

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

LEONARDO FERREIRA PEDROSO DE ALMEIDA

**PELLETIZAÇÃO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: ESTUDO
DAS PROPRIEDADES DO PRODUTO E RENDIMENTO DO
PROCESSO**

DISSERTAÇÃO

PONTA GROSSA

2015

LEONARDO FERREIRA PEDROSO DE ALMEIDA

**PELLETIZAÇÃO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: ESTUDO
DAS PROPRIEDADES DO PRODUTO E RENDIMENTO DO
PROCESSO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção de título de Mestre em Engenharia de Produção, do Programa de Mestrado em Engenharia de Produção: Área de concentração: Gestão da Produção e Manutenção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Vanderley Herrero Sola
Co-orientador: Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne

PONTA GROSSA

2015

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa
n.19/15

A447 Almeida, Leonardo Ferreira Pedroso de

Pelletização do bagaço de cana-de-açúcar: estudo das propriedades do produto e rendimento do processo. / Leonardo Ferreira Pedroso de Almeida. -- Ponta Grossa, 2015.

83 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Vanderley Herrero Sola

Co-orientador: Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015.

1. Biomassa. 2. Bagaço de cana - Indústria. 3. Biocombustíveis. I. Sola, Antonio Vanderley Herrero. II. Behainne, Jhon Jairo Ramirez. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. IV. Título.

CDD 670.42



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**



FOLHA DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação Nº 266/2015

**PELLETIZAÇÃO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: ESTUDO DAS PROPRIEDADES
DO PRODUTO E RENDIMENTO DO PROCESSO**

por

Leonardo Ferreira Pedroso de Almeida

Esta dissertação foi apresentada às **14 horas de 26 de fevereiro de 2015** como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, com área de concentração em Gestão Industrial, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Rui Franciso Martins Marçal (PUCPR)

Prof. Dr. Flávio Trojan (UTFPR)

Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behaine (UTFPR)

Prof. Dr. Antonio Vanderley Herrero Sola
(UTFPR) - *Orientador*

Prof. Dr. Aldo Braghini Junior (UTFPR)

Visto do Coordenador

Prof. Dr. Aldo Braghini Junior (UTFPR)
Coordenador do PPGEP

A FOLHA DE APROVAÇÃO ASSINADA ENCONTRA-SE NO DEPARTAMENTO DE
REGISTROS ACADÊMICOS DA UTFPR-CÂMPUS PONTA GROSSA

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade e por me dar força, paciência e sabedoria para chegar a mais esta conquista.

À minha esposa Sirlene e filhos Lucas e Vitória pela confiança, amor, força, incentivo, paciência e sabedoria em mim depositado durante todo este período.

Aos meus orientadores Antonio Vanderley Herrero Sola e Jhon Jairo Ramirez Behainne pela condução de todo o estudo, pela confiança em mim depositada e por acreditarem no meu projeto científico.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Ponta Grossa.

À empresa estudada e seus ilustres diretores.

Aos meus pais Ernani e Marlene e aos pais da minha esposa Osvaldo e Alzira que me incentivaram a buscar novos degraus no conhecimento acadêmico/científico.

Aos meus irmãos Ricardo, Eduardo, suas esposas e todos os meus familiares.

Aos meus colegas de sala e de viagens que muito contribuíram para esta conquista.

Ao coordenador e à secretaria do curso e servidores da instituição de ensino.

Aos meus ilustres professores.

A banca examinadora.

A todos que de alguma forma contribuíram para o término deste trabalho.

A persistência é o menor caminho do êxito.

(Charles Chaplin)

RESUMO

ALMEIDA, Leonardo Ferreira Pedroso. **Pelletização do bagaço de cana-de-açúcar: Estudo das propriedades do produto e rendimento do processo.** 2015. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015.

As propriedades de *pellets* de biomassa utilizados como combustíveis são essenciais para o desempenho em processos termoquímicos, tais como combustão, gaseificação e pirólise. Estas propriedades podem afetar aspectos relacionados ao transporte, estocagem, manuseio, conversão de energia, emissões de gases no meio ambiente, bem como variáveis a serem controladas durante o processo de pelletização, influenciando diretamente o consumo de energia e os custos para a sua produção. Este trabalho apresenta um estudo realizado em uma indústria brasileira de produção de *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar para determinação das principais propriedades do produto final e das variáveis do processo de produção. O objetivo deste trabalho é caracterizar, dentro do processo de pelletização, as principais propriedades físicas, químicas e mecânicas da matéria prima e do produto final, bem como conhecer os fluxos de massa, o consumo de energia e os custos envolvidos em cada etapa do processo. Como primeira parte dos resultados, concluiu-se que as propriedades de *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar analisadas, tais como diâmetro, comprimento, umidade, densidade, durabilidade, quantidade de finos, poder calorífico, elementos químicos e teor de cinzas, não estão em total conformidade com outros trabalhos científicos realizados e com normas internacionais de comercialização e de qualidade de *pellets* de biomassa. Em segundo lugar, pôde-se conhecer a taxa de consumo de matéria prima e de produção de *pellets*, o consumo de energia e os custos envolvidos em cada etapa do processo de produção como secagem, moagem e pelletização. Por fim, foi encontrada uma função matemática em que o consumo de energia e os custos de produção crescem de maneira exponencial com a variação de umidade da matéria prima.

Palavras-chave: propriedades de *pellets*, biomassa, bioenergia, bagaço de cana-de-açúcar, processo de pelletização, otimização do uso de energia.

ABSTRACT

ALMEIDA, Leonardo Ferreira Pedroso. **Sugarcane bagasse pelletization: Studying the properties of the product and process yield.** 2015. 83f. Dissertation (Master in Production Engineering) - Graduate Program in Production Engineering, Federal Technology University of Paraná. Ponta Grossa, 2015.

Properties of *pellets* used as biomass fuels are essential to the performance of thermochemical processes, such as combustion, gasification and pyrolysis. These properties can affect aspects related to transportation, storage, handling, power conversion, emissions into the environment as well as variables to be controlled during the pelletizing process, directly influencing the energy consumption and production cost. This paper presents a study in a Brazilian industry of sugarcane bagasse *pellets* in order to determine the main properties of *pellets* and process variables. The objective of this work is to characterize within the pelletizing process the main physical, chemical and mechanical properties on the raw material and final product, as well as knowing the mass flows, energy consumption and cost involved in each step of the process and its variations. As the first part of the results, it was concluded that the properties of the sugarcane bagasse *pellets* analyzed as diameter, length, moisture, density, durability, amount of fine, calorific value, chemical elements and ash content are not full compliance with other scientific work and international marketing standards and quality *pellets* biomass. Secondly, one can know the rate of material consumption and production of *pellets*, energy consumption and costs for each step of the production process as drying, grinding and pelletizing. Finally, a mathematical function in which the power consumption and production costs grow exponentially with the variation of moisture of the raw material entry was found.

Keywords: *pellets* properties, biomass, bioenergy, sugarcane bagasse, pelletizing process, optimization of energy usage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - <i>Pellets</i> de biomassa	24
Figura 2 - Secador rotativo	28
Figura 3 - Moinho de martelo.....	30
Figura 4 - Pelletizadora de biomassa.....	31
Figura 5 - Matriz de pelletização.....	33
Figura 6 - Balanço de massa do processo de pelletização.....	38
Figura 7 - Cana-de-açúcar (a) e bagaço de cana-de-açúcar (b)	38
Figura 8 - <i>Pellets</i> de bagaço de cana-de-açúcar	39
Figura 9 - Teste de peneiramento	46
Figura 10 - Teste da densidade a granel dos <i>pellets</i>	47
Figura 11 - Medição do comprimento e diâmetro dos <i>pellets</i>	47
Figura 12 - Dispositivo utilizado para teste de durabilidade dos <i>pellets</i>	48
Figura 13 - Processo de pelletização	54
Figura 14 - Sistema de secagem	55
Figura 15 - Secador rotativo (a) e fornalha (b).....	56
Figura 16 - Ciclones (a) e exaustor (b).....	56
Figura 17 - Moinho de martelo (a) e pelletizadora (b)	58
Figura 18 - Perfil da matriz de pelletização.....	58
Figura 19 - Matéria prima e <i>pellets</i>	59
Figura 20 - Balanço de massa.....	66
Figura 21 - Balanço de energia.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Poder calorífico de biomassas	23
Tabela 2 - Propriedades do <i>pellets</i> de madeira	35
Tabela 3 - Consumo de energia elétrica por tonelada de produção de <i>pellets</i>	35
Tabela 4 - Poder calorífico do bagaço de cana-de-açúcar	35
Tabela 5 - Normas de qualidade e de comercialização de biocombustíveis	41
Tabela 6 - Diâmetro médio do bagaço de cana-de-açúcar moído	45
Tabela 7 - Propriedades físicas e mecânicas do bagaço de cana-de-açúcar e dos <i>pellets</i>	60
Tabela 8 - Propriedades físicas e mecânicas do <i>pellets</i>	61
Tabela 9 - Propriedades químicas dos <i>pellets</i>	63
Tabela 10 - Itens em conformidade dos <i>pellets</i> estudados com as normas de qualidade	64
Tabela 11 - Fluxo de massa e energia presente na matéria prima e <i>pellets</i> em uma hora de produção	65
Tabela 12 - Medição da energia consumida pelos motores elétricos do processo	66
Tabela 13 - Energia consumida, fluxo de massa e custos do processo em uma hora de produção	67

