96	e	345,74	22,75
Blend (mix)	2058	1579,45	d	206,71	13,09
Total	4142				

\*As médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A comparação dos dados de PCL entre os materiais estudados (Figura 12) apontou que a maravalha é o combustível com maior conteúdo energético para a queima. Casca lavada e casca foram as categorias com menores PCL, sendo que, a casca apresentou ainda, alta variabilidade entre os dados.

Figura 12 – Boxplot para comparação do PCL entre os grupos contendo os tipos de biomassa estudados

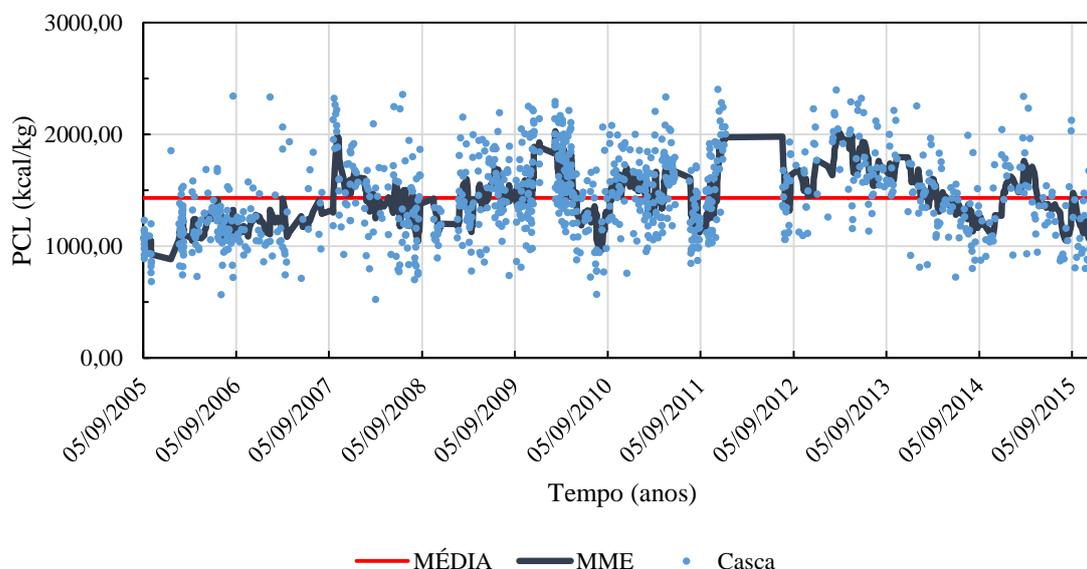


Nota: legenda para os tipos de biomassa equivalem: A = Casca, B = Casca Lavada, C = Casca seca, D = Cavaco Florestal, E = Cavaco, F = Maravalha, G = Serragem e H = Blend (mix)

Notou-se que dos oito tipos de materiais, apenas dois obtiveram médias acima do PCL mínimo estipulado: cavaco florestal e maravalha. Os demais, inclusive o mix, estão levando a UCLA a operar com a capacidade planejada de PCL abaixo do valor de referência, apontando que a biomassa da região, está com qualidade inferior ao desejado.

A casca foi o tipo de material que obteve a segunda menor média para o PCL. De acordo com a Figura 13, nota-se uma tendência de aumento do PCL desde o início da operação até o final de 2009, onde manteve-se oscilando em torno da média até 2013, com posterior tendência de queda.

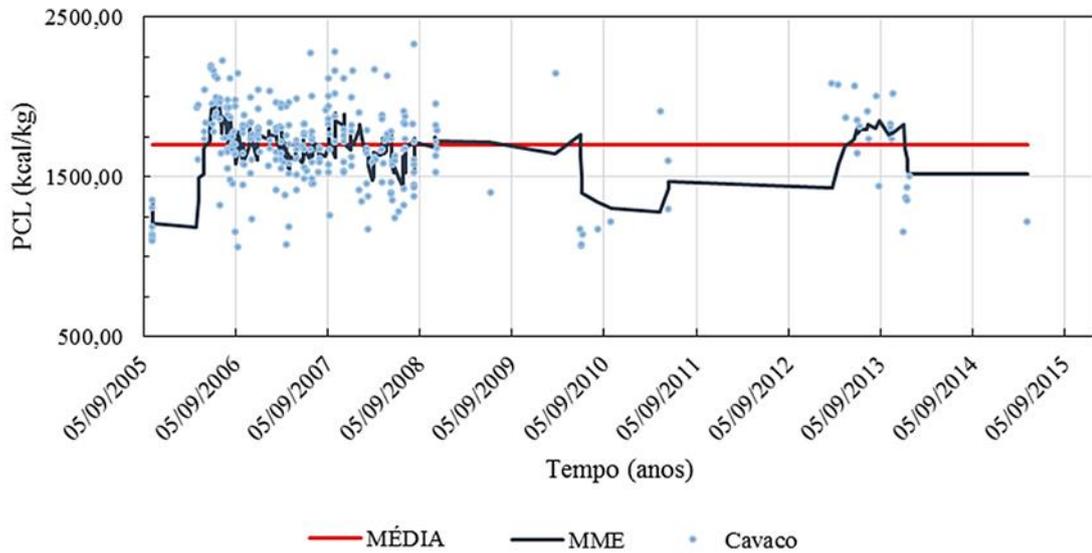
Figura 13 – Evolução do poder calorífico líquido (kcal/kg) da casca ao longo do período de fornecimento à UCLA



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

A Figura 14 mostra os resultados para cavaco que, como discutido anteriormente, tem a maior participação sobre o total de biomassa florestal da UCLA, porém, seu número de análises não é tão expressivo por se tratar de um material com qualidade superior e mais uniforme, não demandando tanta atenção como outros combustíveis como a casca, por exemplo. O PCL médio do cavaco foi maior do que o do mix e que, segundo informações da usina, é utilizado para dosar a qualidade da mistura (mix) de combustíveis.

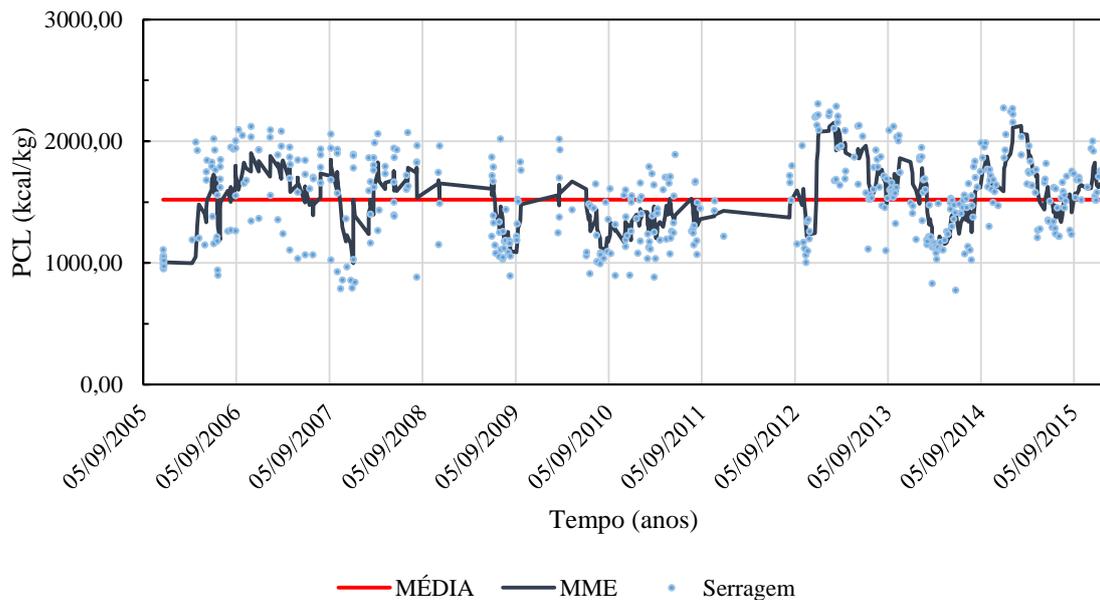
Figura 14 – Evolução do poder calorífico líquido (kcal/kg) do cavaco ao longo do período de fornecimento à UCLA



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

A serragem teve análises continuamente ao longo da década de operação da usina (Figura 15), com elevada variação do poder calorífico ao longo do período de operação da planta.

Figura 15 – Evolução do poder calorífico líquido (kcal/kg) da serragem ao longo do período de fornecimento à UCLA

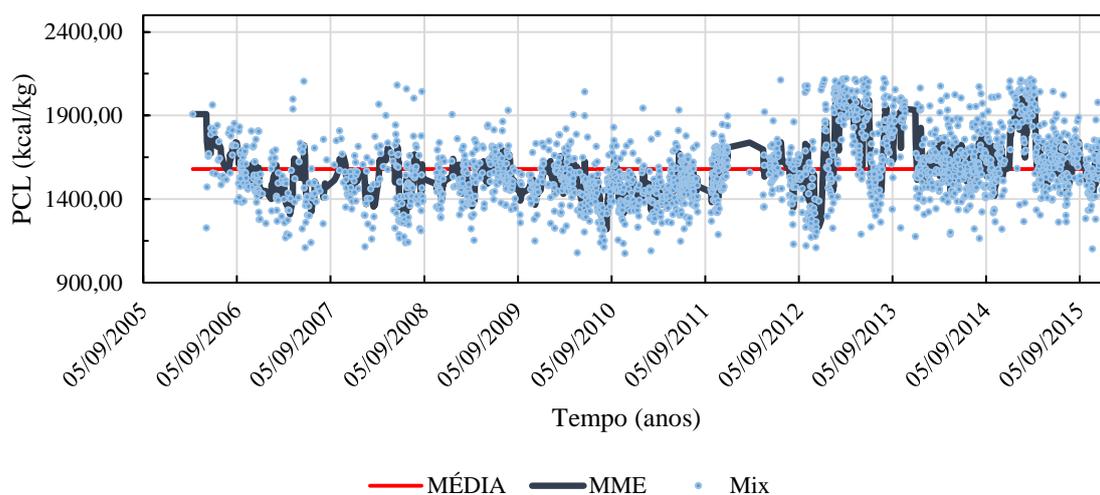


Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Os dados do mix indicam que a partir do final do ano de 2011 tem ocorrido uma tendência de aumento do PCL (Figura 16) o que é muito positivo em termos de geração de energia. O aumento do PCL do material é decorrente da queda dos teores de umidade e de cinzas, já que estas variáveis influenciam diretamente a qualidade da biomassa florestal utilizada para finalidades energéticas.

Saidur et al. (2011) relatam em seu estudo que o PCS para a madeira (valor médio entre diferentes espécies) ficaria em torno de 4239,96 kcal/kg. Valor que se aproxima do estabelecido por Woch et al. (2015) para resíduos de colheita florestal de aproximadamente 4474,19 kcal/kg. Em se tratado do PCS do mix utilizado pela UCLA, há um valor médio de 4610,70 kcal/kg, ou seja, acima do encontrado na literatura.

Figura 16 – Evolução do poder calorífico líquido (kcal/kg) do blend (mix) ao longo do período de fornecimento à UCLA



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Observando os valores de referência salienta-se a necessidade de uma grande quantidade de energia gasta para a evaporação de água a partir de combustíveis de biomassa em uma caldeira de combustão. Quanto menor o teor de umidade do combustível maior é o benefício para a redução das dimensões da caldeira, redução das emissões de sólidos não queimados e eficiência de conversão em energia (LI et al., 2012).

O desenvolvimento da cadeia de suprimentos necessários para fornecer e utilizar a biomassa de uma forma rentável tem avançado, mas é fortemente dependente do tipo de floresta, práticas de colheita, bem como localização, tamanho e concepção de instalações de armazenamento disponíveis. As características do armazenamento são influenciadas pelo

tempo de armazenamento, condições climáticas, composição das espécies, e a forma da biomassa, bem como a geometria e a estrutura da pilha de armazenamento que influenciarão no TU do material, sendo que este, interfere diretamente na geração de energia reduzindo o PCL (BRAND et al., 2011; KRIGSTIN e WETZEL, 2016).

Para o desenvolvimento do setor a partir de biomassa florestal, Ketikids et al. (2016) apontam alguns aspectos que devem ser levantados: ferramentas para investidores na biomassa; rastrear a cadeia de energia de biomassa; capacitar a mão-de-obra que extrai a madeira (segurança e medidas de prevenção); desenvolver um guia com ferramentas para os planos de manejo florestal da próxima geração; e, visualizar opções para a utilização das cinzas de biomassa.

## 2.4. CONCLUSÕES

Os três tipos de biomassa florestal comprados e utilizados para geração de energia em maior quantidade na cogeneradora de energia foram o cavaco, a casca e a serragem. Em épocas com alta necessidade de energia pode ter ocorrido compra de materiais de lugares mais distantes ou de menor qualidade para que pudesse ser suprida a demanda requerida.

As análises do mix possibilitaram a percepção de que houve uma melhoria na qualidade do combustível fornecido para a UCLA, evidenciado pela diminuição dos teores de umidade e cinzas e, conseqüente, aumento do PCL. Essa evolução na qualidade necessita de outros estudos para comprovar se houve ou não implementações tecnológicas e de aprendizado nos fornecedores e na própria usina que levaram a melhorar a matéria-prima.

O teor de umidade dos principais tipos de biomassa florestal utilizadas na usina está abaixo do valor limítrofe adotado para a operação da planta. O TU do mix também está abaixo do valor limítrofe e vem diminuindo ao longo do período de operação da planta, indicando evolução no processamento e tratamento da biomassa para geração de energia. Há uma grande variação dos teores de umidade do combustível, demonstrando campo para posteriores estudos que analisem economicamente formas mais adequadas de remuneração da biomassa.

A média para TC ficou acima do limite de 2% para a maioria da biomassa, inclusive do mix. A empresa vem amostrando cada vez mais a matéria-prima com o objetivo de fiscalizar e cobrar melhorias dos fornecedores. Casca é o material com maior TC, apresentando ainda tendência de aumento. O TC do mix atualmente apresenta tendência de diminuição, operando abaixo do valor da média.

O PCL do mix vem aumentando ao longo do período de operação da planta em função da redução do TU e do TC das biomassas que compõe a mistura que entra para queima na caldeira. Possíveis relações de tais parâmetros com o PCL podem ser melhor estudadas em estudos posteriores.

## REFERÊNCIAS

- ACDA, M.N.; DEVERA, E.E. Physico-chemical properties of wood pellets from forest residues. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 26, n. 4, p. 589-595, 2014.
- ACQUAH, G.E. et al. Heterogeneity of forest harvest residue from Eastern Ontario Biomass Harvests. **Forest Production Journal**, v. 66, n. 3-4, p. 164-175. 2016.
- AKHTARI, S. et al. Economic feasibility of utilizing forest biomass in district energy systems – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 33, p. 117-127, 2014.
- ALAMIA, A. et al. Design of an integrated dryer and conveyor belt for woody biofuels. **Biomass and Bioenergy**, v. 77, p. 92-109, 2015.
- ALBIERO et al. Avaliação da distribuição de sementes por uma semeadora de anel interno rotativo utilizando média móvel exponencial. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 1, p. 86-95, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, NBR 14929: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa. Rio de Janeiro, 2003 (a).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13999**: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira - Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525 °C. Rio de Janeiro, 2003 (b).
- BINOTTO, E. (Org.). **Tecnologia e processos agroindustriais**. 01ed. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, v. 01, p. 141-158, 2007.
- BORLINI, M. C. et al. Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha Parte I: características da cinza. **Cerâmica**, v. 51, p. 192-196, 2005.
- BRAND, M. A. **Energia de Biomassa Florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. v. 01. 114p.

BRAND, M. A. et al. Parâmetros de controle da qualidade e preço da biomassa florestal para a geração de energia. **P&D: Revista Pesquisa e Desenvolvimento da Aneel**, v. 3, p. 36-37, 2009.

BRAND, M. A., et al. O. Storage as a tool to improve wood fuel quality. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 2581-2588, 2011.

BRAND, M. A.; COSTA, V. J. Geração de energia: o futuro da biomassa florestal. In: BRAND, M.A. et al. Caracterização da produção e uso dos resíduos madeiráveis gerados na indústria de base florestal da região serrana catarinense. Relatório de Pesquisa, Lages: UNIPLAC, dez. 2001.

BRAND, M.A.; NEVES, M.D. Levantamento da disponibilidade dos resíduos industriais e florestais de madeira e avaliação da variação de sua qualidade energética em função das condições climáticas anuais, na região de Lages – Santa Catarina. Relatório de Pesquisa, Lages: UNIPLAC e Tractebel Energia, jul. 2005.

BRUTTI, R. C; SIMIONI, F. J. Caracterização e controle do abastecimento de biomassa em uma usina de cogeração de energia. Relatório de pesquisa, Lages: Uniplac, 2006.

CAMPANHARO, M. et al. Utilização de cinza de madeira como corretivo de solo. In: FERTBIO 2008, 2008, Londrina. **Anais do FERTBIO 2008**, 2008, Londrina. Desafios para o uso do solo com eficiência e qualidade ambiental, p. 1-4, 2008.

DE FUSCO, L. et al. A modelling approach for the assessment of an air-dryer economic feasibility for small-scale biomass steam boilers. **Fuel Processing Technology**, v. 134, p. 251-258, 2015.

DENG, L. et al. Effect of water washing on fuel properties, pyrolysis and combustion characteristics, and ash fusibility of biomass. **Fuel Processing Technology**, v. 106, p. 712-720, 2013.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG – DIN. DIN 51900: 1-3 – Testing of solid and liquid fuels. Determining the gross calorific value of solid and liquid fuels using the bomb calorimeter, and calculation of net calorific value – Part 1-3. Berlin, 2000.

FOURNEL, S. et al. Influence of biomass properties on technical and environmental performance of a multi-fuel boiler during on-farm combustion of energy crops. **Applied Energy**, v. 141, p.247-259, 2015.

FULLER, A. et al. Results of fly ash quality for disposal options from high thermal shares up to pure biomass combustion in a pilot-scale and large scale pulverized fuel power plants.

**Renewable Energy**, v. 75, p. 899-910, 2015.

FURTADO, T. S. et al. Mapeamento da frequência de uso e características da biomassa florestal utilizada para geração de energia em Lages, SC. **Ciência Florestal**, v. 22, n. 4, p. 795-802, 2012.

GIRÓN, R.P. et al. Properties of fly ash from forest biomass combustion. **Fuel**, v. 114, p. 71-77, 2013.

KETIKIDS, C. et al. Pilot applications proposal for sustainable woody biomass supply chains.

**International Journal of Energy Research**, v. 40, p. 81-90, 2016.

KOSOV, V. V. et al. Effect of Torrefaction on Properties of Solid Granulated Fuel of Different Biomass Types. **High Temperature**, v. 52, n. 6, 2014.

KRIGSTIN, S. WETZEL, S. A review of mechanisms responsible for changes to stored woody biomass fuels. **Fuel**, v. 175, p. 75-86, 2016.

LI, H. et al. Evaluation of a biomass drying process using waste heat from process industries: A case study. **Applied Thermal Engineering**, v. 35, p. 71-80, 2012.

MEDEIROS, E. N. M. de. Uso da técnica de planejamento experimental para otimização de massa cerâmica com a incorporação de resíduos de cinza de casca de arroz, cinza de lenha e lodo de ETA. 149 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

MOTGHARE, K.A. et al. Comparative study of different waste biomass for energy application. **Waste Management**, v. 47, p. 40-45, 2016.

NISHIGUCHI, S.; TABATA, T. Assessment of social, economic, and environmental aspects of woody biomass energy utilization: Direct burning and wood pellets. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 57, p. 1279-1286, 2016.

NUNES, L.J.R. et al. Biomass combustion systems: A review on the physical and chemical properties of the ashes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 235-242, 2016.

OBERNBERGER, I. et al. Chemical properties of solid biofuels – significance and impact. **Biomass Bioenergy**, v. 30, n. 11, p. 973-82, 2006.

SAIDUR, R. et al. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 2262-2289, 2011.

SAMPAIO, F. S.; MAZZOCHIN, M. S. Espacialidade da economia: inovação e estratégias espaciais no setor de base florestal brasileiro. **Revista RA'EGA**, Curitiba, n. 20, p. 53-65, 2010.

SICSÚ, A. L. **Estatística Aplicada: análise exploratória de dados**. Abraham Laredo Sicsú e Samy Dana. São Paulo: Saraiva, 2012, 160 p.

SIMIONI, F. J. et al. Fatores indutores à inovação tecnológica da indústria madeireira da região de Lages/SC. **RAI: Revista de Administração e Inovação**, v. 12, p. 248-270, 2015.

SIMIONI, F. J.; ANDRADE, S. **Identificação e prospecção de demanda de madeira e biomassa na região do Planalto Sul de Santa Catarina**. Relatório de Pesquisa – Convênio UNIPLAC e Prefeitura Municipal de Otacílio Costa-SC, Lages, SC, Set. 2006.

SIMIONI, F. J.; HOEFLICH, V. A. Cadeia produtiva de energia de biomassa na região do Planalto Sul de Santa Catarina: uma abordagem prospectiva. **Revista Árvore**, v. 34, p. 1091-1099, 2010.

SOFIATTI, V., et al. Cinza de madeira e lodo de esgoto como fonte de nutrientes para o crescimento do algodoeiro. **Revista de biologia e ciências da terra**, v. 7, n. 1, p. 144-152, 2007.

VASKE, N. R. Estudo preliminar da viabilidade do aproveitamento da cinza proveniente de filtro multiciclone pela combustão de lenha de eucalipto em caldeira fumotubular como adição ao concreto. 325f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

VASSILEV, et al. An overview of the chemical composition of biomass. **Fuel**, v. 89, n. 5, p. 913-933, 2010.

VERMA, V.K. et al. Evaluation of the performance of a multi-fuel domestic boiler with respect to the existing European standard and quality labels: Part-1. **Biomass Bioenergy**, v. 35, p. 80-89, 2011.

WOCH, F. et al. Residual Woody Waste Biomass as an Energy Source – Case Study. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 24, n. 1, p. 355-358, 2015.



### 3. INFLUÊNCIA DA QUALIDADE SOBRE O PREÇO DA BIOMASSA FLORESTAL UTILIZADA PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA EM LAGES - SC

#### Resumo

O objetivo deste estudo foi propor duas formas para cálculo do preço final a ser pago ao fornecedor de biomassa florestal, baseadas na compra do conteúdo energético do combustível. Foram considerados os parâmetros de qualidade de teor de umidade e teor de cinzas para uma Unidade de Cogeração localizada em Lages, Santa Catarina. Para os três combustíveis mais adquiridos pela usina (cavaco, serragem e casca), a metodologia propôs dois modelos: o Modelo 1, baseado no PCL estimado considerando o TU e TC da biomassa; e o Modelo 2 com o desconto do TC sobre o peso seco de biomassa e posterior estimativa do PCL considerando o TU. O Modelo 1 calculou o PCL estimado com os dados de TU e TC de cada amostra e calculou o preço final após estabelecer o valor por unidade de energia (kcal), podendo-se optar ainda, pela implantação de um bônus ou desconto sobre o total. Para o Modelo 2, foi feito o desconto normal do peso das cinzas e comparado com desconto de cinzas calculado por expressão matemática geral sob diferentes taxas. Estimou-se o PCL para cada TU com base na equação de regressão linear simples entre os parâmetros. O preço final corresponde ao cálculo entre peso final e o PCL estimado sendo sugerida aplicação de bônus ou desconto para materiais de melhor ou pior qualidade, respectivamente. Percebeu-se significativa redução no peso da biomassa ofertada após o desconto das cinzas, principalmente para casca que possui altos TC. O preço pago por kcal da biomassa revelou ser mais coerente do que o preço por tonelada, pois considera o peso das cinzas e da água contida no material.

**Palavras-chave:** Poder Calorífico Líquido. Pagamento por qualidade. Conteúdo energético da biomassa.

#### Abstract

The objective of this study was to propose two ways to calculate the final price to be paid to the supplier of forest biomass, based on the purchase of fuel energy content. The quality parameters of moisture content and ash content for a Cogeneration Plant located in Lages, Santa Catarina, were considered. For the three fuels most acquired by the plant (chip, sawdust and bark), the methodology proposed two models: Model 1, based on estimated net calorific value considering the TU and TC of the biomass; and Model 2 with the TC discount on biomass dry weight and subsequent estimation of PCL considering the TU. Model 1 calculated the estimated PCL with

the TU and TC data of each sample and calculated the final price after establishing the value per unit of energy (kcal), being able to choose, by the implementation of a bonus or discount on the total. For Model 2, the normal ash weight discount was made and compared to ash discount calculated by general mathematical expression under different rates. The PCL for each TU was estimated based on the simple linear regression equation between the parameters. The final price corresponds to the calculation between final weight and the estimated PCL being suggested bonus or discount application for materials of better or worse quality, respectively. Significant reductions in biomass weight were observed after ash discharges, especially for bark with high TC. The price paid per kcal of biomass proved to be more consistent than the price per ton because it considers the ash and water weight contained in the material.

**Keywords:** Net Calorific Value. Payment by quality. Energy content of biomass.

### 3.1. INTRODUÇÃO

A geração de energia a partir de combustíveis florestais tem revelado várias vantagens, principalmente em termos de mitigação de impactos ambientais advindos de outras fontes de energia (SHABANI et al., 2013). Os autores ainda apontam que a comercialização da biomassa florestal como fonte de energia, no entanto, ainda está em desenvolvimento, uma vez que desafios técnicos e econômicos impedem seu uso intensificado em consequência de os resíduos florestais serem produzidos em diferentes regiões, o que aumenta os custos de coleta, manuseio e transporte. Além disso, há variabilidade na quantidade e qualidade da biomassa florestal devido à acessibilidade durante o ano, condições climáticas e de pré-processamento, transporte e armazenamento (TAHVANAINEN e ANTTILA, 2011), além da concorrência com outros usuários finais (CAMBERO e SOWLATI, 2014). A otimização das cadeias de suprimento poderia ajudar na comercialização dessa fonte de energia sustentável, reduzindo seus custos (MAFAKHERI e NASIRI, 2014; MIRKOU EI et al., 2017). Segundo Brown et al. (2013), os resíduos florestais são ainda um recurso de biomassa subutilizado e que têm, portanto, um potencial considerável para uma maior utilização.

As características da matéria-prima também desempenham um papel importante no processo de produção (RENTIZELAS et al., 2009; ALFONSO et al., 2009). A qualidade da biomassa depende de uma variedade de fatores, tais como PC, TU, TC, propriedades físicas, químicas e térmicas. O teor de umidade afeta diretamente o PC, uma vez que parte da energia contida na biomassa vai ser usada para evaporar a água no início do processo de combustão

(Poder Calorífico Líquido – PCL) (SHABANI e SOWLATI, 2013; DEMIRBAS, 2005; LEHTIKANGAS, 2001; SAIDUR et al., 2011; TAHVANAINEN e ANTTILA, 2011; CAVALCANTE dos SANTOS et al., 2013; PROTÁSIO et al., 2013).