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Maiores produtores e consumidores mundiais de <i>pellets</i> de madeira.....	26
Gráfico 2 - Crescimento da produção mundial de <i>pellets</i>	27
Gráfico 3 – Umidade do bagaço de cana-de-açúcar em função do tempo de secagem.....	36
Gráfico 4 - Variação das propriedades físicas e mecânicas da matéria prima e <i>pellets</i>	61
Gráfico 5 - Energia e custos por tonelada produzida.....	68
Gráfico 6 - Valor Líquido por tonelada de <i>pellets</i> produzido	69
Gráfico 7 - Consumo de <i>pellets</i> na fornalha em função da umidade da matéria prima.....	70
Gráfico 8 - Corrente elétrica consumida no moinho e pelletizadora em função da umidade e volume de produção.....	72
Gráfico 9 - Energia consumida e valor líquido em função da umidade da matéria prima	74

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

<i>Cb</i>	custo da matéria prima bagaço de cana-de-açúcar, R\$/ton
<i>Cel</i>	custo da energia elétrica, R\$/MJ
<i>Cp</i>	preço de venda <i>pellets</i> , R\$/ton
<i>cosØ</i>	fator de potência
<i>Epp</i>	energia dos <i>pellets</i> produzido, MJ
<i>Etb</i>	energia térmica do bagaço de cana-de-açúcar, MJ
<i>Etpf</i>	energia térmica dos <i>pellets</i> queimado fornalha, MJ
<i>Etp</i>	energia térmica dos <i>pellets</i> produzido, MJ
<i>Eel</i>	energia elétrica dos motores elétricos, MJ
<i>Eelm1</i>	energia elétrica de cada motor, MJ
<i>Etotal</i>	energia total, MJ
<i>Elmo</i>	energia elétrica consumida pelo moinho, MJ
<i>Eelp</i>	energia elétrica consumida pela pelletizadora, MJ
<i>Eelk</i>	energia elétrica constante gasta pelos motores elétricos, MJ
<i>Im</i>	corrente elétrica de cada motor, A
<i>Mb</i>	massa de bagaço, kg
<i>Mpf</i>	massa de <i>pellets</i> fornalha, kg
<i>Mpp</i>	massa de <i>pellets</i> produzido, kg
<i>PCSb</i>	poder calorífico do bagaço, MJ/kg
<i>PCSp</i>	poder calorífico dos <i>pellets</i> , MJ/kg
<i>Vl</i>	valor líquido, R\$
<i>Velk</i>	valor da energia gasta pelos motores elétricos constantes, R\$
<i>Pm</i>	potência elétrica de cada motor, MJ
<i>ub</i>	umidade do bagaço de cana-de-açúcar, %
<i>us</i>	umidade do bagaço de cana-de-açúcar após o processo de secagem, %
<i>Vb</i>	valor do bagaço de cana-de-açúcar, R\$
<i>Vpp</i>	valor dos <i>pellets</i> produzido, R\$
<i>Vet</i>	valor da energia térmica, R\$
<i>Vel</i>	valor da energia elétrica, R\$
Δt	intervalo de tempo, horas

Sumário

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.2 RESULTADOS ESPERADOS	18
1.3 OBJETIVO GERAL.....	18
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.5 DELIMITAÇÕES DO OBJETO DE ESTUDO.....	18
2 REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 USO DE BIOMASSA PARA ENERGIA	20
2.2 O PROCESSO DE PELLETTIZAÇÃO DE BIOMASSA	23
2.2.1 Características gerais e características dos processos de secagem, moagem e pelletização.....	27
2.2.2 Energias envolvidas no processo de pelletização.....	33
2.2.3 Custos no processo de pelletização	36
2.2.4 Fluxo de massa do processo de pelletização	37
2.2.5 Pelletização do bagaço de cana-de-açúcar	38
2.3 NORMAS INTERNACIONAIS DE QUALIDADE DE <i>PELLET</i> DE BIOMASSA	39
3 MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA MATERIA PRIMA E DOS <i>PELLETS</i>	44
3.1.1 Propriedades da matéria prima.....	44
3.1.1.1 Densidade a granel	44
3.1.1.2 Umidade	44
3.1.1.3 Diâmetro médio do bagaço de cana-de-açúcar moído	45
3.1.2 Propriedades dos <i>pellets</i>	46
3.1.2.1 Umidade	46
3.1.2.2 Densidade a granel e da partícula.....	46
3.1.2.3 Diâmetro e comprimento dos <i>pellets</i>	47
3.1.2.4 Durabilidade	48
3.1.2.5 Poder calorífico	48
3.1.2.6 Teor de cinzas, material volátil e elementos químicos (N, S, Cl).....	49
3.2 BALANÇO DE MASSA.....	49
3.3 ENERGIAS ENVOLVIDAS NO PROCESSO.....	49
3.4 CUSTOS ENVOLVIDOS	51
3.5 CONSUMO DE ENERGIA E CUSTOS EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE UMIDADE	52
4 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO	54
4.1 A EMPRESA ESTUDADA	54
4.2 O PROCESSO DE <i>PELLET</i> IZAÇÃO.....	54
4.2.1 Secagem	54

4.2.1.1 Forno.....	55
4.2.1.2 Secador rotativo.....	55
4.2.1.3 Ciclone separador e exaustor.....	56
4.2.2 Moagem.....	57
4.2.3 pelletização.....	57
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
5.1 MEDIÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E QUÍMICAS	60
5.2 ANÁLISE COMPARATIVA COM AS NORMAS INTERNACIONAIS DE QUALIDADE.....	63
5.3 ANÁLISE DO FLUXO DE MASSA, ENERGIAS ENVOLVIDAS E CUSTOS DO PROCESSO.....	64
5.4 CONSUMO DE ENERGIA E CUSTOS EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE UMIDADE	69
6 CONCLUSÕES.....	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

1 INTRODUÇÃO

A busca mundial por fontes de energias renováveis tem motivado esforços no mundo (AGUGLIARO et al., 2013). Fernández, Bote e Aneón (2012) mostraram que de 2003 a 2011 houve um crescimento de 83% no número de publicações científicas referentes a energias renováveis, sustentabilidade e meio ambiente, atingindo o número total de 3637 trabalhos. Outro dado mostrado por Agugliaro et al. (2013) sobre publicações científicas na área de energia renovável no mundo é que 56% destas tratam de assuntos referentes a biomassa, seguido por energia solar (26%), eólica (11%), geotérmica (5%) e hidroeletricidade (2%). Energias renováveis são definidas como energias provenientes de recursos naturais que produzem menos efeitos negativos ao meio ambiente (CHARTERS, 2001) ou como energias mais limpas que minimizam a utilização dos recursos naturais (PANWAR, KAUSHIK e KOTHARI, 2011). Dados de 2006 demonstram que 79% da energia consumida no mundo era proveniente do uso de combustíveis fósseis e 18% de energia renovável (REN21, 2011). Comprovadamente sabe-se que a energia proveniente de combustíveis fósseis causa elevada poluição contribuindo no efeito estufa (KALOGIROU, 2004). Neste contexto, as energias renováveis surgem como alternativa, sendo provenientes de recursos naturais como sol, vento, chuva, marés e biomassa, que em sua essência são retiradas do meio ambiente e consumidas sem gerar passivos ambientais.

No cenário nacional brasileiro, em 2012, 42,4% da energia consumida pelo país foi proveniente de fontes renováveis, destacando o país como possuidor de uma das maiores matrizes energéticas renováveis do mundo, se comparado às demais nações. Nestes outros países, apenas 13,2% da energia consumida em 2010 era proveniente de energias renováveis (EPE, 2013).

Dentre as fontes de energia renovável, a biomassa representa aquela originada a partir de matéria animal ou vegetal para a geração de energia térmica e/ou elétrica. Atualmente, muitos países utilizam-se deste tipo de combustível e das tecnologias consolidadas para a sua queima, gerando calor para aquecimento industrial e/ou energia elétrica, dentre outras aplicações (AGUGLIARO et al., 2013). Nesta, tem destaque a biomassa da madeira e seus resíduos (IEA, 2012).

No Brasil, dentre as matérias primas de biomassa mais utilizadas têm-se o bagaço de cana-de-açúcar, que é o resíduo final da retirada do caldo da cana-de-açúcar nas usinas que produzem álcool e açúcar, posicionando o país entre os maiores produtores do mundo (MAPA, 2011). Segundo o Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento, em 2012 a

produção nacional de cana-de-açúcar foi de 593,6 milhões de toneladas, sendo 4,9% a mais que no ano de 2011 (MAPA, 2011). Segundo Silva, Gomes e Alsina (2007), 27% dessa massa representa a quantidade de resíduo de bagaço de cana-de-açúcar após o processo de produção das usinas de açúcar e álcool. Os dados do EPE (2013) indicam que a produção de bagaço de cana-de-açúcar foi de 154,1 milhões de toneladas.