No que tange às cinzas, segundo um estudo realizado por Dermirbas (2005), o volume gerado no processo de produção de energia depende de dois fatores: um é resultado da contaminação com solo e rochas e o outro é resultado dos minerais da folhagem ou madeira. A eliminação de cinzas é um desafio para a maioria das usinas e tem custos econômicos, ambientais e sociais para a empresa (SHABANI e SOWLATI, 2013). A biomassa de alto teor de cinzas é menos desejável para ser usada como combustível (DEMIRBAS, 2005), pois após sua queima, os resíduos (cinzas) necessitam de destinação correta, que geralmente está associada a custos com transporte para locais que a utilize ou trate (GIRÓN et al., 2015). Uma alternativa de destino desses resíduos da queima tem sido a aplicação no solo para ciclagem de nutrientes (INGERSLEV et al., 2011). Além disso, aglomerados de cinza podem se formar no interior da caldeira fazendo com que seja preciso parar seu funcionamento para manutenção e retirada do material acumulado.

Na cadeia de suprimento da biomassa florestal, os custos de aquisição da biomassa incluem todos os custos associados com a coleta, armazenamento, pré-processamento e transporte de biomassa de sua fonte para a planta (CAMBERO e SOWLATI, 2014). O custo de transporte da biomassa depende do tamanho da usina, disponibilidade de matéria-prima (MARZILIANO et al., 2016, PAIANO e LAGIOIA, 2016), distância média de transporte (STJEPAN et al., 2015), densidade de biomassa, capacidade de transporte do veículo e velocidade de deslocamento. Os custos de transporte e manuseio geralmente representam uma proporção significativa do custo total da biomassa entregue (SHABANI e SOWLATI, 2013). Assim, quanto maior o teor de cinzas e de umidade da biomassa maiores são os custos de transporte desse material e menor a geração de energia líquida no processo.

Cambero e Sowlati (2014) salientam ainda que é necessário o desenvolvimento de ferramentas de apoio à decisão que considerem critérios econômicos, ambientais e sociais para a elaboração e planejamento de cadeias de suprimento de biomassa florestal. Leban et al. (2016) afirmam ainda que a biomassa florestal para a energia não deve ser o principal objetivo do manejo florestal, mas sim um subproduto de outros objetivos.

A cadeia de suprimento com diferentes tipos de materiais (mix) sendo utilizados como biomassa florestal pode reduzir o custo, diminuindo os requisitos de armazenagem,

especialmente para os tipos sazonais de biomassa (RENTIZELAS et al., 2009). Cambero e Sowlati (2014) relatam que avaliações técnico-econômicas são necessárias para investigar a viabilidade técnica e o potencial econômico dos projetos propostos e fornecer comparações econômicas de base entre diferentes escolhas na cadeia de suprimento de biomassa florestal. Essas avaliações fornecem informações e análises sólidas para justificar projetos envolvendo grandes investimentos de capital e auxiliar decisões específicas ao longo da cadeia de suprimentos. É importante que a usina receba a quantidade necessária de biomassa no momento certo com um preço competitivo para atender a demanda de eletricidade e maximizar o lucro (SHABANI E SOWLATTI, 2013; ROTHE et al., 2015).

No intuito de impulsionar mais o uso da biomassa florestal como recurso energético, este estudo teve como objetivo principal propor uma forma de pagamento pela aquisição da biomassa que se baseia na compra por conteúdo energético do combustível, considerando os parâmetros de qualidade (teor de umidade e teor de cinzas) fornecidos por uma Unidade de Cogeração localizada em Lages, Santa Catarina.

### 3.2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo baseia-se em uma série histórica de dados de qualidade da biomassa que representam o universo de fornecedores de biomassa florestal para a Unidade de Cogeração Lages (UCLA) da ENGIE Brasil Energia ao longo de 10 anos: 2005-2015. As amostras foram coletadas como uma atividade rotineira de controle de qualidade do material comprado pela usina. O banco de dados possui resultados de qualidade da biomassa de 4.937 amostras.

Os parâmetros de qualidade da biomassa analisados foram o teor de umidade, teor de cinzas e poder calorífico (superior e líquido) da biomassa de cada fornecedor. As análises foram realizadas com base na norma NBR 14929 para teor de umidade (ABNT, 2003b) (base úmida), NBR 13999 para teor de cinza (ABNT, 2003a) e DIN 51900 para poder calorífico (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2000). Também se utilizaram informações referentes as quantidades adquiridas de cada tipo de biomassa, bem como o total anual adquirido pela usina. Toda a biomassa florestal utilizada é oriunda de plantios florestais ou do processamento industrial da madeira de espécies do gênero *Pinus*, principalmente da espécie *Pinus taeda*, que é a mais cultivada na região de abrangência da UCLA.

#### 3.2.1. Análise exploratória dos dados

Preliminarmente à proposição das metodologias de pagamento por qualidade da biomassa, fez-se uma análise exploratória do banco de dados para seleção das amostras válidas.

Inicialmente, filtrou-se aqueles que eram pouco representativos ou incompletos. Assim, foram excluídos dados dos fornecedores com menos de cinco amostras de material analisadas, com informações incompletas ou faltantes (sem data de coleta, identificação da empresa ou tipo de material) e dados de tipos de biomassa com menos de 10 amostras analisadas. Dados referentes à mistura de materiais que efetivamente entra na caldeira (mix) e aos passivos ambientais (materiais retirados de antigos depósitos de madeira) também não foram considerados na proposição deste modelo (2302 amostras). Considerando estes critérios, foram utilizados para a proposição das metodologias os três materiais mais adquiridos pela usina: cavaco, serragem e casca.

A exclusão dos *outliers* foi realizada utilizando-se da análise de regressão linear entre os parâmetros de qualidade. O modelo adotado foi “ $PCL = \beta_0 + \beta_1 TC + \beta_2 TU + e$ ”, pelo método dos mínimos quadrados que determina a reta que melhor se ajusta aos pontos, minimizando os resíduos ( $e$ ). A exclusão dos *outliers* foi realizada mediante a análise dos resíduos, optando-se pela não utilização das amostras que extrapolaram os limites inferior ( $\mu - 2\sigma$ ) e superior ( $\mu + 2\sigma$ ). Após a exclusão dos *outliers*, o quantitativo de dados viáveis utilizados para a proposição do modelo foram: 273 amostras de cavaco, 490 de serragem e 1092 de casca.

O modelo de pagamento de biomassa pelo valor energético considerou a substituição do pagamento por peso bruto da biomassa (R\$/t) pelo pagamento segundo o valor energético (R\$/kcal), considerando a proposição de dois modelos.

### **3.2.2. Modelo 1: Pagamento por PCL considerando TU e TC**

#### *Etapa 1: Equação do PCL*

Primeiramente foi estabelecida a regressão linear múltipla entre PCL, TU e TC a qual gerou a equação do PCL baseada nesses dois parâmetros: “ $PCL = \beta_0 + \beta_1 TC + \beta_2 TU + e$ ”. Com base na equação, basta ter os dados de TC e TU e será estimado um PCL para aquele material.

#### *Etapa 2: Determinação do Preço de acordo com o valor energético*

Foi adotado como base o valor de 1850 kcal/kg de PCL, o qual é o valor de referência projetado para o funcionamento da caldeira e, para este, foram estabelecidos os preços de mercado praticados atualmente para cada um dos três tipos de biomassa florestal estudados. Calculou-se o preço da kcal de energia pela divisão do preço da biomassa (R\$/kg) pelo PCL de referência. Assim, para determinar o preço final de cada tonelada de material com as

características de TU e TC, basta calcular o PCL pela equação e multiplicá-lo pelo preço da kcal (R\$/kcal).

*Etapa 3: Definição das categorias de bônus e descontos*

Para o PCL de referência foi determinada a taxa de 0,0% de desconto e para valores superiores ou inferiores a ele, foi aplicada, respectivamente, a taxa de  $\pm 6,0\%$  para cada 150 kcal/kg (determinados empiricamente) de variação no PCL, a fim de bonificar a biomassa com melhor qualidade e descontar aquelas com PCL de qualidade inferior.

*Etapa 4: Determinação do preço final*

O valor final para o Modelo 1 é determinado pela equação: Valor Final (R\$) = Preço (R\$/kcal) \* PCL (kcal/kg) \* 1000 kg \* Peso fornecido (t). As categorias de bônus e desconto podem ser inseridas opcionalmente ao preço final.

**3.2.3. Modelo 2: Pagamento por PCL, considerando TU após desconto do TC**

*Etapa 1: Desconto do teor das cinzas do peso da biomassa fornecida*

Com base na variação histórica do TC de cada material, foram feitas duas propostas de desconto: normal e com bônus/desconto. No desconto normal, o percentual de cinzas da amostra é descontada do peso seco da biomassa fornecida, desconsiderando a umidade. Já para o bônus/desconto, foi estabelecida uma expressão matemática geral para o cálculo do desconto com taxa de crescimento exponencial à medida que aumenta o teor de cinzas. A equação (3) proposta foi:

$$DC = (x + nj)(1 + i)^{ne} \quad (3)$$

Onde: DC = desconto de cinzas; x = teor de cinzas mínimo da caldeira (2,0%); n = número de passos no incremento j ((TC-x)/j); j = incremento ao valor inicial x; i = taxa de crescimento (%), e = fator de crescimento exponencial.

Para cada tipo de material, foram propostas empiricamente três taxas de crescimento diferentes para o cálculo do desconto (Tabela 5), mantendo-se o fator de crescimento exponencial igual a 1,00. Tanto a taxa (t) como o fator de crescimento exponencial (e) podem ser alterados, dependendo das condições de mercado da biomassa florestal, do padrão de qualidade da biomassa fornecida e do interesse da usina cogeneradora em promover mudanças no comportamento dos fornecedores. Para ambos os casos, os descontos foram aplicados para TC superiores a 2,00%, pois este é o valor limite projetado para funcionamento da caldeira e, sendo

assim, TC menores atendem ao padrão de qualidade requerido. Optou-se pelo desconto das cinzas sobre o peso devido ao fato de que se trata de um material inerte presente na biomassa. Além disso, foi observada correlação relativamente baixa entre o TC e o PCL: -0,43 para cavaco, -0,012 para serragem e -0,34 para casca).

Tabela 5 – Taxas de crescimento (i) propostas empiricamente para o cálculo do DC para cada tipo de material

<b>CASCA</b>	<b>CAVACO</b>	<b>SERRAGEM</b>
0,02	0,05	0,10
0,04	0,10	0,20
0,06	0,15	0,30

#### *Etapa 2: Determinação do PCL da biomassa*

O PCL foi estimado a partir do modelo de regressão linear simples “ $PCL = \beta_0 + \beta_1 TU + e$ ”, considerando a amplitude de variação histórica do TU.

#### *Etapa 3: Determinação do Preço de acordo com o valor energético*

O preço da biomassa em R\$/t foi convertido considerando o PCL de referência da caldeira, ou seja, a esse PCL corresponde o preço (R\$/t) praticado atualmente para cada tipo de material. A partir disso, foi estabelecido, para cavaco, serragem e casca o preço equivalente a uma kcal de energia (divisão do preço do material pelo PCL estimado de referência). Este valor foi utilizado para obtenção do preço equivalente ao PCL (multiplicação do PCL estimado pelo Preço da kcal). Portanto, calculou-se quanto vale cada tonelada de material que contenha aquele determinado PCL.

#### *Etapa 4: Definição das categorias de bônus e descontos*

Foi estabelecida empiricamente uma variação percentual de  $\pm 0,5\%$  para bônus ou desconto do preço (Tabela 6). Para TU menores que o valor referencial, foi acrescentado 0,5% a cada 1,0% de variação do TU (bônus ao fornecedor). Já para os materiais de umidade superior à referência, a cada 1,0% de aumento, propôs-se o desconto de 0,5% no preço. Dessa forma determinou-se o preço equivalente ao PCL com bônus/desconto multiplicando a taxa de variação correspondente pelo preço equivalente, somando o resultado ao preço equivalente ao PCL.

Tabela 6 – Exemplos de Bônus/Desconto para cavaco, serragem e casca

CASCA			CAVACO E SERRAGEM		
TU	Bônus	(%)	TU	Bônus	(%)
20		12,00	30		11,00
25		9,50	35		8,50
30		7,00	40		6,00
35		4,50	45		3,50
40		2,00	50		1,00
<b>44*</b>		<b>0,00</b>	<b>52*</b>		<b>0,00</b>
Desconto			Desconto		
50	-3,00	55	-1,50		
55	-5,50	60	-4,00		
60	-8,00	65	-6,50		
65	-10,50	70	-9,00		
70	-13,00	75	-11,50		
75	-15,50	80	-14,00		

Nota: A cada 1% de variação do TU corresponde a 0,50% na variação de bônus/desconto.

\*Valores referenciais de TU obtidos a partir dos resultados.