O bagaço de cana-de-açúcar vem sendo aproveitado no Brasil em grande escala. Em 2012, 11,2% da energia consumida pelo país veio da utilização do bagaço de cana-de-açúcar (EPE, 2013). O bagaço de cana-de-açúcar também pode ser aproveitado na forma de *pellets*. *Pellets* é o nome dado ao produto resultante do processo de compressão aplicada a uma matéria prima, sendo que em muitos casos essa matéria prima é preparada previamente através do processo de secagem e moagem (ARSHADI et al., 2008; LEHMANN et al., 2012). Dentre as principais características dos *pellets* em relação a sua matéria prima destaca-se o maior poder calorífico, maior densidade, menor umidade e variação higroscópica, fácil manuseio e armazenamento, o que torna o produto final muito vantajoso se comparado à matéria prima inicial (RABIER et al., 2006; THEERARATTANANOON et al., 2011). Com todas estas características, o processo de pelletização há muitos anos vem sendo aplicado a diversos tipos de matérias primas e diversas áreas de aplicação, como ração animal, combustível, uniformização de resíduos, etc.

Em 2010, a produção mundial de *pellets* de biomassa foi superior a 12 milhões de toneladas (RASGA, 2013) e as maiores demandas do produto focaram a utilização doméstica e o consumo industrial. A produção atual de *pellets* no Brasil é pequena se comparada com as registradas em outros países, cenário que pode ser alterado nas próximas décadas, decorrente das novas indústrias e projetos de instalações que vem sendo utilizadas no Brasil.

Engajado neste contexto, este trabalho estuda as principais características do processo de fabricação e do produto final resultante da pelletização do bagaço de cana-de-açúcar relacionadas com sua eficiência energética. Na primeira etapa do estudo foi feita uma análise física, química e mecânica dos *pellets* produzido e os resultados foram comparados com normas internacionais de comercialização de *pellets* de biomassa e com outros trabalhos científicos. Em um segundo estágio foi realizado uma análise do processo de pelletização (secagem, moagem e pelletização), bem como o monitoramento das principais variáveis determinantes do processo produtivo (umidade, tamanho das partículas e densidade) determinando-se o balanço de massa, consumos energéticos e custos de produção. Por fim, foi determinada a relação entre o consumo de energia e os custos de produção em função da variação da umidade da matéria prima.

O presente trabalho está organizado em 6 capítulos, incluindo a introdução. No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica com os principais assuntos de interesse, tais como: biomassa para fonte de energia, características do processo de pelletização, propriedades físicas, mecânicas e químicas de *pellets*, parâmetros de controle que implicam no consumo de energia, fluxos de massa e custos de produção, incluindo as normas internacionais para comercialização de *pellets* de biomassa. No capítulo 3 é apresentada a metodologia e os procedimentos utilizados para os testes e as análises. No capítulo 4 é apresentado o desenvolvimento do trabalho e, no capítulo 5, os resultados e as discussões. Por fim, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões do estudo.

1.1 JUSTIFICATIVA

Em 2012 a produção brasileira de bagaço de cana-de-açúcar alcançou 154,1 milhões de toneladas (EPE, 2013). Sabe-se que, atualmente, grande parte deste material é utilizada nas próprias usinas de produção de álcool e açúcar para a geração de vapor, e que boa parte é utilizada para a geração de energia elétrica (DANTAS, 2010). No entanto, em função da grande quantidade desta biomassa disponível no Brasil, o processo de pelletização surge como alternativa para a destinação deste subproduto, tendo a capacidade de transformar a biomassa residual em um material com propriedades mais atraentes, com vantagens nos quesitos de poder calorífico, armazenamento, transporte, estocagem, destinação de resíduos industriais (WOLF, VIDLUND e ANDERSON, 2006; CARONE, PANTALEO e PELLERANO, 2011; STAHL e BERGHEL, 2011). De acordo com Bloomberg (2010), a produção mundial de *pellets* em 2009 foi de 12 milhões de toneladas com tendência de crescimento para os próximos anos. (BLOOMBERG, 2010).

O processo de produção de *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar já é utilizado no Brasil e no Mundo (ERLICH et al., 2005), porém muitos estudos em torno do processo e do produto ainda merecem ser realizados. Dentre estes, destaca-se a necessidade de estudos relacionados à análise das propriedades físicas, mecânicas e químicas visando controles de qualidade e o seguimento de normas internacionais de qualidade e comercialização dos *pellets*. Estudo das variáveis que influenciam o rendimento energético e de custos dos processos de produção (THEK e OBERNBERGER, 2004; UASUF e BECKER, 2011) e, por fim, a criação de funções que relacionem o consumo de energia e os custos do processo com variações de umidade da matéria prima, valores de umidade do material seco e volumes de produção.

1.2 RESULTADOS ESPERADOS

O primeiro resultado esperado para este trabalho é uma caracterização das propriedades físicas, mecânicas e químicas dos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar para ser comparado com as normas internacionais de comercialização de *pellets* de biomassa e referências bibliográficas. Em segundo lugar, obter conhecimento das principais propriedades e variáveis do processo de pelletização que interferem na qualidade do produto final, nas energias consumidas pelos processos e os custos envolvidos de produção através de registros do processo. Por fim, em terceiro lugar, busca-se identificar a relação entre o consumo dos tipos de energias gastas e os custos no processo de produção em função da variação da umidade de entrada da matéria prima.

1.3 OBJETIVO GERAL

Realizar um estudo no processo de pelletização de bagaço de cana-de-açúcar a fim de caracterizar as principais propriedades físicas, mecânicas e químicas do produto final, bem como o rendimento energético do processo de produção.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar as principais propriedades físicas, mecânicas e químicas dos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar e compará-los com normas internacionais de comercialização de *pellets* de biomassa e referenciais da literatura.
- Caracterizar as variáveis: umidade, tamanho das partículas e densidade para análise dos seus efeitos no processo de produção.
- Realizar análise energética e de custos no processo de pelletização de bagaço de cana-de-açúcar através de registros do processo.
- Conhecer a relação do consumo de energia e custos para o processo de pelletização em função da variação da umidade de entrada da matéria prima.

1.5 DELIMITAÇÕES DO OBJETO DE ESTUDO

O estudo delimita-se à avaliação experimental das propriedades de *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar, das variáveis dos processos de produção, bem como dos recursos energéticos envolvidos e custos de produção. Adicionalmente, a pesquisa delimita-se à obtenção da relação entre a energia consumida e os custos de produção em função da variação

da umidade da matéria prima, a partir de dados obtidos em uma unidade industrial de produção de *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 USO DE BIOMASSA PARA ENERGIA

Biomassa pode ser definida como o conjunto dos materiais orgânicos autótrofos do reino vegetal (fitomassa) ou acumulados nos seres heterótrofos do reino animal (zoomassa). Estes organismos autótrofos fotossintéticos fazem a transformação da energia solar em energia química, através da biogeoquímica dos cloroplastos contidos na clorofila das plantas. Essa energia fica retida e acumulada nos espaços intermoleculares e é liberada posteriormente por processos de oxidação, redução e hidrólise, que podem ser de natureza termoquímica, bioquímica ou biológica (SOARES e OLIVEIRA, 2006).

No Brasil, desde a década de 70, programas de utilização de biomassa como fonte de energia vêm sendo realizados. Em 1975 o Governo Federal através do Ministério de Minas e Energia lançou o programa Pró-Álcool, seguido em 1978 pelo programa Pró-Óleo que em 2002 viria a se tornar o programa Biodiesel (SILVA, GOMES E ALSINA, 2007). Nesses dois programas destaca-se a utilização de biomassa como matéria prima, destacando-se o álcool fabricado através da matéria prima cana-de-açúcar e o biodiesel que pode ter como matéria prima plantas como soja, girassol, canola e babaçu entre outras (EMBRAPA, 2013).

Atualmente, o Brasil possui números expressivos de utilização e oferta de energia gerada pela utilização da Biomassa. Segundo dados referentes ao ano de 2012 (EPE, 2013), 6,8% de toda energia elétrica disponível no país é gerada por biomassa, e que 30,4% da energia gerada pelas termoelétricas são provenientes da utilização de biomassa. Referente à oferta de energia no país tem-se em 2011 que 9,1% é de biomassa de lenha e carvão vegetal e 15,4% é de biomassa cana-de-açúcar (EPE, 2013).

Na Europa a biomassa também representa uma das fontes renováveis com maior potencial de crescimento. Segundo a Comissão Europeia, já em 2004, cerca de 4% da energia consumida pelo setor primário era de biomassa, que significava na época dois terços de toda a energia renovável produzida (EEA, 2006).

Algumas vantagens podem ser destacadas na utilização da biomassa se comparada com energia fóssil (SAIÃO, 2009): neutralidade na emissão de CO₂, continuidade de fornecimento devido à multiplicidade de fontes, desenvolvimento local de novos postos de trabalhos, diminuição na emissão de poluentes pelo baixo teor de enxofre. Por outro lado, deve-se salientar algumas desvantagens como baixa conversão energética em relação ao Petróleo que para se atingir a mesma quantidade de energia necessita-se de 4,5 vezes mais peso e 12,5 vezes mais volume, consequência deste fato que impacta negativamente à

utilização de biomassa devido aos altos custos de transporte e logística de fornecimento e distribuição (IEA, 2012).

Atualmente, há uma grande variedade de produtos disponíveis produzidos provenientes de diversas variedades de biomassa como matéria prima para geração de energia. A seguir, serão apresentadas as principais biomassas para geração de energia.