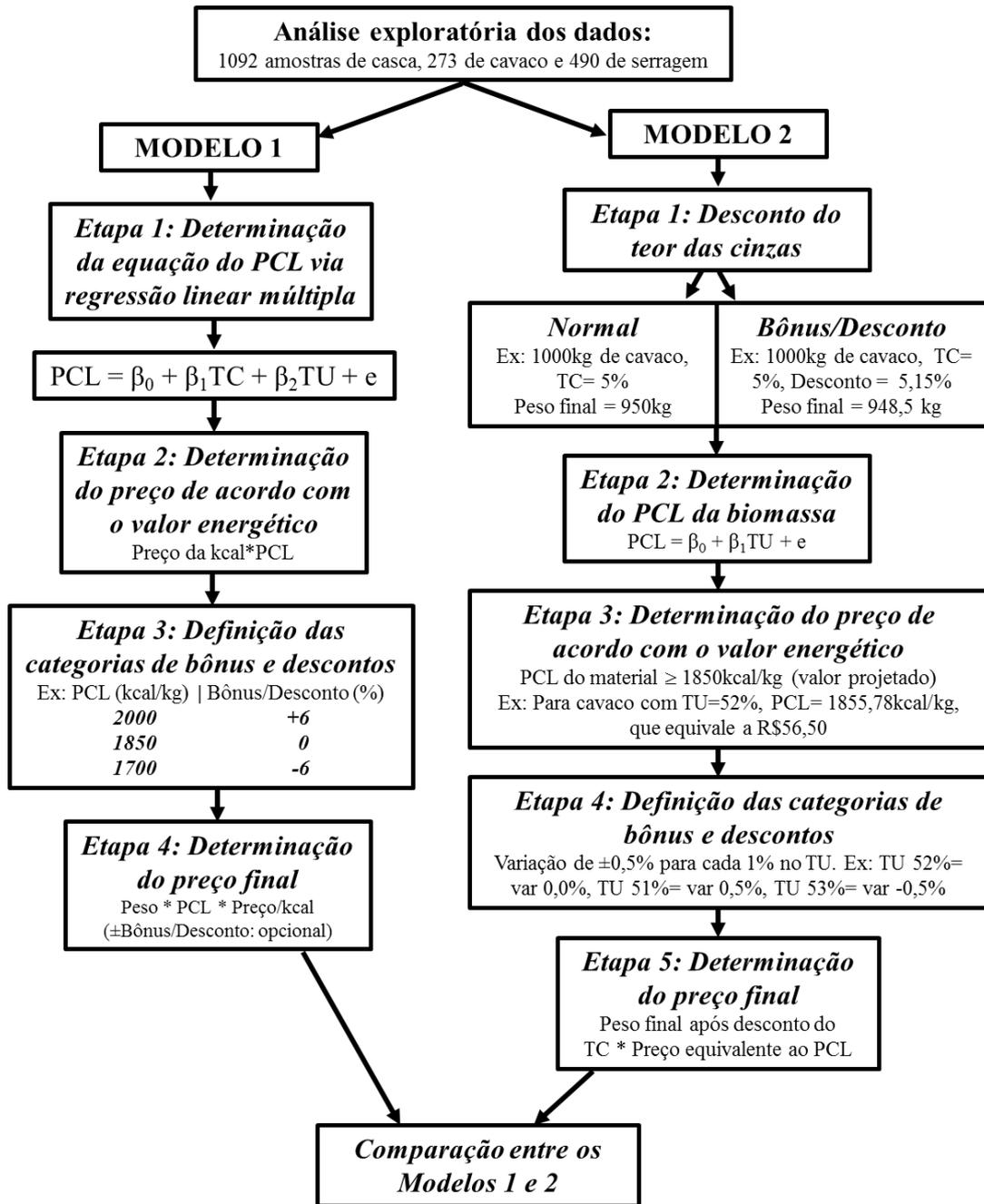
#### *Etapa 5: Determinação do preço final*

O cálculo do preço final a ser pago ao fornecedor considerou a categoria de bônus ou desconto conforme o TU da biomassa. O modelo multiplica o peso final (toneladas), livre de cinzas, pelo preço da tonelada equivalente ao PCL resultando no valor total a ser pago ao fornecedor.

#### **3.2.4. Comparação entre os Modelos 1 e 2**

Para analisar a similaridade entre os dois modelos propostos, comparou-se os preços finais obtidos considerando a qualidade da biomassa disponibilizada no banco de dados da UCLA. Assim, com as medidas de TC e TU, foram calculados os valores finais (R\$) para o Modelo 1 e para o Modelo 2, adotando-se (empiricamente) como referência 10 toneladas de material, observando os preços por tonelada (R\$/t) sem utilização de bônus/desconto. Foi utilizado todo o banco de dados de cavaco, serragem e casca. Calculou-se ainda, a correlação entre os modelos objetivando avaliar o grau de ajuste entre os modelos. A proposição do presente estudo sobre pagamento pela biomassa florestal segue o esquema demonstrado na Figura 17.

Figura 17 – Esquema de etapas dos Modelos 1 e 2 para pagamento da biomassa florestal



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

### 3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.3.1. Cavaco

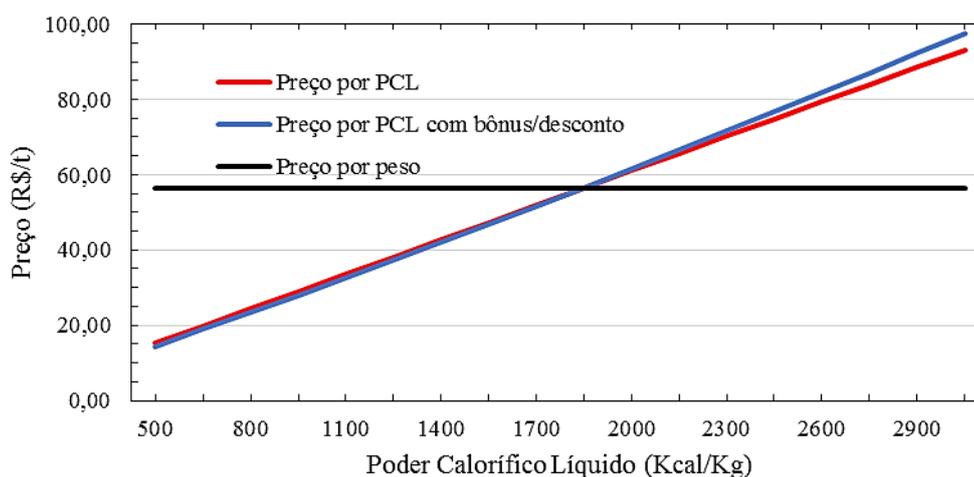
O cavaco é considerado um combustível de boa qualidade e por essa razão é o mais adquirido pela usina. Em 2015, cerca de 250 mil toneladas desse material foram compradas, o que representa 73,0% do total de biomassa obtida pela empresa nesse ano. O preço pago por esse material atualmente é de R\$56,50 por tonelada, podendo variar de acordo com as

características do frete para transporte do material até a usina. Se os resíduos florestais forem transportados na sua forma bruta ou como cavacos de madeira, a capacidade do caminhão fica limitada em volume, em vez de peso e, como resultado, são necessárias mais viagens de entrega do que se o caminhão estivesse transportando uma substância mais densa em capacidade de peso total (SULTANA e KUMAR, 2011). Esse é um fator que aumenta o preço de venda do cavaco.

Os parâmetros de qualidade analisados em laboratório apontam que o cavaco possui um TU médio de 55,27%, com desvio padrão de 4,52%. Já a média do TC situa-se em 1,67% ( $\sigma = 2,05\%$ ), revelando-se bastante inferior quando comparado a outros materiais (como casca) e atendendo ao valor de referência estipulado como máximo para a caldeira (TC = 2,00%). O PCL desse combustível é em média igual a 1699,96 kcal/kg ( $\sigma = 260,97$  kcal/kg).

Para a aplicação do Modelo 1 considerou-se o preço pago atualmente de R\$ 56,50 por tonelada, utilizando-se como base 1850 kcal/kg, correspondendo a R\$ 30,54 por cada 1000 kcal de material. A equação obtida para o PCL estimado foi:  $PCL = 4440,17 - 15,19TC - 49,12TU$  ( $R^2$  ajustado = 0,9202 e erro padrão = 86,39), com  $p < 0,01$  para todos os parâmetros da equação. O preço equivalente ao PCL é crescente à medida que há um aumento no PCL e a taxa de bônus ou desconto adotadas são evidenciadas na Figura 18.

Figura 18 – Preços por PCL para cavaco considerando o pagamento por peso e pelo Modelo 1

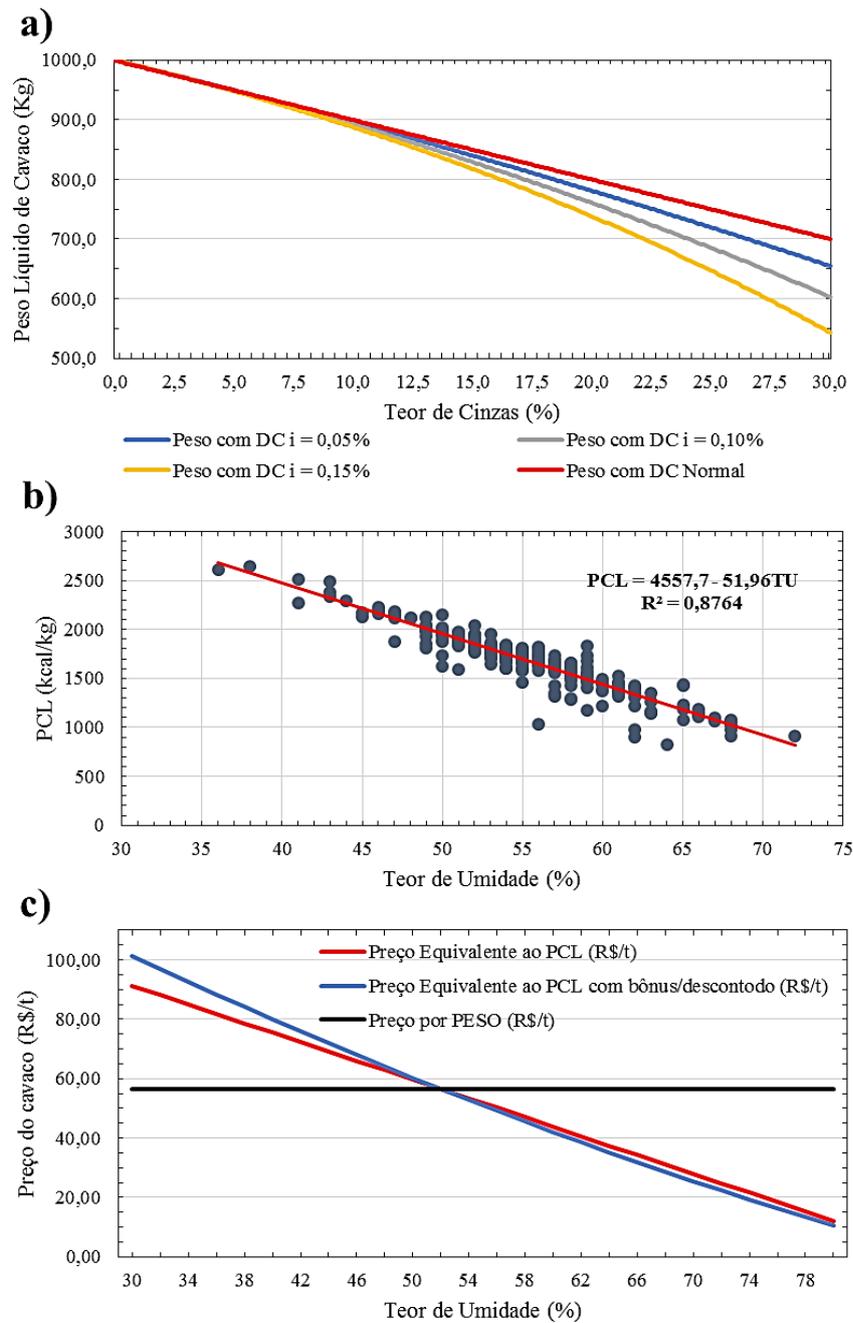


Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Para o Modelo 2, a proposta de desconto do peso das cinzas baseou-se nos resultados do banco de dados que apresentou uma variação entre 0,18% (mínimo) e 29,49% (máximo) no TC. Foi estabelecido o valor limite de 2,00% (Figura 19-a). As taxas propostas resultam,

respectivamente, em uma maior ou menor flexibilidade no abatimento do TC, cabendo aos interessados a tomada de decisão da taxa mais aplicável ao mercado.

Figura 19 – Pagamento por qualidade do cavaco segundo o modelo 2: a) Peso Líquido do cavaco com DC normal e DC com diferentes taxas (i); b) Relação entre PCL e TU; c) Relação entre preço por tonelada de material com variação do TU



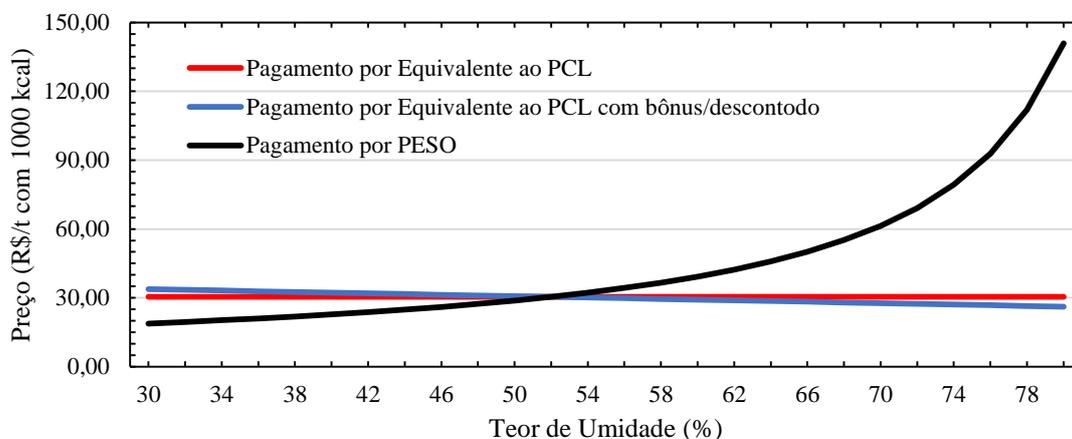
Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

O TU mínimo encontrado no banco de dados de análises é de 36% e o máximo é igual a 72%. O PCL estimado foi calculado pela equação linear obtida na estatística de regressão entre TU e PCL:  $PCL_{estimado} = 4557,7 - 51,96TU$ , com  $R^2 = 0,8764$  (Figura 19-b). Essa equação aproxima-se do estudo de Brand (2010). Para 52% de umidade, foi encontrado o PCL estimado de 1855,78 kcal/kg, sendo esse adotado como referência e correspondente ao preço de R\$ 56,50.

A Figura 19-c mostra a linha de preço constante quando se considera apenas o peso da biomassa como critério de pagamento. Ao levar em conta o preço equivalente ao PCL, há uma queda linear do valor pago por tonelada conforme aumenta o TU, já que este é influente sobre o PCL fazendo-o decair com o seu acréscimo. Considerando o bônus ou desconto, foi aplicada a taxa de +0,5% para TU menores que 52% e -0,5%, respectivamente, para cada 1% de variação no TU do cavaco. Com isso, verifica-se uma bonificação ao fornecimento de combustíveis mais energéticos e um desconto no caso de materiais de baixa qualidade. Essa taxa de incentivo ou desconto pode ser definida pela empresa, de acordo com as necessidades do mercado.

Analisando o preço da tonelada de material contendo 1000 kcal de energia (Figura 20) percebe-se um crescimento exponencial do preço conforme aumenta o TU, quando a modalidade de pagamento é feita considerando como critério somente o peso (toneladas). Já o pagamento equivalente ao PCL resulta em um preço constante de R\$ 30,45 por tonelada de material que contenha 1000 kcal, podendo sofrer variações para mais ou para menos, dependendo da taxa de bonificação/desconto aplicada. O bônus ou desconto do pagamento por PCL, resulta em um preço mais elevado para o cavaco mais seco, mas que proporcionará outros benefícios para o processo de produção de energia, tais como maior rendimento e menor consumo de insumos por energia gerada.

Figura 20 – Comparação do preço do cavaco segundo os critérios de peso, PCL e PCL com bônus/desconto



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

O preço final a ser pago pela compra do cavaco, leva primeiramente em consideração, nesse modelo proposto, o desconto do peso das cinzas do total. O peso restante é, então multiplicado pelo preço por tonelada equivalente ao PCL, resultando no valor final a ser pago pela usina. A Tabela 7 apresenta exemplos de valores finais a serem pagos para o cavaco com diferentes características.

Tabela 7 – Exemplos de cálculo do valor total para diferentes TC e TU de cavaco

Peso Bruto (t)	TU (%)	Peso Seco (t)	TC (%)	Desconto de cinzas (%)	Peso final (t)	Modelo 1		Modelo 2	
						PCL (kcal/kg)	Valor Final (R\$)*	Preço (R\$/t)	Valor Final (R\$)
10	40	6,00	1,5	1,5000	9,9100	2.452,76	<b>749,09</b>	75,48	<b>748,04</b>
10	40	6,00	3,5	3,5263	9,7884	2.422,38	<b>739,81</b>	75,48	<b>738,86</b>
10	40	6,00	11,0	11,5062	9,3096	2.308,47	<b>705,02</b>	75,48	<b>702,72</b>
10	54	4,60	1,5	1,5000	9,9310	1.765,14	<b>539,08</b>	53,34	<b>529,68</b>
10	54	4,60	3,5	3,5263	9,8378	1.734,77	<b>529,81</b>	53,34	<b>524,71</b>
10	54	4,60	11,0	11,5062	9,4707	1.620,85	<b>495,02</b>	53,34	<b>505,13</b>
10	60	4,00	1,5	1,5000	9,9400	1.470,45	<b>449,08</b>	43,84	<b>435,81</b>
10	60	4,00	3,5	3,5263	9,8589	1.440,07	<b>439,81</b>	43,84	<b>432,26</b>
10	60	4,00	11,0	11,5062	9,5398	1.326,15	<b>405,01</b>	43,84	<b>418,27</b>

\*Nota: O valor final do modelo 1 leva em conta o preço de R\$ 0,000031/kcal

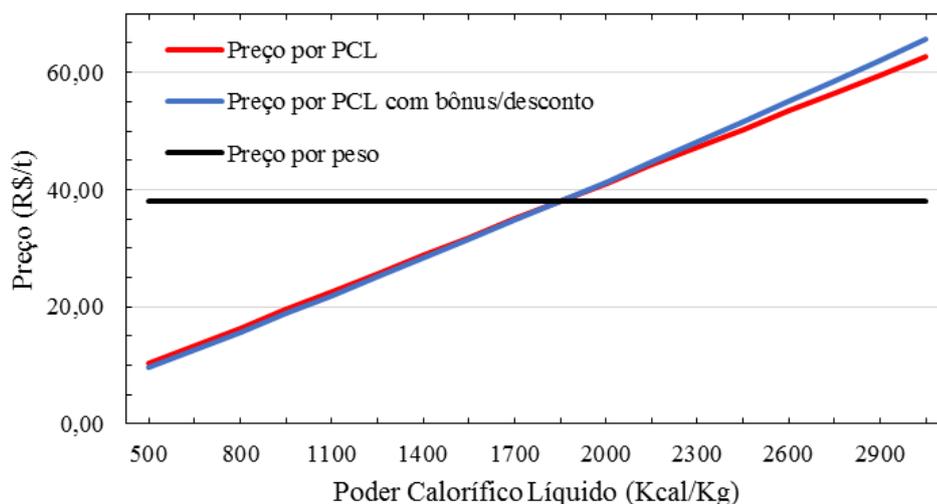
### 3.3.2. Serragem

A serragem é o segundo material mais comprado pela usina. Em 2015 foram adquiridas 47,5 mil toneladas desse combustível, valor que representa 13,9% do total de biomassa obtido no mesmo ano. Atualmente, o preço pago pela serragem é de aproximadamente R\$ 38,00 por tonelada, podendo variar com as condições de frete do material.

Através das análises de laboratório feitas para controle de qualidade, a serragem possui um TU médio de 59,38% ( $\sigma = 6,62\%$ ). Já seu TC é o mais baixo quando comparado com os outros tipos de materiais, alcançando uma média de 1,03% ( $\sigma = 0,95\%$ ), valor que se situa dentro do máximo estabelecido para o funcionamento da caldeira (2,00%). Com essas características de TU e TC, o PCL desse combustível possui uma média de 1519,96 kcal/kg com um desvio padrão de 345,74 kcal/kg.

A Figura 21 representa a aplicação do Modelo 1 de pagamento. A equação obtida para o cálculo do PCL foi:  $PCL = 4450,66 - 7,75TC - 49,04TU$  ( $R^2$  ajustado = 0,8222 e erro padrão = 158,97), com  $p < 0,01$  para os parâmetros  $\beta_0$  e  $\beta_2$  e  $p < 0,05$  para  $\beta_1$  da equação. O preço por 1000 kcal calculado para serragem, foi de R\$20,54, considerando o preço atual de R\$38,00 como referência para o PCL de 1850 kcal/kg. Os preços equivalentes ao PCL com bônus/desconto crescem linearmente com o aumento do conteúdo energético do material.

Figura 21 – Preços por PCL para serragem pelo Modelo 1

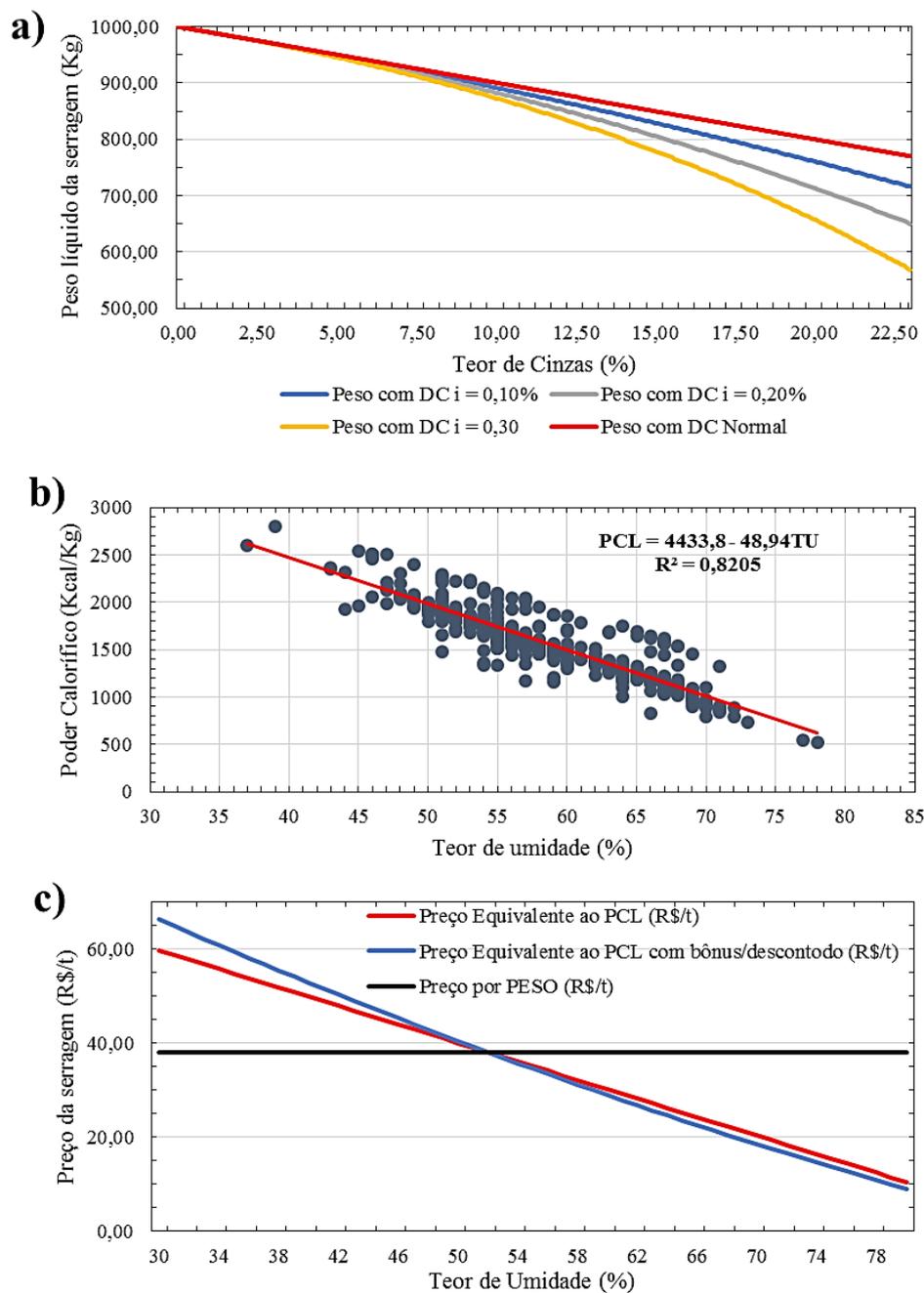


Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

A variação de TC das amostras de serragem foi de 0,08% (mínimo) a 21,82% (máximo). Essa escala é menor que a dos outros materiais (casca e cavaco), o que condiz com o estudo de Lehtikangas (2001), que define que a serragem tem um menor teor de cinzas do que a casca e

outros resíduos de exploração. Para os valores que excedem o limite projetado, no Modelo 2 as curvas representam as taxas da mais suave à mais efetiva na penalidade, necessitando ser decidido pela empresa o valor mais adequado ao mercado (Figura 22-a).

Figura 22 – Pagamento por qualidade da serragem segundo o modelo 2: a) Peso Líquido da serragem com DC normal e DC com diferentes taxas (i); b) Relação entre PCL e TU; c) Relação entre preço por tonelada de material com variação do TU



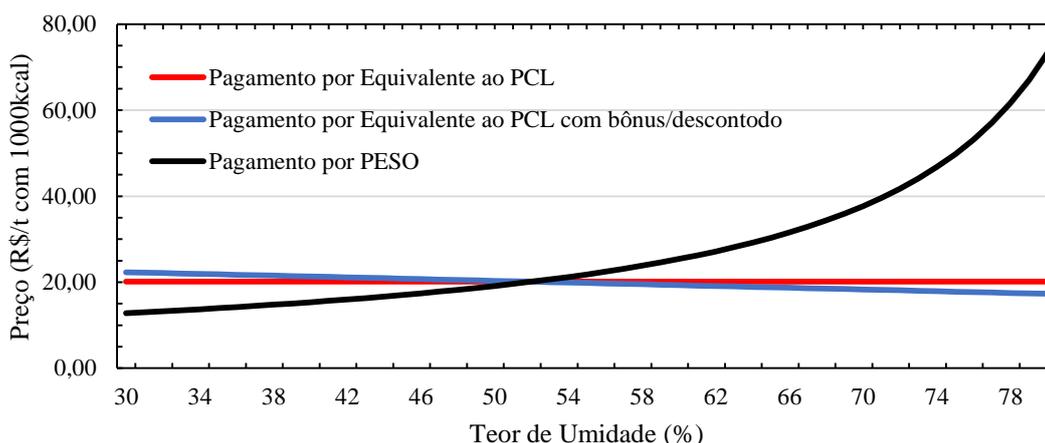
Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

O TU mínimo definido no banco de dados é 37% chegando ao valor máximo de 78%. Para esse intervalo, o cálculo do PCL estimado seguiu a equação linear obtida na estatística de regressão entre os dados de PCL e TU:  $PCL\ estimado = 4433,8 - 48,94TU$ , com um  $R^2 = 0,8205$  (Figura 22-b), tal equação assemelha-se a apresentada por Brand (2010). O TU referencial da serragem foi 52% com o PCL estimado de 1888,78 kcal/kg.