O etanol (álcool) figura entre as principais fontes de energia de biomassa gerada em nosso país, sendo também o principal biocombustível utilizado no mundo (BASTOS, 2007). O etanol é produzido através da planta cana-de-açúcar, que é submetida ao processo de cultivo, colheita da planta, transporte até as usinas, extração do caldo, tratamento do caldo, preparação do mosto com adição de produtos (químicos, mel, xarope e água), fermentação do caldo com leveduras e aditivos, separação do vinho, e destilação para a produção de álcool (PEREIRA, 2008). No mundo, o consumo de combustível etanol em 2010 foi estimado em 86 bilhões de litros (REN21, 2011). Em 2010 o Brasil foi o segundo maior produtor chegando a 28 bilhões de litros, enquanto o consumo doméstico do combustível superou 23 bilhões de litros (MAPA, 2011). Pode-se considerar também que em 1 tonelada de cana-de-açúcar contenha 1.641 MJ em 70 litros de álcool (PELLEGRINI, 2002).

Outra grande fonte de imenso potencial energético no mundo é a biomassa das florestas, sendo uma das primeiras fontes a serem utilizadas pelo homem desde a antiguidade para obter fogo (UHLIG, 2008). Neste contexto de florestas a biomassa abrange a madeira (lenha) propriamente dita, carvão vegetal, galhos, folhas e todo o resíduo orgânico que venha a ser utilizado das florestas. Esta biomassa apresenta algumas vantagens em relação à maioria das biomassas utilizadas para a produção de energia, como baixo custo em comparação ao seu poder calorífico e baixo teor de cinza e enxofre (SOARES e OLIVEIRA, 2006). Em 2012, 9,1% do total da energia disponível no país foi de lenha e carvão mineral e que 6,5% de toda a energia consumida no Brasil foi de lenha (EPE, 2013).

O bagaço de cana-de-açúcar é uma biomassa que também vem sendo utilizada em larga escala. Ele é subproduto da extração do caldo da cana-de-açúcar nas usinas de produção de álcool e açúcar. Devido ao aumento da produção destes produtos e implantação de novas usinas acompanhando o aumento da demanda do mercado brasileiro e mundial por estes produtos, o bagaço de cana se tornou o principal resíduo agrícola do país, principalmente no que se refere à utilização da biomassa para geração de energia (BACCI e SANTOS, 2008) e como descrito anteriormente aproximadamente 30% do peso da quantidade produzida de cana-de-açúcar vira o resíduo chamado de bagaço-de-cana (SILVA, GOMES E ALSINA, 2007). Considerando que na safra de 2011/2012 foram moídas 559 milhões de toneladas de

cana-de-açúcar (UNICA, 2012), dá para se estimar o grande potencial da utilização desta biomassa, embora uma grande quantidade já seja usada nas próprias usinas de produção de álcool e açúcar para geração de vapor e energia elétrica. Em 2012, 11,2% do consumo final de energia no Brasil é oriunda do bagaço de cana-de-açúcar (EPE, 2013). Atualmente o produto está sendo utilizada em larga escala para geração de vapor, eletricidade e geração de calor entre suas principais aplicações.

A casca de arroz também vem sendo estudada e utilizada para a produção de energia, elétrica e térmica. Silva (2011) apresentou um trabalho sobre a perspectiva de utilização da casca de arroz para combustão em uma região brasileira, considerando-se um poder calorífico de 14,17 MJ/kg. Neste estudo foi concluído que a casca de arroz se apresenta como alternativa relevante para a geração de energia.

O Capim elefante também é uma biomassa que pode ser utilizada na geração de energia em termo elétrica ou na combustão direta em fornos, destacando-se pela alta produtividade e alta conversão energética se comparada, por exemplo, com cana-de-açúcar, dendê, soja e girassol com poder calorífico superior a 17,38 MJ/kg (MORAIS, 2011).

A casca de coco pode ser uma alternativa energética como resíduo obtido do consumo da água de coco em muitas regiões brasileiras. Destaca-se ainda que, além da casca de coco, outras partes da planta também podem ser utilizadas, como a raiz, o estope, a inflorescência, as folhas e o palmito (VALE, BARROSO e QUIRINO, 2004).

O bagaço da laranja também é uma importante fonte de biomassa disponível para geração de energia. O bagaço da laranja é um subproduto de suco de laranja e corresponde a 49% do peso total da fruta, sendo o Brasil o maior produtor mundial de laranja (MONTANHER, 2009). Outro produto que pode também ser obtido da casca de laranja é o álcool, que pode ser utilizado como combustível (ALMEIDA, 2010).

Podem-se citar ainda algumas palhas, cascas (GOES et al., 2008) e farelo de polpas cítricas (MONTANHER, 2009) como biomassa utilizada para fins energéticos.

A Tabela 1 mostra o valor do poder calorífico de algumas biomassas.

Tabela 1 - Poder calorífico de biomassas

Produto / biomassa	Densidade kg/m ³	Poder calorífico MJ/kg
Álcool Etílico Anidro	791	28,26
Álcool Etílico Hidratado	809	26,38
Bagaço de Cana-de-açúcar	130	8,92
Caldo de Cana	-	2,6
Carvão Vegetal	250	27,05
Lenha Catada	300	12,98
Lenha Comercial	390	12,98
Lixívia	1.090	11,97
Melaço	1.420	7,75

Fonte: EPE (2013)

2.2 O PROCESSO DE PELLETIZAÇÃO DE BIOMASSA

O processo de pelletização de biomassa consiste na compactação da matéria prima em uma matriz de pelletização através de alta pressão aplicada, obtendo como resultado os *pellets*, com diâmetros finais variando de 6 mm à 12 mm e comprimento variável (STAHL e BERGHEL, 2011). Em muitos casos, a matéria prima deve ser preparada através do processo de secagem e moagem antes de ser submetida ao processo final de pelletização. Quando a secagem é necessária, a matéria prima passa por um secador que pode ser do tipo ciclônico ou rotativo. Na secagem, o contato da biomassa com o ar em altas temperaturas retira água do material, resultando em uma umidade menor e apropriada para o processo de pelletização (CORRÊA, 2003). Outro processo que em muitos casos se faz necessário e usado na preparação da biomassa antes da pelletização é o processo de moagem. Neste processo a matéria prima passa pelo moinho para diminuir o tamanho médio das partículas (THEK e OBERNBERGER, 2004; LEHMANN et al., 2012).

Em outra definição, *pellets* (Figura 1) é considerado como combustível orgânico produzido na forma cilíndrica, utilizando biomassa adensada oriundas de resíduos e serragem, tendo como características principais o alto poder calorífico, acima de 17 MJ/kg, umidade inferior a 10%, baixos teores de cinzas e densidade acima de 650 kg/m³ que garantem a praticidade operacional, baixo volume de armazenamento, transporte mais econômico e combustão mais eficiente (RASGA, 2013).



Figura 1 - Pellets de biomassa

Fonte: Garcia (2010)

Como principais características esperadas do processo de pelletização e vantagens que tornam os *pellets* de biomassa uma alternativa competitiva se comparado às propriedades da matéria prima (WOLF, VIDLUND e ANDERSON, 2006; CARONE, PANTALEO e PELLERANO, 2011; STAHL e BERGHEL, 2011), destacam-se:

- Aumento do poder calorífico – o aumento do poder calorífico nos *pellets* de biomassa se dá através da diminuição da umidade da matéria prima.
- Aumento da densidade – para o aumento da densidade dos *pellets*, dois processos são os responsáveis. A moagem que diminui o comprimento das partículas do material e o deixa melhor agrupado por unidade de volume e, principalmente, o aumento da densidade proveniente da redução de volume (prensagem) na matriz de pelletização.
- Maior energia por menor volume – fator que se deve ao aumento do poder calorífico pela diminuição da umidade e também à compactação.
- Menores custos de transporte – este fator é um dos mais importantes na viabilização da pelletização de biomassa, pois com o aumento da densidade, o transporte da biomassa se torna mais barato e fácil.
- Menores áreas e menores custos de armazenamento – com o aumento da densidade em algumas vezes, o espaço tomado para armazenamento se torna algumas vezes menores, diminuindo o espaço disponível necessário para estocagem.
- Menores custos para a instalação de queimadores (fornalhas e caldeiras) para utilização dos *pellets* como combustível – devido à maior concentração de

energia por volume, o dimensionamento do tamanho de fornalhas e caldeiras é menor.

- Produto de fácil manuseio – pelo fato de se tornar um material de tamanho pequeno e uniforme se comparado à matéria prima inicial, o manuseio se torna mais fácil.
- Transformação de resíduos orgânicos ou subprodutos em combustíveis – fator importantíssimo na concepção do mundo atual, pois a pelletização de biomassa é aplicada em muitos casos a produtos ou subprodutos que eram descartados para a natureza.
- Alto controle da chama e do calor gerado, homogeneidade na queima – com a característica de homogeneidade de densidade, poder calorífico e umidade o controle da chama e calor gerado por unidade de tempo nas caldeiras e fornalhas são precisos, diminuindo consideravelmente as variações no processo.
- Permanência das características e propriedades do produto após estocagem por longos períodos – com o produto *pelletizado*, a suscetibilidade às variações que podem ser ocasionadas pelo ambiente é minimizada, conservando principalmente a forma, densidade e umidade do produto devido a sua alta compactação.

No cenário mundial, a produção de *pellets* a partir de biomassa para uso como energia surgiu na década de 70 na América do Norte, com a pelletização de madeira, como alternativa para solucionar a crise do petróleo, utilizando-o em substituição de combustível fóssil para aquecimento residencial e industrial (DOLZAN, 2006). Já na Europa há registros que a primeira indústria de *pellets* surgiu na cidade de Mora na Suécia em 1982, também criada como alternativa para a queima de combustível fóssil com iniciativa do governo em programas para se encontrar energias alternativas (LJUNGBLOM, 2005). Com o decorrer dos anos a Suécia passou a ser um grande produtor mundial de *pellets* e no ano de 2000 a produção anual era de 1 milhão de toneladas (BIOENERGY INTERNATIONAL, 2006). Em 2009 a Suécia foi o maior produtor Europeu, com produção anual estimada em mais de 1,8 milhões de toneladas (GARCIA, 2010). Em 2004 em toda a Europa havia 195 plantas de *pellets*, sendo que em 2010 com o crescimento da busca por este tipo de energia o número de fábricas de *pellets* era de 594 (BIOENERGY INTERNATIONAL, 2006).

A utilização dos *pellets* produzidos de madeira é comum em diversos países do mundo e inclusive no Brasil tendo entre suas variadas formas de aplicação o aquecimento de piscinas, fornos de padaria, fornos de cerâmicas, oficinas de pintura, aquecimento de estufas, calefação de moradias, secagem de grãos, forro de cama para animais, desodorizadores de sapatos, banheiros e geladeiras, desumidificadores em locais com umidades excessivas (RASGA, 2013).

Em 2009 a produção mundial anual de *pellets* de madeira foi de 12 milhões de toneladas com previsão de grande acréscimo para os próximos anos, podendo chegar a 100 milhões de toneladas em 2020 incentivada pelos governos mundiais e políticas que direcionam para o uso deste tipo de energia devido principalmente às mudanças climáticas que estão ocorrendo associadas à queima de combustíveis fósseis (BLOOMBERG, 2010; ROOS e BRACKLEY, 2012).

O Gráfico 1 apresenta os maiores produtores e consumidores mundiais de *pellets* de madeira em 2009. Os maiores produtores são Estados Unidos, Alemanha, Suécia, Canadá, China, Itália, Áustria, Bélgica, Dinamarca, Holanda e Japão. Como maiores consumidores mundiais temos Estados Unidos, Suécia, Dinamarca, China, Bélgica, Holanda, Alemanha, Itália, Áustria, Canada e Japão (ROOS e BRACKLEY, 2012).

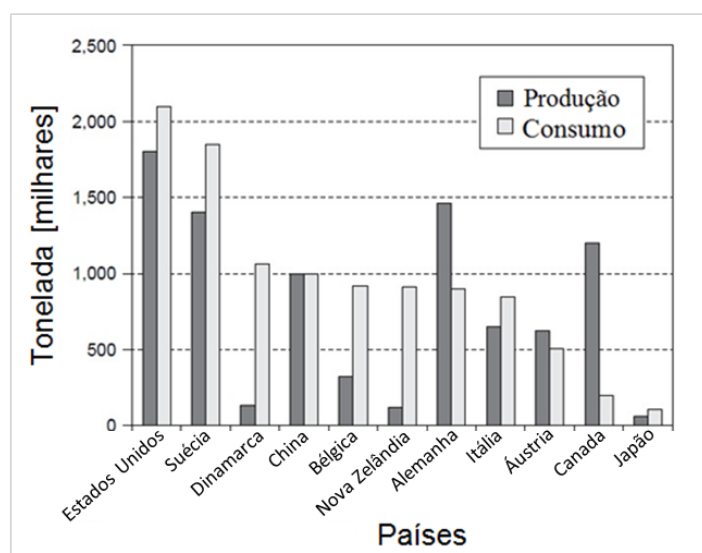


Gráfico 1 - Maiores produtores e consumidores mundiais de *pellets* de madeira

Fonte: Murray (2010)

Para demonstrar o crescimento previsto para os próximos anos, Rakos (2007) projeta dois cenários para o crescimento da produção de *pellets* no mundo. Um com uma taxa de crescimento de 18% a.a. e outra com 25% de crescimento a.a. principalmente devido ao forte

crescimento atual na Europa de instalação de aquecedores de água e sistemas de calefação (Gráfico 2).

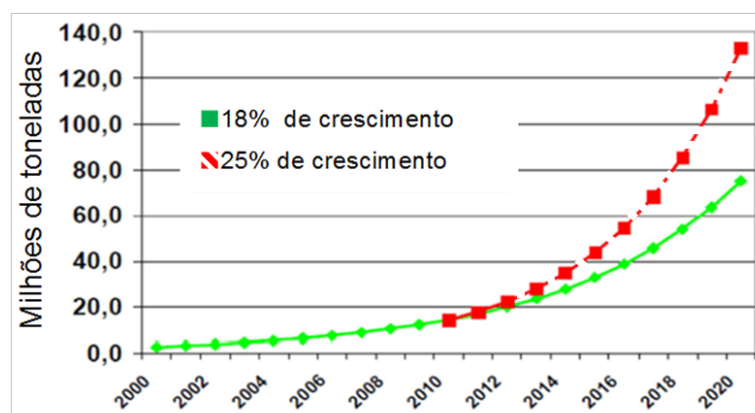


Gráfico 2 - Crescimento da produção mundial de *pellets*

Fonte: Rakos (2007)

Atualmente inúmeros tipos de biomassa estão sendo pelletizadas por todo o mundo, é crescente os investimentos nesta área para se obter novas fontes de energia, sendo que algumas já estão sendo produzidas em escala industrial e outras apenas para testes. Dentre as principais biomassas que se tem conhecimento a serem pelletizadas referenciamos algumas como serragem (KONG, 2012), casca de madeira (LEHTIKANGAS, 2001), madeira (FANTOZZI, 2010), bagaço de cana-de-açúcar (ERLICH e FRANSSON, 2011), casca de soja (GOES et al., 2008), farelo de polpas cítricas (MONTANHER, 2009), casca de arroz (COUTO, 2004) entre outras. O processo geral de pelletização entre os diferentes tipos de matérias primas de biomassa é similar, podendo haver peculiaridades entre os diferentes parâmetros de processos no que se diz respeito à umidade ideal para pelletização, granulometria adequada, diâmetro da matriz de pelletização, pressão de pelletização, produção alcançada por hora, qualidade dos *pellets*, poder calorífico resultante final, energia total gasta na transformação.

2.2.1 Características gerais e características dos processos de secagem, moagem e pelletização.

Secadores são essenciais e determinantes para garantir a qualidade e propriedades dos *pellets* através da preparação da biomassa. Na maioria das vezes a matéria prima se encontra com variações de umidade e valores muito acima da faixa aceitável de pelletização (TROMBORG et al., 2013), sendo assim para se ter no final do processo *pellets* com umidade

abaixo de 12 ou 10% indicados pelas normas (MARAVÉR, POPOV e ZAMORANO, 2011) se faz necessário a secagem da matéria prima.

Dentre alguns tipos de secagem de biomassa se tem a *secagem natural* em que a matéria prima é estocada em um ambiente coberto. Esta é a forma mais simples de secagem embora seja lenta e não se consegue atingir os valores desejados para o processo de pelletização, mas utilizada comumente para uma pré-secagem da matéria prima a ser utilizada. Outro tipo de secagem utilizado nos processos envolvendo biomassa é a *secagem tubular*. Este é um método muito utilizado em pelletização, onde o material se movimenta dentro de tubos aquecidos externamente que se encontram em 90 °C sem haver contato entre o meio aquecido e o material. Normalmente o meio externo se encontra em meio a óleo térmico ou com água quente. O sistema funciona com fluxo oposto, ou seja, o fluxo do material é oposto ao fluxo do fluido quente. Uma grande vantagem deste sistema é o custo de manutenção que é baixo comparado a outros sistemas de secagem (SILVA, 2011). Existe ainda secagem de tapetes e secagem de baixa temperatura.

Outra tecnologia é o secador de tambor ou rotativo ou secador rotativo (Figura 2) muito utilizado nas fábricas produtoras de *pellets* de biomassa ou em processos que se faz necessário a secagem de biomassa, podendo ser de aquecimento direto ou indireto. No primeiro caso o ar entra em contato direto com a matéria prima dentro do tambor. No aquecimento indireto o ar aquecido passa pelo lado de fora do tambor. Nos dois casos o material é transportado de forma lenta dentro do tambor. O ar aquecido passa com maior velocidade. Como parâmetros de controle a temperatura dos fluidos aquecidos se encontra de 300 °C a 600 °C. Se destaca ainda o secador de tambor pela grande homogeneidade da matéria prima devido a sua movimentação e altos índices de eficiência de trocas térmicas (OBEMBERGER e THEK, 2010).



Figura 2 - Secador rotativo

Fonte: Silva (2011)

Em sistemas de secagem em secadores rotativos o tempo de residência com o ar quente e a temperatura do ar quente são decisivos para a eficiência do processo, embora acredita-se que o aumento do tempo de residência é um fator muito mais decisivo que o aumento de temperatura (STAHL et al., 2004). Outro fator importante na eficiência de secagem em secadores rotativos é o comportamento dinâmico das partículas dentro do secador influenciados pela forma da matéria prima e construção interna do secador, podendo interferir na homogeneidade do material seco e tempo de residência.

Utilizando outras referências na secagem da matéria prima, encontra-se tempos de residência de 1 min a 40 min, com temperaturas variando de 200 °C a 400 °C fatores que alteram diretamente o teor de umidade da biomassa a ser pelletizada (PIRRAGLIA et al., 2013).