A Figura 22-c representa o preço por peso (desconsiderando o TU), o preço equivalente ao PCL e o preço equivalente ao PCL com bônus/desconto. Ao adquirir biomassa pelo peso fornecido, o comprador paga constantemente R\$ 38,00 a tonelada, enquanto que se considerar o conteúdo energético do material e consequentemente seu TU, o preço cai linearmente conforme cresce a umidade da serragem. A inclusão da taxa de variação de  $\pm 0,5\%$  bonifica os fornecedores de serragem com umidade inferior a 52% e desconta para aqueles que ofertam o combustível com mais água.

A curva de preço por tonelada de material com 1000 kcal aponta um valor crescente exponencialmente para o pagamento por peso. O preço em caso de pagamento equivalente ao PCL é R\$ 20,12/t que contenha 1000 kcal de energia, oscilando para mais ou para menos no caso do uso do bônus ou desconto (Figura 23).

Figura 23 – Comparação do preço da serragem segundo os critérios de peso, PCL e PCL com bônus/desconto



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Por menor que pareça a oscilação com o emprego do bônus/desconto, já estaria sendo uma forma de bonificar os fornecedores que trazem uma serragem de boa qualidade o que poderia estimular outros a elevar a qualidade da sua matéria-prima. A Tabela 8 apresenta exemplos de valores finais para serragem com diferentes características de cinzas e umidade.

Tabela 8 – Exemplos de cálculo do valor total para diferentes TC e TU de serragem

Peso Bruto (t)	TU (%)	Peso Seco (t)	TC (%)	Desconto de cinzas (%)	Peso final (t)	Modelo 1		Modelo 2	
						PCL (kcal/kg)	Valor Final (R\$)*	Preço (R\$/t)	Valor Final (R\$)
10	40	<b>6,0</b>	1,5	1,5000	9,9100	2.477,25	<b>508,84</b>	49,81	<b>493,66</b>
10	40	<b>6,0</b>	3,5	3,5263	9,7884	2.461,75	<b>505,66</b>	49,81	<b>487,61</b>
10	40	<b>6,0</b>	11	11,5062	9,3096	2.403,63	<b>493,72</b>	49,81	<b>463,75</b>
10	54	<b>4,6</b>	1,5	1,5000	9,9310	1.790,62	<b>367,80</b>	36,03	<b>357,82</b>
10	54	<b>4,6</b>	3,5	3,5263	9,8378	1.775,12	<b>364,62</b>	36,03	<b>354,46</b>
10	54	<b>4,6</b>	11	11,5062	9,4707	1.717,01	<b>352,68</b>	36,03	<b>341,24</b>
10	60	<b>4,0</b>	1,5	1,5000	9,9400	1.496,35	<b>307,36</b>	30,12	<b>299,43</b>
10	60	<b>4,0</b>	3,5	3,5263	9,8589	1.480,86	<b>304,18</b>	30,12	<b>296,99</b>
10	60	<b>4,0</b>	11	11,5062	9,5398	1.422,74	<b>292,24</b>	30,12	<b>287,37</b>

\*Nota: O valor final do modelo 1 leva em conta o preço de R\$ 0,000021/kcal

### 3.3.3. Casca

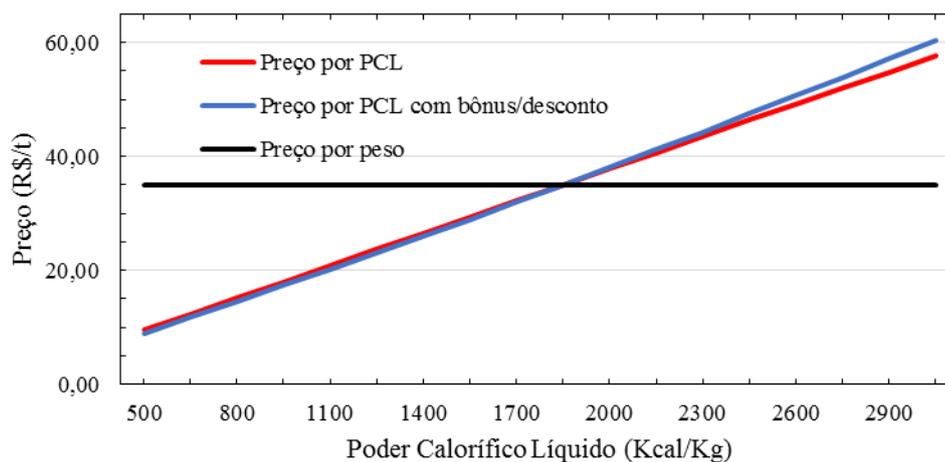
A casca é o terceiro material mais adquirido pela usina. No ano de 2015, foram adquiridas 15,6 mil toneladas do material, o que representa 4,57% do total de biomassa obtido no mesmo ano. O valor de mercado praticado para esse combustível em 2016 foi de R\$ 35,00 por tonelada.

Segundo os dados das análises de qualidade feitas pela usina, a casca caracteriza-se por possuir um TU médio de 53,89% com um desvio padrão ( $\sigma$ ) de 6,46%. Além disso, as análises de TC são de extrema importância para esse material, visto que na maioria das vezes revela altos teores de impurezas que são prejudiciais para a geração de energia. A empresa precisa investir em transporte e destinação correta desses resíduos, sendo que ainda podem se depositar no fundo da grelha da caldeira formando aglomerados, necessitando de interrupção do funcionamento da caldeira para manutenção. A média de TC para casca é de 19,21% ( $\sigma = 8,71\%$ ). Em virtude dessas características do combustível, seu PCL médio é de 1432,65 kcal/kg ( $\sigma = 363,31$  kcal/kg).

A aplicação do Modelo 1 para casca obteve a equação  $PCL = 4189,09 - 18,05TC - 44,40TU$  ( $R^2$  ajustado = 0,7979 e erro padrão = 176,41), com  $p < 0,01$  para todos os parâmetros da equação. O modelo resultou em um preço por 1000 kcal de R\$ 18,92 (Figura 24). Com base nesse valor foi calculada uma escala de preço com variações de  $\pm 150$  kcal/kg. De posse dos

valores de TC e TU, o operador pode calcular o PCL e este valor é, então multiplicado pelo preço da kcal. Esse resultado revelou um crescimento linear do preço à medida em que o PCL do material aumenta. Após isso, pode ser feita a aplicação de bônus e desconto conforme tabela de taxas desejadas pela empresa.

Figura 24 – Preços por PCL para casca pelo Modelo 1



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

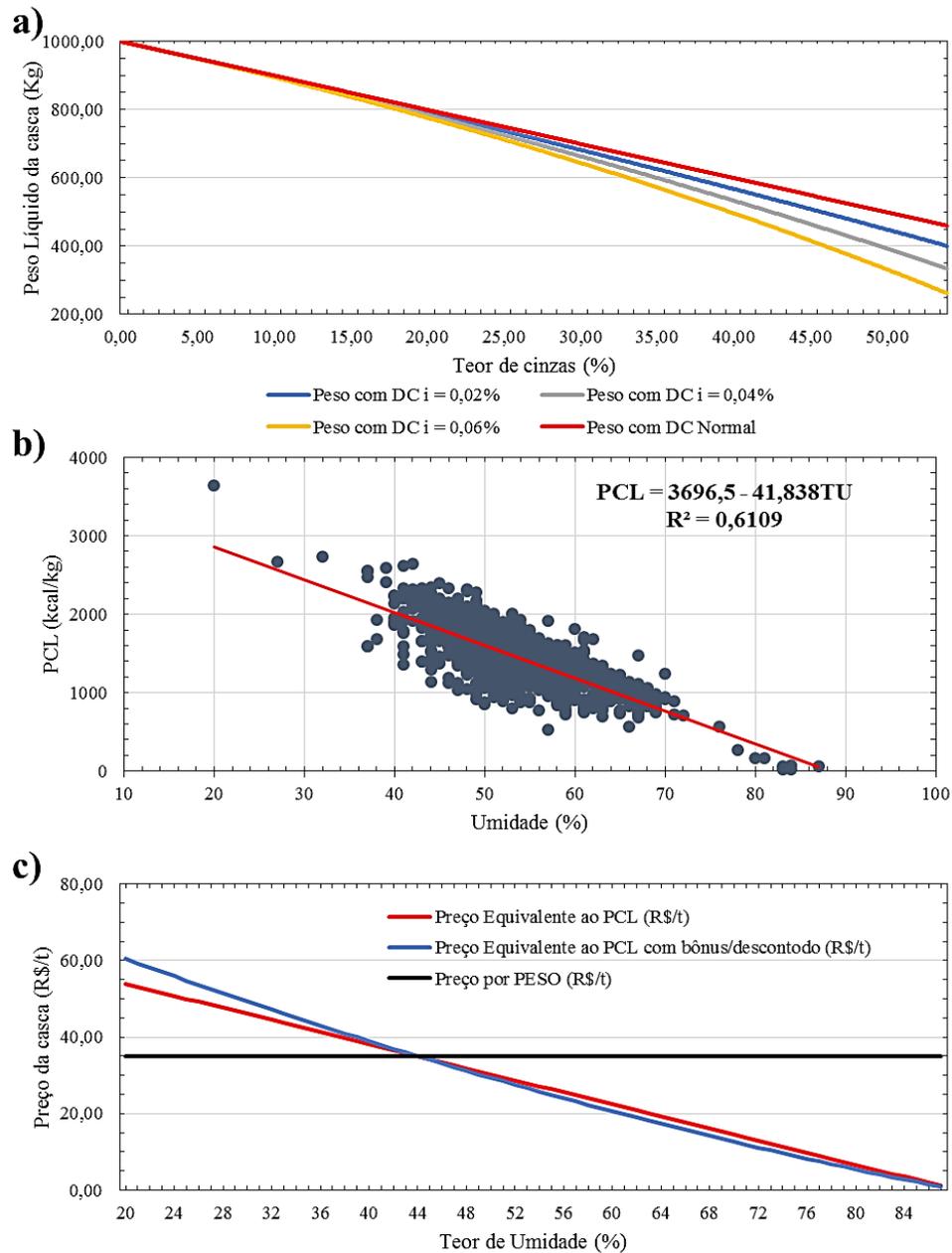
A casca possui alta variação de TC, sendo observado no banco de dados o valor mínimo de 0,26% e máximo de 53,57%. Na aplicação do Modelo 2, as curvas apresentadas na Figura 25-a demonstram um grau de flexibilidade com a correção do TC, com base nas taxas estabelecidas para essa proposta. O desconto com a menor taxa (0,02%) fica mais próximo do desconto normal e à medida que essa taxa se eleva o desconto para o fornecedor é intensificado, devendo o tomador de decisão da usina definir a taxa de desconto mais aplicável ao mercado. Com isso, visa-se não desestimular os fornecedores, nem supervalorizar o preço da biomassa para o comprador.

O cálculo foi feito com base em 1000 kg de material fornecido. Desta forma, o fornecedor que possui maiores cuidados no processo de manuseio da casca (TC entre zero e 2,00%), ofertará um material de qualidade mais elevada, enquanto materiais de pior qualidade estariam sujeitos à redução progressiva do peso.

Segundo os dados das análises de laboratório fornecidos pela usina, o TU mínimo encontrado para a casca é de 20% e o máximo 87%. A equação de cálculo do PCL estimado foi obtida pela regressão entre PCL e TU:  $PCL_{estimado} = 3696,5 - 41,838TU$  com um  $R^2 = 0,6109$  (Figura 25-b), assemelhando-se a equação apresentada por Brand (2010). Para 44% de umidade foi encontrado o  $PCL_{estimado}$  de 1855,63 kcal/kg, valor que foi adotado como referência para

o preço a ser pago (R\$ 35,00), pois aproxima-se do PCL projetado para funcionamento da caldeira (1850 kcal/kg).

Figura 25 – Pagamento por qualidade da casca segundo o modelo 2: a) Peso Líquido da casca com DC normal e DC com diferentes taxas (i); b) Relação entre PCL e TU; c) Relação entre preço por tonelada de material com variação do TU



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

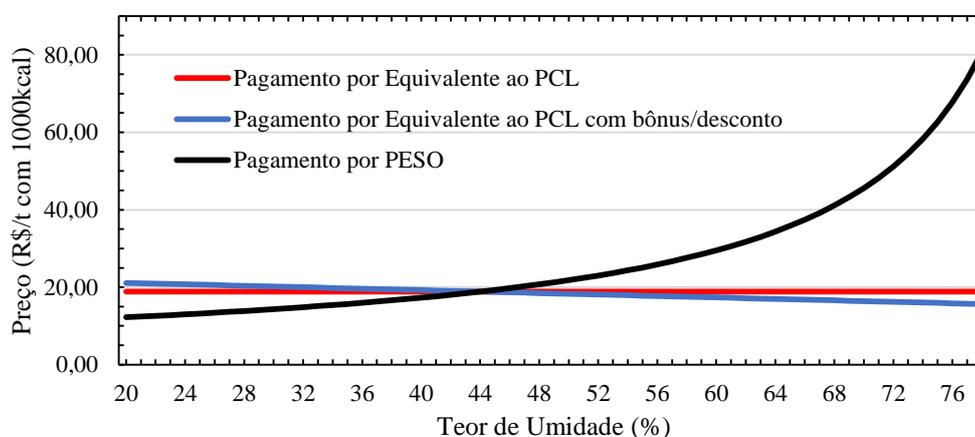
A Figura 25-c mostra como ocorre esse pagamento sem levar em conta o TU (preço constante por peso). Foi feita uma comparação mediante duas situações: preço que custaria por

tonelada de material considerando o PCL normal e, preço por tonelada equivalente ao PCL estabelecendo uma taxa percentual de incentivo de +0,5% para cada 1% de variação no TU abaixo de 44%. Para TU maiores que 44%, a taxa de desconto foi de -0,5% para cada 1% a mais de umidade.