Oliveira et al. (2010) utilizou outro tipo de secador em um sistema experimental composto por ciclone, coletor de sólidos, alimentador Venturi, esteira elétrica, aquecedor, placa de orifício e soprador. Foi confeccionado um sistema de secagem baseado no método de superfície de resposta com um delineamento composto central rotacional. Foram testados bagaço à 74,52% e 51,72% de umidade afim de se ter a variação do teor de umidade em função da temperatura, vazão máxima e tempo de residência. Os resultados obtidos foram que para ambas as amostras as maiores reduções do teor de umidade foram alcançadas com o aumento da temperatura e a diminuição da vazão de alimentação dos sólidos.

Outro processo normalmente necessário na preparação da biomassa para a pelletização é o processo de moagem, empregado com a finalidade de uniformização do tamanho das partículas da biomassa e para a diminuição do tamanho o que favorece a qualidade e diminuição de forças de pelletização. Um dos modelos de equipamentos mais comuns utilizados na moagem de biomassa pelo mundo é o moinho de martelo (Figura 3), com peneira de saída de tamanho variável (aconselhável acima de 2 mm) e rotação de trabalho de 3.000 rpm (GIL et al., 2012).

Nos processos de moagem, foi comprovado em experimentos que a energia necessária para a moagem é exponencialmente influenciada pela geometria das partículas a serem moídas para uma mesma quantidade de umidade e que há uma diminuição na densidade final da biomassa em uma proporção linear com a moagem. Os dados mostraram que para um fator de aumento da energia necessária de moagem de 5,3 a diminuição do tamanho das partículas foi de 3 vezes. Além disso se demonstrou com a diminuição das partículas que os fluxos de material através dos alimentadores mecânicos são favorecidos evitando travamentos inesperados pela acomodação dos materiais fibrosos (GIL et al., 2012).



Figura 3 - Moinho de martelo

Fonte: Lippel (2014)

Carone, Pantaleo e Pellerano (2011) desenvolveram um trabalho para analisar alguns parâmetros de processo como pressão e temperatura na produção de *pellets* de resíduo da poda de oliveira considerando o teor de umidade e tamanho dos grãos da matéria prima e propriedades físicas dos *pellets* como durabilidade e densidade. Para os testes foram utilizados diferentes tamanhos de martelos e diferentes tamanhos de peneira no moinho e matéria prima foi secada à 5% de umidade à temperatura de 65 °C. Como resultados na pelletização teve-se que através da redução no tamanho de grão das partículas, houve uma menor expansão longitudinal e radial na saída da matriz e que devido às temperaturas acima de 100 °C durante a pelletização houve uma perda de massa devido à evaporação, destacando também que menores tamanhos de grãos se têm *pellets* mais densos e mais resistentes fisicamente. Destaca-se ainda que o teor de umidade deve estar abaixo de 10% de umidade para uma boa qualidade de *pellets*.

Na etapa de pelletização um fator muito importante é o controle da umidade da matéria prima, pois caso a umidade dos *pellets* for muito baixa este sofrerá com o acúmulo de calor gerado no momento de passagem do material pela matriz de pelletização, podendo haver queima na sua superfície. Em casos de umidade alta haverá uma redução nas propriedades mecânicas como durabilidade e dureza em função da pressão de vapor dentro dos orifícios da matriz, aumentando a quantidade de *pellets* quebradiço e poeira. O vapor liberado pelo processo pode ser utilizado para suavizar a lignina, ligante da celulose, o que melhora a extrusão e conseqüentemente a produção de *pellets*. Pode-se inclusive ser incluído junto à matéria prima original aditivos para melhorar características químicas e mecânicas durante o processo (RASGA, 2013). Na Figura 4 é mostrado uma pelletizadora.

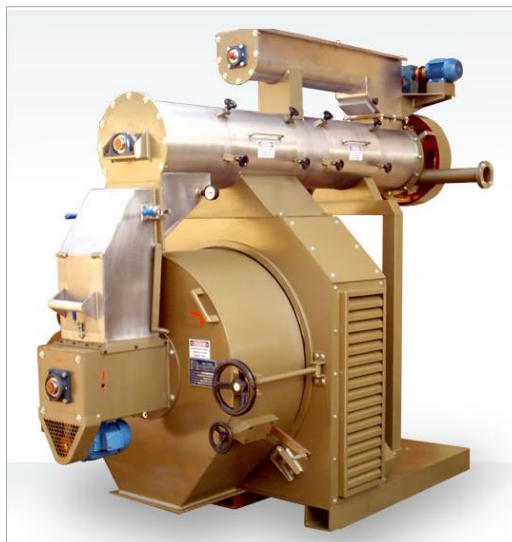


Figura 4 - Pelletizadora de biomassa

Fonte: Chavantes (2014)

Stelte et al. (2011) demonstraram que a umidade em é um fator fundamental para a durabilidade, formação de finos e estabilidade de *pellets* de biomassa. Constatou-se que a melhor faixa para se formar *pellets* de qualidade é entre 5% e 15% de umidade, não havendo formação de *pellets* robustos com umidades acima de 20%. É possível que com o aumento da umidade as ligações entre polímeros de madeira sejam substituídas por ligações de moléculas de água, reduzindo a resistência dos *pellets*. No entanto deve existir uma quantidade mínima de umidade para que haja uma ligação satisfatória entre as moléculas da biomassa.

Este mesmo estudo constatou que com a diminuição no tamanho das partículas de matéria prima interfere claramente na fricção dentro da matriz de pelletização, aumentando a pressão de pelletização, sugerindo que existe uma maior área de atrito nas paredes de pelletização.

Por fim, dentre os processos, existe o processo de pelletização realizado em um equipamento chamado de pelletizadora, formado por uma matriz que fica em rotação com furos de tamanho variado onde a matéria prima é forçada a passar pelos orifícios pela compressão realizada por rolos dentro da câmara.

Em estudos realizados em pelletização de serragem de madeira (NIELSEN, GARDNER e FELBY, 2010), com diferentes tipos de amostras isoladas de diferentes espécies de madeiras em um ambiente com temperatura controlada, com o objetivo de analisar as forças envolvidas na pelletização, mostrou-se no processo específico de pelletização onde a matéria prima é forçada mecanicamente a passar pelos orifícios da matriz, que as variações de energia envolvidas e necessárias neste processo pelo trabalho a ser realizado (energia envolvida para realização do processo), são impactadas diretamente por

diferentes espécies de matérias primas de serragens, podendo ser de madeiras mais moles ou mais duras devido às espécies de árvores, impactadas também pelo modo de extrair a matéria prima e também pela forma de estocagem. Fazendo um paralelo com a pelletização de bagaço de cana-de-açúcar (similar no aspecto de pelletização), pode-se dizer que a energia envolvida no processo de pelletização, especificamente na passagem de matéria pela matriz de pelletização, pode ser impactada por diferentes espécies de cana, modo de extração, granulometria resultante no bagaço de cana-de-açúcar após a retirada do caldo da cana nas usinas de álcool e açúcar, modo e tempo de armazenagem e granulometria final do bagaço de cana-de-açúcar após o processo de moagem no processo de pelletizar.

Filbakk et al. (2011) estudaram a influência do armazenamento da matéria prima aplicados a diferentes temperaturas de secagem no consumo de energia para pelletização de madeira. Como resultado deste experimento tem-se que com maior tempo de estocagem aumenta-se a energia elétrica gasta para pelletização, atribuindo a este fato a perda de componentes do material em estoque e que não houve diferença na energia elétrica gasta na pelletização com a utilização de diferentes temperaturas de secagem, e que o consumo de energia elétrica gasto no processo diminui linearmente com o aumento de umidade, embora exista um limite de umidade para se ter uma boa qualidade de *pellets*.

Relovaa et al. (2009) mostram um estudo de variáveis que afetam o processo de pelletização desde o tipo de matéria prima e variáveis de processo como umidade, granulometria do material, pressão e temperatura no processo de compactação. Como conclusões tem-se primeiramente que os testes mostraram resultados diferentes aos de outros autores que trabalharam com outras matérias prima, ressaltando aqui a peculiaridade de cada matéria prima no processo de pelletização e em segundo lugar conclui que o fator testado mais impactante na formação dos *pellets* foi a diferença na força aplicada, seguido pela variação de umidade e quase que sem impacto nos resultados a diferenças nas granulometrias da matéria prima testada.

Stelte et al. (2011) verificou-se que a pressão de pelletização aumenta de forma exponencial com o aumento no tamanho das partículas. Também, se comprovou estar de acordo com o modelo matemático que com o aumento da temperatura se faz diminuir a pressão de pelletização devido aos efeitos da extração hidrofóbico que se faz como lubrificante entre a biomassa e as paredes de metal da matriz observado através de um espectro infravermelho. Quanto ao efeito do teor de umidade, se obteve resultados diferentes com os tipos de biomassa pelletizada, aumentando a pressão com o aumento de umidade na palha de trigo e diminuindo a pressão com o aumento de umidade na madeira.