A Figura 25-c aponta ainda, que quando o pagamento é feito por peso, as variações de TU não interferem no preço pago (preço por tonelada é constante), ou seja, biomassa com alta ou baixa qualidade é adquirida sem distinção. Quando se adota o pagamento por PCL, o preço pago por tonelada aumenta à medida que a biomassa diminui o TU, já que o peso da água sobre a casca é inferior e a biomassa tem melhor qualidade. Já a remuneração por biomassa com elevado TU (acima de 44%) cai, se tratando de uma biomassa com maior peso de água (qualidade inferior).

Comparando o pagamento por conteúdo energético com a forma de pagamento atual de R\$35,00 por tonelada, a Figura 26 mostra que na realidade o preço da aquisição por tonelada de material com 1000 kcal de energia tem um crescimento exponencial quando comparada a aquisição por peso, pois neste caso, o comprador está adquirindo mais água do que combustível. Se o pagamento for feito pelo PCL, o comprador estará remunerando o fornecedor pela quantidade de energia do combustível. Nesse caso, para a casca, cada uma tonelada de material que contenha 1000 kcal de energia adquirida custaria igualmente R\$18,86, quando não considerada a taxa de incentivo ou restrição. Esse valor fica, então, bastante abaixo do preço pago por peso.

Figura 26 – Comparação do preço da casca segundo os critérios de peso, PCL e PCL com bônus/desconto para casca para o Modelo 2



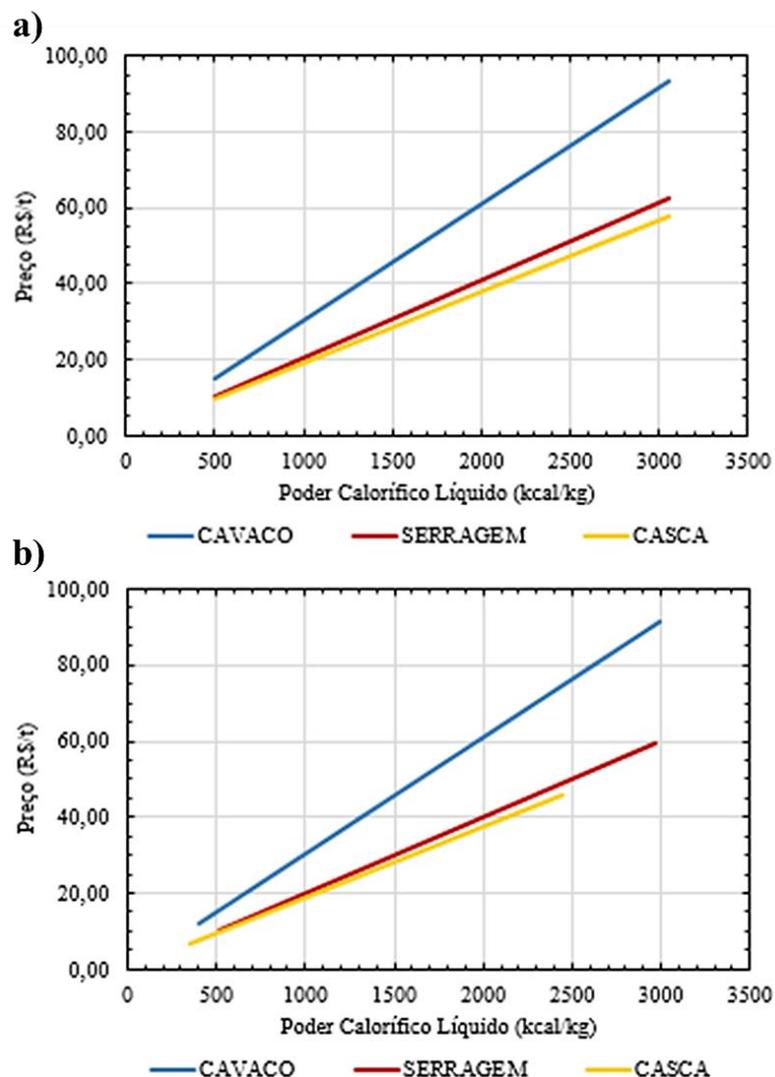
Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Com a aplicação da taxa de incentivo ou desconto, o comprador pagaria um bônus aos fornecedores que ofertarem biomassa mais seca (maior PCL) e reduziria o preço pago aos

fornecedores de biomassa com elevado TU. Essa bônus/desconto no preço visa incentivar o fornecimento de casca com menor TU e minimizar gastos com casca muito úmida e que estejam acima do projetado para a caldeira.

A Figura 27 apresenta o pagamento por tonelada (R\$/t) de material referente ao PCL (kcal/kg) para o cavaco, a serragem e a casca considerando a aplicação do: modelo 1 (Figura 27-a), com os valores de PCL estabelecidos fixados em uma tabela e, modelo 2 (Figura 27-b) com valores de PCL calculados pela equação. Percebe-se que quanto maior é o PCL, maior é o valor pago por tonelada do material, sendo que o material com maiores preços é o cavaco, seguido por serragem e casca.

Figura 27 - Comparação do preço por peso correspondente ao PCL para casca, cavaco e serragem para: a) Modelo 1 e, b) Modelo 2



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Por fim, o modelo calcula o preço final a ser pago pelo comprador mediante o peso final fornecido (toneladas após o desconto do peso do TC), multiplicando-o pelo preço final por tonelada obtido na tabela de equivalência ao PCL. A Tabela 9 mostra alguns exemplos de valores finais para casca.

Tabela 9 – Exemplos de cálculo do valor total para diferentes TC e TU de casca

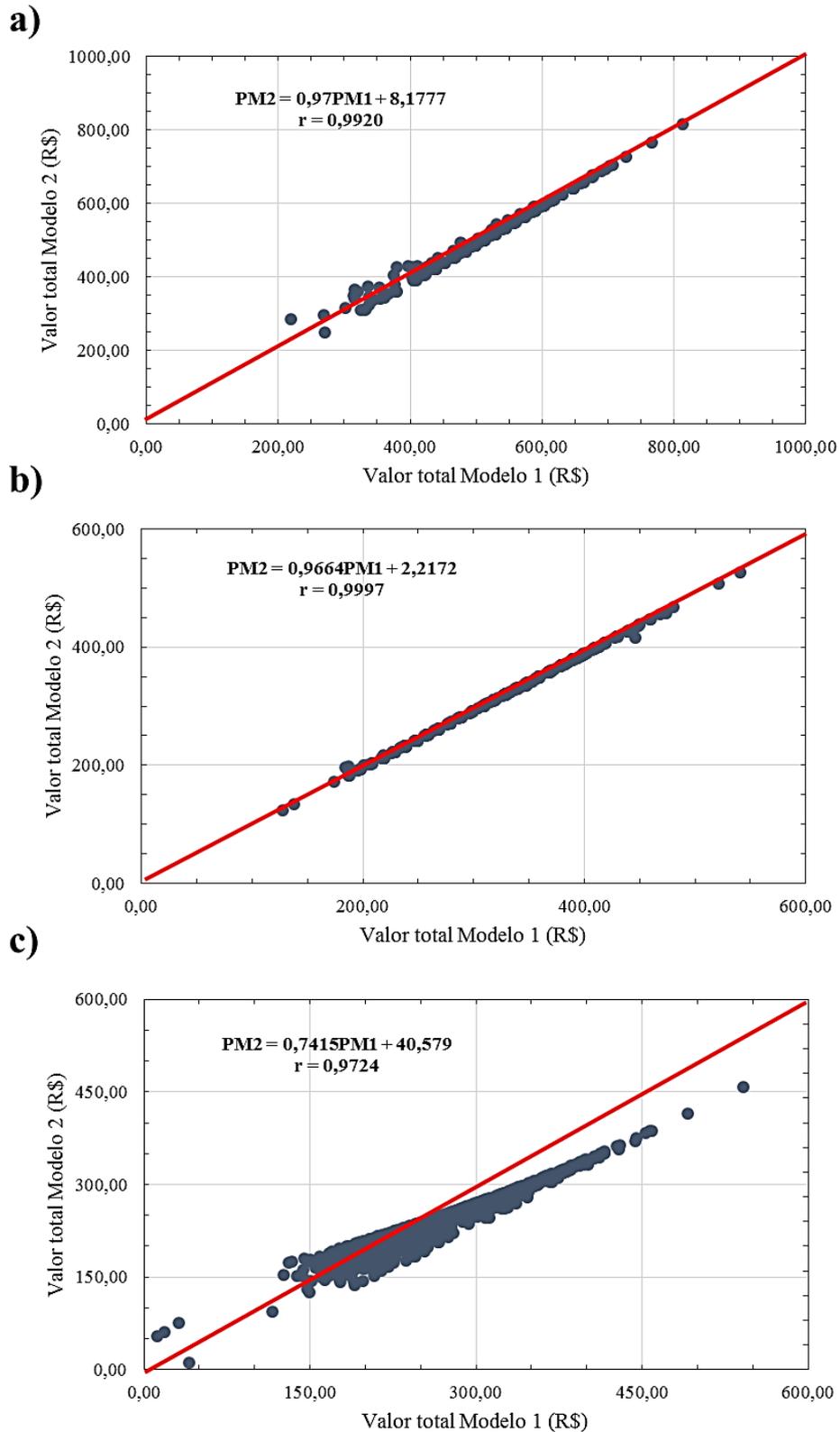
Peso Bruto (t)	TU (%)	Peso Seco (t)	TC (%)	Desconto de cinzas (%)	Peso final (t)	Modelo 1		Modelo 2	
						PCL (kcal/kg)	Valor Final (R\$)*	Preço (R\$/t)	Valor Final (R\$)
10	40	6,0	1,5	1,5000	9,9100	2.385,82	<b>451,37</b>	38,16	<b>378,13</b>
10	40	6,0	3,5	3,5263	9,7884	2.349,72	<b>444,54</b>	38,16	<b>373,49</b>
10	40	6,0	11,0	11,5062	9,3096	2.214,32	<b>418,93</b>	38,16	<b>355,22</b>
10	54	4,6	1,5	1,5000	9,9310	1.764,16	<b>333,76</b>	27,11	<b>269,22</b>
10	54	4,6	3,5	3,5263	9,8378	1.728,05	<b>326,93</b>	27,11	<b>266,69</b>
10	54	4,6	11,0	11,5062	9,4707	1.592,66	<b>301,31</b>	27,11	<b>256,74</b>
10	60	4,0	1,5	1,5000	9,9400	1.497,73	<b>283,35</b>	22,37	<b>222,40</b>
10	60	4,0	3,5	3,5263	9,8589	1.461,62	<b>276,52</b>	22,37	<b>220,58</b>
10	60	4,0	11,0	11,5062	9,5398	1.326,23	<b>250,91</b>	22,37	<b>213,44</b>

\*Nota: O valor final do modelo 1 leva em conta o preço de R\$ 0,000019/kcal

### 3.3.4. Comparação entre os Modelos 1 e 2

Foi feita uma comparação dos valores finais obtidos com os dados das análises laboratoriais fornecidos pela UCLA, calculados com base em 10 toneladas de material para os Modelos 1 e 2, considerando os preços por tonelada (R\$/t) sem utilização de bônus/desconto para ambos modelos. A relação entre os modelos pode ser visualizada na Figura 28 para cavaco (Figura 28-a), serragem (Figura 28-b) e casca (Figura 28-c). Os valores de r foram: 0,9920, 0,9997 e 0,9724 para cada um dos materiais, respectivamente. Pode se observar grande proximidade entre os valores finais dos dois modelos, indicando que ambos podem ser aplicáveis. Observa-se ainda que os modelos se ajustam melhor para PCL mais elevados.

Figura 28 – Comparação entre os valores finais para as amostras do banco de dados considerando 10 toneladas de material: a) para cavaco; b) para serragem; c) para casca



Fonte: Elaborado pela autora, 2017.

Considera-se que quanto mais próximo de zero for o valor do  $\beta_0$  e, quanto mais próximo for de 1 (um) o valor de  $\beta_1$ , há uma indicação de maior semelhança entre as regressões. A Figura 28 evidencia que, para os três materiais estudados, os valores totais dos modelos foram muito próximos entre si, sendo que, em geral, o Modelo 1 obteve resultados ligeiramente acima do Modelo 2. Para casca (Figura 28-c), observou-se uma tendência maior de preços mais elevados para o Modelo 1, indicando que o desconto de cinzas praticado no Modelo 2 propicia um pagamento mais adequado pelo conteúdo energético.

### 3.4. CONCLUSÃO

Ambos os modelos propostos estabeleceram uma forma de pagamento para compra de biomassa florestal que considera a qualidade do combustível para geração de energia. Ao fazer o pagamento pelo PCL, usinas com finalidades energéticas estariam de fato pagando para adquirir materiais pelo seu poder energético, podendo minimizar custos com aquisição de matéria-prima e melhorando a qualidade da mistura de biomassa que entra na caldeira (mix).

O Modelo 1 revelou ser de mais fácil aplicação. De posse dos dados de TU e TC, o gestor consegue estimar o PCL e identificar na escala de preço qual o valor final a ser pago ao fornecedor. Cabe à empresa optar ou não pela aplicação de taxas de bonificação ou desconto para materiais de melhor ou pior qualidade, como também pela dimensão das mesmas.

De uma forma diferenciada, o Modelo 2 fez o cálculo de desconto do TC separadamente do cálculo do TU, visto que as cinzas são um componente inerte e não têm influência sobre o PCL dos materiais. Já o TU demonstrou ser bastante influente na qualidade final da biomassa florestal.