Matrizes de pelletização (Figura 5) podem ter diâmetros e comprimento dos orifícios com dimensões variadas, dependentes do tipo de biomassa a ser pelletizada e principalmente da pressão de compactação que se exige para determinada destinação dos *pellets*. Esta relação do comprimento do furo pelo diâmetro do furo pode ser chamada de taxa de compressão, que define o grau de compactação dos *pellets*. Como exemplo, pode ser citada uma matriz de furo de 70 mm de comprimento por 6,35 mm de diâmetro utilizados em pelletização de serragem (LI et al., 2012).

O valor da densidade final dos *pellets* de biomassa é afetado com o aumento da pressão de pelletização. Embora esta afirmação seja verdadeira é observado que o aumento da densidade acontece até um determinado valor, e que posteriormente a este valor mesmo com o aumento da pressão de pelletização a densidade permanece sem incrementos, como observado no estudo em que os limites de densidade para a biomassa testada foi de 1.500 kg/m³. O resultado mostrou que as maiores diminuições dos volumes dos *pellets* foram com pressão de pelletização abaixo de 50 Mpa, enquanto que no intervalo entre 250 Mpa e 600 Mpa foram detectadas pequenas variações de densidade (STELTE et al., 2011).



Figura 5 - Matriz de pelletização

Fonte: Autoria própria

2.2.2 Energias envolvidas no processo de pelletização

Com a finalidade de avaliar e aumentar a eficiência energética na produção de *pellets* de madeira (STAHL e BERGHEL, 2011), foi misturado a matéria prima de serragem com bolo de colza que é um produto residual da produção de óleo. Para os testes executados, a serragem utilizada estava com 52 – 60% de umidade e o bolo de colza com 6,6 – 7,3%, foi

definido também a umidade dos *pellets* resultante em 12% de umidade e com uma dosagem de mistura de 10, 20 e 30% de bolo de colza no peso total da matéria a ser pelletizada. O sistema utilizado para a pelletização nos testes foi composto de um alimentador, torre de secagem, ciclone de separação de sólidos, misturador, pelletizadora e resfriador. Nos testes foi verificada a diminuição na energia consumida durante a pelletização através do menor consumo de energia da pelletizadora com incremento no percentual de bolo de colza, ou seja, quanto maior a quantidade de bolo de colza, menor o consumo de energia para a produção de *pellets*. Conclui-se então que pode ser melhorada a eficiência energética na produção de *pellets* com a adição de determinados materiais que facilitem o escoamento pela matriz de pelletização.

Em outro estudo de Uasuf e Becker (2011), foram analisadas as energias envolvidas para se produzir *pellets* de serragem de madeira, considerando custos de matéria prima, investimentos de construção e aquisição da unidade industrial e custos relacionados a sua operação, logística de distribuição e energias gastas durante o processo de pelletização. Foram considerados cenários onde a capacidade produtiva era de 3 e 6 toneladas hora de *pellets*. Destaca-se neste amplo trabalho, os resultados que foram feitos em relação ao consumo de energia nos processos internos da fábrica, divididas em energia térmica para geração de calor para secar a matéria prima, energia elétrica responsável pelo acionamento do moinho, *pelletizadora* e alguns motores e energia gasta na queima do combustível Diesel para movimentações. Como resultado considerando 100% da energia gasta entre estes três tipos de energias, tem-se 82% gasta em energia térmica e 14% gasta em energia elétrica no processo de pelletização.

Digiacomio e Taglieri (2009) realizaram um estudo dos benefícios, custos e análises energéticas para a transformação de resíduos de madeira em *pellets* em uma indústria de pelletização. Inúmeras considerações e resultados foram alcançados, mas destaca-se para nossos estudos as propriedades resultantes nos *pellets* e as energias gastas por toneladas para a produção dos *pellets*, caracterizando os processos de moagem, secagem e pelletização. Seguem os dados nas Tabelas 2 e 3.

Bacci e Santos (2008) desenvolveram um trabalho para analisar a variação do poder calorífico em função da variação de umidade no bagaço de cana-de-açúcar. Utilizando a metodologia de determinação de poder calorífico superior (PCS) segundo norma da associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT NBR – 8633/1984, foi determinado o poder calorífico do bagaço de cana-de-açúcar com a variação de umidade. A Tabela 4 mostra a variação do poder calorífico em função da variação de umidade passando de 50 à 0%, onde

se obtém um incremento energético da ordem de 92%, sendo que 60% são conseguidos reduzindo a umidade para 20%. Em outra análise, no Gráfico 3 é descrito um comportamento linear na diminuição da umidade no decorrer do tempo, este fato pode ser explicado pelo fato do bagaço de cana-de-açúcar estar significativamente pulverizado com diâmetro médio de aproximadamente 0,9 mm, aumentando a área de contato e facilitando a retirada de água.

Tabela 2 - Propriedades de *pellets* de madeira

<i>Pellets</i> de madeira	
Poder calorífico	17 GJ/ton 4,7 kWh/kg 3.080 kWh/m ³
Umidade	8%
Densidade	650 kg/m ³

Fonte: Digiacomo e Taglieri (2009)

Tabela 3 - Consumo de energia elétrica por tonelada de produção de *pellets*

Seção	Consumo de energia elétrica (kWh/t)
Secagem	310
Moagem	20
Pelletização	40
Outros	30
Total	400

Fonte: Diacomo e Taglieri (2009)

Em 2009, em uma indústria de produção anual de 100.000 toneladas o consumo médio gasto em um ano de produção por tonelada foi de 85,7 kWh/t (SERRANO, 2009), lembrando que as necessidades de consumo de energia térmica para a secagem são atendidas com a própria queima da biomassa em seu estado inicial.

Tabela 4 - Poder calorífico do bagaço de cana-de-açúcar

Poder calorífico superior (MJ/kg)	Umidade (%)
18,25	0
16,68	10
15,24	20
13,17	30
9,52	50

Fonte: Bacci e Santos (2008)

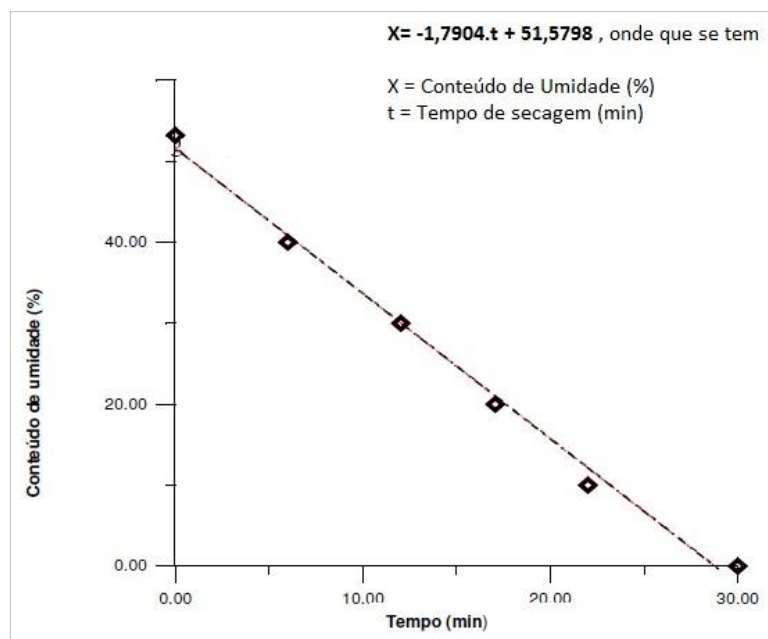


Gráfico 3 – Umidade do bagaço de cana-de-açúcar em função do tempo de secagem

Fonte: Bacci e Santos (2008)

2.2.3 Custos no processo de pelletização

As propriedades específicas da matéria prima é um fator determinante para os custos de produção de *pellets*. A umidade de entrada da matéria prima é um dos fatores mais importantes no processo de pelletização de biomassa, pois para se pelletizar com qualidade, é necessário que o material chegue com umidade apropriada na matriz de pelletização. Assim, independentemente da umidade *in-natura* da matéria prima, esta deve ser seca ao ponto ideal para pelletização, aumentando os gastos com a energia necessária para a secagem (PIRRAGLIA et al., 2013).

O tamanho das partículas é outro fator que pode encarecer o processo de pelletização. É notável que com partículas de tamanho menor se obtém um processo de pelletização mais estável e com melhor qualidade final de *pellets*. Sendo assim, uma moagem da matéria prima se faz em muitos casos necessária, podendo varia a potência e o consumo de energia do processo moedor em função do tamanho das partículas iniciais e final desejada (GIL et al., 2012).

O dimensionamento errado da taxa de compressão de uma matriz pode além de acarretar má qualidade dos *pellets* pode provocar um aumento dos esforços no equipamento, aumentando o gasto com energia e, conseqüentemente, os custos (LI et al., 2012).

Uasuf e Becker (2011) mostraram, na análise dos dados de uma indústria de *pellets*, que a diferença nos custos totais de produção ao se trabalhar com 100% de serragem e com 50% de aparas de madeira não era significativa. Porém, quando submetido à variação da

capacidade produtiva, os números mostraram que houve uma redução de 25% no custo específico por tonelada de *pellets* produzida quando se submeteu a processos com o dobro de capacidade hora. Outro dado encontrado foi que os custos totais de fabricação foram divididos em 34 % de aquisição de matéria prima, 16% de investimentos gerais, 14% de secagem da matéria prima, 9% processo de pelletização, 8% de mão de obra, 8% movimentação de materiais, 4% moinho e 4% em equipamentos diversos.