O cavaco é o combustível de maior expressividade no orçamento da usina, pois possui qualidade superior. Com isso, o pagamento por PCL, pode beneficiar ainda mais a qualidade do material fornecido para a usina. As taxas de desconto das cinzas aplicadas para a serragem, se revelaram superiores às dos outros materiais, pois esse é o combustível com menor média de TC. Para casca, deve ser observada uma taxa baixa para cálculo do DC, visto que a alta variabilidade do TC desse material poderia resultar em descontos muito intensos, diminuindo o interesse do fornecedor em vender esse combustível.

Ao utilizar o pagamento por PCL, se estabelece uma forma viável de reduzir gastos, pois reduziria os custos em materiais que não atingem os valores de referência e se pagaria o preço final baseado no seu conteúdo energético. Ou seja, os modelos propostos podem ser

utilizados para estimular a melhoria de qualidade da biomassa, podendo gerar benefícios econômicos tanto para os fornecedores (preço maior), como para a usina (maior rendimento operacional). Isto tende a provocar mudanças no comportamento dos fornecedores no sentido de melhoria da qualidade da biomassa.

A aplicação de bônus ou desconto pode fortalecer a relação de ganho para o fornecedor que recebe um valor maior e ganho para a usina que, em posse de um material de qualidade superior, necessita de menos pausas para manutenção e melhora a eficiência de conversão.

Após a validação de ambos os modelos, poderão ainda ser vantajosos financeiramente, pois ao serem fornecidos o TC e o TU, o PCL é obtido pela equação de regressão, diminuindo a necessidade da análise laboratorial para obtenção do mesmo. Entretanto, pode-se fazer análises esporádicas apenas para fins de monitoramento e confirmação do modelo em uso.

Este estudo está sendo proposto para a biomassa florestal, com base nos dados fornecidos pela empresa, mas a metodologia utilizada pode ser empregada em outras plantas de geração de energia que utilizem outras matérias-primas, tais como: carvão, bagaço-de-cana, casca de arroz, etc.

É necessário ainda, que os interessados nesse modelo de pagamento analisem os valores e taxas a serem aplicados, sendo esta uma proposição inicial que deve estar constantemente em fase de avaliação e adaptação perante as condições do mercado. Outra avaliação importante que deve ser realizada é em relação ao impacto financeiro da adoção dos dois modelos, podendo ser feita considerando as quantidades de cada material obtido com seus respectivos TC e TU.

## REFERÊNCIAS

ALFONSO, D. et al. Methodology for optimization of distributed biomass resources evaluation, management and final energy use. **Biomass and Bioenergy**, 33, p.1070-1079, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003a. NBR 13999: Papel, cartão, pastas celulósicas e madeira - Determinação do resíduo (cinza) após a incineração a 525 °C, Brazil, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003b. NBR 14929: Madeira - Determinação do teor de umidade de cavacos - Método por secagem em estufa, Brazil, 2003.

BRAND, M.A. Energia de Biomassa Florestal, Rio de Janeiro: Interciência, 2010.

BROWN, D., ROWE, A. e WILD, P. Bioresource Technology A techno-economic analysis of using mobile distributed pyrolysis facilities to deliver a forest residue resource. **Bioresource Technology**, 150, p.367-376, 2013.

CAMBERO, C. e SOWLATI, T. Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic , social and environmental perspectives – A review of literature. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 36, p.62-73, 2014.

CAVALCANTE dos SANTOS, R. et al. Potencial energético da madeira de espécies oriundas de Plano de Manejo Florestal no Estado do Rio Grande do Norte. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 491-502, 2013.

DEMIRBAS, A. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. , 31, p.171-192, 2005.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. DIN 51900: 1-3 – Testing of solid and liquid fuels. Determining the gross calorific value of solid and liquid fuels using the bomb calorimeter, and calculation of net calorific value – Part 1-3, Germany, 2000.

GIRÓN, R. P. et al. Adsorbents/catalysts from forest biomass fly ash. Influence of alkaline activating agent. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 209, p. 45–53, 2015.

INGERSLEV, M. Element budgets of forest biomass combustion and ash fertilisation – A Danish case-study. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, i. 7, p. 2697-2704, 2011.

LEBAN, V. et al. Forest biomass for energy in multi-functional forest management: Insight into the perceptions of forest-related professionals. **Forest Policy and Economics**, v. 71, p. 87-93, 2016.

LEHTIKANGAS, P., 2001. Quality properties of pelletised sawdust , logging residues and bark. , 20, p.351-360.

MAFAKHERI, F. e NASIRI, F. Modeling of biomass-to-energy supply chain operations: Applications, challenges and research directions. *Energy Policy*, v. 67, p. 116-126, 2014.

MARZILIANO, P. A. et al. Forest Management and Biomass Production for Energy: A Case Study in Calabria Region (Italy). **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 223, p. 805-811, 2016.

MIRKOU EI, A. et al. A review and future directions in techno-economic modeling and optimization of upstream forest biomass to bio-oil supply chains. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p.15-35, 2017.

PAIANO, A. e LAGIOIA, G. Energy potential from residual biomass towards meeting the EU renewable energy and climate targets. The Italian case. **Energy Policy**, v. 91, p. 161-173, 2016.

PROTÁSIO, T. P. et al. Técnicas multivariadas aplicadas à avaliação de resíduos lignocelulósicos para a produção de bioenergia. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 4, p. 771-781, 2013.

RENTIZELAS, A.A., TOLIS, A.J. & TATSIPOULOS, I.P., 2009. Logistics issues of biomass : The storage problem and the multi-biomass supply chain. , 13, p.887-894.

ROTHER, A. et al. Current and potential use of forest biomass for energy in Tasmania. **Biomass and Bioenergy**, v. 80, p. 162-172, 2015.

SAIDUR, R. et al.. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.15 (5), p. 2262-2289, 2011.

SHABANI, N., AKHTARI, S. e SOWLATI, T. Value chain optimization of forest biomass for bioenergy production : A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 23, p. 299-311, 2013.

SHABANI, N. e SOWLATI, T. A mixed integer non-linear programming model for tactical value chain optimization of a wood biomass power plant. **Applied Energy**, v. 104, p. 353-361, 2013.

SULTANA, A. e KUMAR, A.. Bioresource Technology Optimal configuration and combination of multiple lignocellulosic biomass feedstocks delivery to a biorefinery. **Bioresource Technology**, v. 102 (21), p. 9947-9956, 2011.

STJEPAN, P. et al. Private forest owners' willingness to supply woody biomass in selected South-Eastern European countries. **Biomass and Bioenergy**, v. 81, p. 144-153, 2015.

TAHVANAINEN, T. e ANTTILA, P., 2011. Supply chain cost analysis of long-distance transportation of energy wood in Finland. **Biomass and Bioenergy**, v. 35(8), p. 3360-3375, 2011.



#### 4. CONCLUSÃO GERAL

O presente trabalho teve como objetivo geral analisar a qualidade da biomassa florestal utilizada para geração de energia pela UCLA da ENGIE Brasil Energia, considerando um banco de dados de parâmetros de qualidade da biomassa (TU, TC e PC), visando diagnosticar a evolução no período de 2005 a 2015 e propor uma forma de pagamento por aquisição baseada no seu conteúdo energético.

Quanto ao objetivo de analisar a evolução da qualidade dos diferentes tipos de resíduos florestais adquiridos, a qualidade da biomassa florestal apresentou ser dependente do tipo de material e das condições de geração, coleta e transporte. Os dados evidenciaram baixa variação nos TU enquanto os TC resultaram em elevada variabilidade. Em geral, o PCL do mix que entra na caldeira, tem apresentado melhorias ao longo do tempo de operação da usina, bem como, os materiais de maior volume adquirido (casca, cavaco e serragem) obtiveram avanço na qualidade.

A proposição dos modelos de pagamento pela aquisição de biomassa baseada no conteúdo energético do material, indicada como segundo objetivo específico deste estudo, revelou-se vantajosa para o progresso da cadeia de geração de energia por biomassa. Em posse de dados de TU e TC, é possível estimar o PCL e aplicar escalas de preço condizentes com o mercado (modelo 1), bem como, fazer o abatimento do peso das cinzas e, após isso estimar o preço pelo PCL (modelo 2), sendo esses modelos flexíveis à implantação em outras usinas baseadas em diferentes fontes de biomassa. A utilização dessa metodologia pode vir a promover um estímulo desse mercado de compra e venda, além de poder propiciar melhoria na qualidade da biomassa fornecida. Isso traria benefícios para a unidade de cogeração (mais energia gerada) e para os fornecedores (maior remuneração).

Estudar a série histórica de dados laboratoriais da UCLA aliando-os à aplicação de testes estatísticos e proposições de modelos baseados em regressão linear, propiciou uma análise do mercado de biomassa para energia, indicando aspectos a serem fortalecidos e potencializados visando impulsionar a utilização desses recursos para fins energéticos. Sendo assim, considerou-se a metodologia empregada neste estudo apropriada para o cumprimento dos objetivos estabelecidos.

Encontrou-se como limitações para este trabalho, a existência de dados de propriedades incompletos ou faltantes, sem data de coleta, sem identificação do fornecedor ou tipo de

material. Para o capítulo 2 houve falta de dados referentes à quantidade total de material (peso) fornecido, correspondente as análises de cada amostra, fato que inviabilizou o cálculo preciso do impacto dos modelos sobre os custos da usina na compra de combustível.

Por fim, considera-se que a análise da qualidade aliada à metodologia proposta de pagamento pelo conteúdo energético da biomassa, podem melhorar e impulsionar o setor. Isso demonstra grande importância na continuação em se fazer amostragens de material para análise dos parâmetros de qualidade, a fim de dar sequência e validação para o estudo proposto. Recomenda-se a realização de outras pesquisas, necessárias para o melhor entendimento da dinâmica da cadeia produtiva e dos impactos ambientais do ciclo de produção de energia, tais como: indicadores ambientais, economia circular e avaliação do ciclo de vida.

## REFERÊNCIAS

- BRAND, M.A. et al. **Caracterização da produção e uso dos resíduos madeiráveis gerados na indústria de base florestal da região serrana catarinense**. Relatório de Pesquisa, Lages: UNIPLAC, dez. 2001.
- BRAND, M. A.; COSTA, V. J. Geração de energia: o futuro da biomassa florestal. In: BINOTTO, E. (Org.). **Tecnologia e processos agroindustriais**. 01ed. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, v. 01, p. 141-158, 2007.
- BRAND, M.A.; NEVES, M.D. **Levantamento da disponibilidade dos resíduos industriais e florestais de madeira e avaliação da variação de sua qualidade energética em função das condições climáticas anuais, na região de Lages – Santa Catarina**. Relatório de Pesquisa, Lages: UNIPLAC e Tractebel Energia, jul. 2005.
- CABRAL, M. M. S., ABUD, A. K. de S., SILVA, C. E. de F., ALMEIDA, R. M. R. G. Bioethanol production from coconut husk fiber. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 46, n. 10, p. 1872-1877, 2016.
- EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço energético nacional 2016 ano base 2015**. Rio de Janeiro: EPE/MME, 2016.
- FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **How2Guide for Bioenergy Roadmap Development and Implementation**, 2017.
- FARAGE, P. et al. Avaliação do potencial de aproveitamento energético dos resíduos de madeira e derivados gerados em fábricas do polo moveleiro de Ubá – MG. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 1, p. 203-212, 2013.
- HOFF, D. N.; SIMIONI, F. J. **O setor de base florestal na Serra Catarinense**. Lages: Editora Uniplac, 254p., 2004.
- HOFF, D.N. et al. O setor de base florestal da Serra Catarinense e a emergência de um ecossistema industrial. **RGSA: Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 2, p. 54-72, 2008.
- IEA - INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. **Tracking Clean Energy Progress 2017**, 2017.
- IEA - INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. **Large Industrial Users of Energy Biomass**, 2013.

NASCIMENTO, M. D. **Otimização do uso de lenha e cavaco de madeira para produção de energia em agroindústria Seropédica.** 103 f. Dissertação (Mestrado) –Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, SP, 2007.

SANTIAGO, F. L. S. **Aproveitamento de resíduos florestais de Eucalyptus spp na indústria de fabricação de celulose para geração de energia térmica e elétrica.** 109 f. Tese (Doutorado)- Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, SP, 2013.

SIMIONI, F. J.; ANDRADE, S. **Identificação e prospecção de demanda de madeira e biomassa na região do Planalto Sul de Santa Catarina.** Relatório de Pesquisa – Convênio UNIPLAC e Prefeitura Municipal de Otacílio Costa-SC, Lages, SC, Set. 2006.

SIMIONI, F. J.; HOEFLICH, V. A. . **Análise diagnóstica e prospectiva da cadeia produtiva de energia de biomassa de origem florestal.** Documentos. Embrapa Florestas, v. CD, p. 1-102, 2007.

SIMIONI, F. J.; HOEFLICH, V. A. Cadeia produtiva de energia de biomassa na região do Planalto Sul de Santa Catarina: uma abordagem prospectiva. **Revista Árvore (Impresso)**, v. 34, p. 1091-1099, 2010.



Este estudo teve como objetivo analisar a qualidade da biomassa florestal utilizada para geração de energia pela Unidade de Cogeração Lages (UCLA) da ENGIE Brasil Energia, considerando um banco de dados de parâmetros de qualidade: teor de umidade, teor de cinzas e poder calorífico. Esta dissertação foi estruturada com dois capítulos correspondentes aos objetivos: o capítulo 2 contemplando o artigo intitulado como “Qualidade da biomassa florestal para geração de energia em uma unidade de cogeração” e, o capítulo 3 corresponde ao artigo “Influência da qualidade sobre o preço da biomassa florestal utilizada para a geração de energia em Lages – SC”.

Orientador: Flávio José Simioni

Coorientador: Martha Andréia Brand

**Lages, 2017**