Pirraglia et al. (2013) apresentou os custos de produção de uma indústria de *pellets* de biomassa, para uma fábrica de capacidade de 1.000.000 toneladas/ano de U\$ 199,00 /ton valor similar a encontrado por Gonzalez (2010) para uma fábrica com capacidade ano de produção de 80.000 toneladas citado pelo autor. Neste trabalho o autor cita outros custos de produção encontrados com variação de até 47% /ton produzida. Cita-se também que os custos calculados podem ser modificados com a alteração de alguns cenários como exemplo ao se ajustar as taxas internas de retorno, os preços internos variando de acordo com o produtor, espécie de madeira e região. Pode ser alterado ainda em função da distância percorrida até a entrega do produto, aumentando o custo em 41,70% a uma distância limite de 80 km. Pirraglia et al. (2013) ainda destaca que o mercado de *pellets* não está até o momento totalmente formatado, podendo ainda ter variações no âmbito do seu potencial de mercado, justificando a importância de estudos científicos nesta área. Outra conclusão do estudo é que os maiores custos de produção são liderados pela aquisição e entrega da matéria prima, seguidos pela depreciação dos equipamentos, enquanto o consumo de energia aparece como sendo uma menor fração dos custos do processo, tendo destaque ainda para a adição de aglutinantes no processo que podem modificar consideravelmente os custos.

Como visto anteriormente existem inúmeros tipos de secadores de biomassa, sendo que para cada um deles pode-se existir diferenças em suas eficiências para secagem. Anderson, Harvey e Berntsson em 2006 desenvolveu um trabalho para se avaliar a eficiência térmica de vários tipos de secador, chegando a variações de custos de secagem de 58,13%.

2.2.4 Fluxo de massa do processo de pelletização

A distribuição do fluxo de massa apresentada em uma indústria de *pellets* de biomassa na região sul do Brasil, com capacidade de produção de um milhão de toneladas por ano, mostra que, para cada tonelada de *pellets* de cavaco e serragem de madeira a 30% de umidade, 120 kg (12%) são gastos como combustível para o processo de secagem, 30 kg (3%) são perdidos durante o processo, resultando em 850 kg de *pellets* (85%) como demonstrado na Figura 6 (SERRANO, 2009).

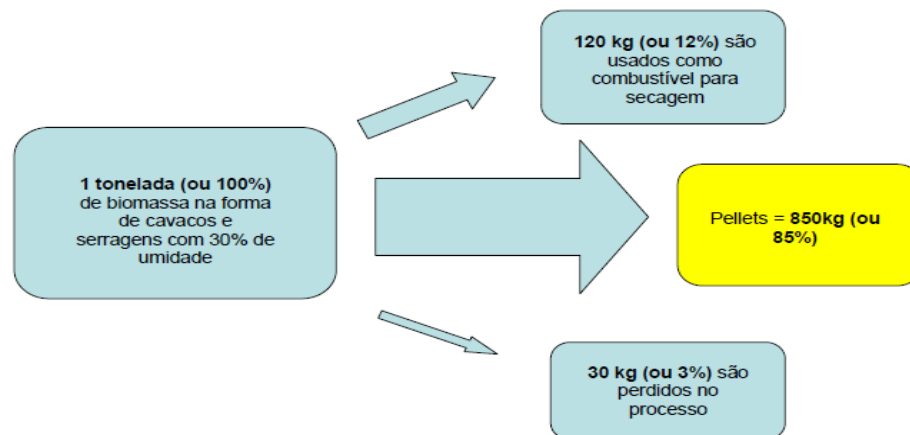


Figura 6 - Balanço de massa do processo de pelletização

Fonte: Serrano (2009)

2.2.5 Pelletização do bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço de cana-de-açúcar (Figura 7b) é o resíduo industrial da planta cana-de-açúcar (Figura 7a) utilizado pelas usinas na fabricação de açúcar e álcool.

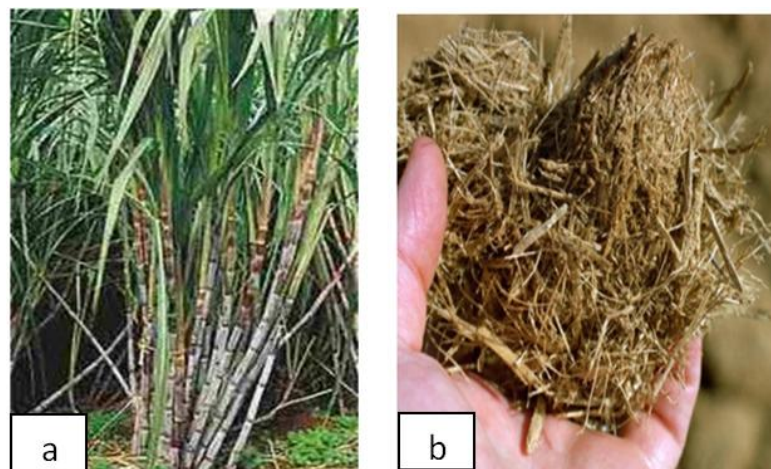


Figura 7 - Cana-de-açúcar (a) e bagaço de cana-de-açúcar (b)

Fonte: Autoria própria

Um destino que pode ser dado ao bagaço de cana-de-açúcar é a pelletização. Através deste processo, muitas vantagens podem ser agregadas ao novo produto se comparadas às matérias primas originais. Como já descrito, destacam-se o maior poder calorífico e densidade, menores custos de transporte, menores áreas requeridas e menores custos para armazenamento, menores custos para a instalação dos sistemas de energia térmica (fornalhas e caldeiras), maior facilidade de manuseio, e maior permanência das características e

propriedades do produto após estocagem (WOLF, VIDLUND e ANDERSON, 2006; CARONE, PANTALEO e PELLERANO, 2011; STAHL e BERGHEL, 2011).

O processo de pelletização do bagaço de cana-de-açúcar é similar à pelletização de outras biomassas e é caracterizado por secagem da matéria prima, moagem e pelletização.

A matéria prima (bagaço de cana-de-açúcar) se encontra normalmente com teor de umidade de 50%, quando depositada no final do processo da produção de álcool e açúcar nas usinas (ERLICH et al., 2005) e densidade aparente de 120 kg/m³ (BACCI e SANTOS, 2008).

O produto resultante do processo de pelletização desta biomassa são os *pellets* (Figura 8) de bagaço de cana-de-açúcar, que tem como principais propriedades uma densidade em torno de 1000 kg/m³ (STELTE et al., 2011) e umidade de 8% à 12% (CARONE, PANTALEO e PELLERANO, 2011).

Como principal utilização deste produto destaca-se a geração de energia térmica através do processo de combustão em grandes fornalhas e caldeiras, ou mesmo para a utilização no aquecimento de residências.



Figura 8 - *Pellets* de bagaço de cana-de-açúcar

Fonte: Autoria própria

2.3 NORMAS INTERNACIONAIS DE QUALIDADE DE *PELLET* DE BIOMASSA

A normalização de parâmetros é sempre necessária na comercialização de produtos, seja ela realizada internamente em um país ou na comercialização globalizada entre países.

Em 1995, a União Europeia estabeleceu uma legislação com uma série de parâmetros reguladores das propriedades relevantes para a comercialização de combustíveis sólidos através de CEN (Comitê Europeu de Normalização), entre elas classes, formas e propriedades físico-químicas. Em 2005, através da norma CEN/TS 14961, formalizou-se a comercialização de *pellets* de madeira.

Na Suécia, país impulsionado com a expansão do uso doméstico de queimadores movidos a *pellets* de madeira, tornou-se necessário o controle de parâmetros para se garantir a segurança operacional e o controle de emissões gerados através da queima do produto. Assim, foi criada, em 1999, a norma SS187120 para comercialização dos *pellets*, classificando-os em três subgrupos conforme seu padrão de qualidade (GARCIA, 2010).

No ano de 2000 foi publicada, na Áustria, a norma ONORM M7135 com objetivo de assegurar altos padrões de qualidade de *pellets* e ter o controle nas emissões de gases gerados pela queima dos combustíveis. Também, nesta época, foram criadas normas que controlam o produto em toda a cadeia produtiva em aspectos de transporte e armazenamento (temperatura e umidade) para se garantir a qualidade final do produto.

Na Alemanha as normas são muito rígidas em critérios de emissão de gases e concentração de elementos químicos (DIN 51731). Em 2002 foi estabelecido um selo de qualidade para as empresas que alcançassem os altos padrões de qualidade, transporte e armazenamento chamado “*DIN Plus*”, onde as empresas eram submetidas periodicamente a análises de processo e produto.

Na Tabela 5 são apresentadas as normas internacionais de qualidade para comercialização de *pellets* de biomassa e biocombustíveis sólidos mais utilizadas atualmente nos principais produtores e consumidores de *pellets* de biomassa no mundo. A norma ISO 17225-6/2014 é utilizada para *pellets* produzidos a partir de biomassas não lenhosas. Já, a norma ISO 17225-2/2014, é utilizada para *pellets* produzidos a partir de madeira. A norma EN 1496-1 é utilizada para biocombustíveis sólidos e a norma USA PFI utilizada para *pellets* produzidos a partir de biomassa. É válido ressaltar a comparação das propriedades de *pellets* produzidos através da matéria prima bagaço de cana-de-açúcar com *pellets* produzidos através de outros tipos de biomassa e outros biocombustíveis sólidos, pois estes podem vir a ser utilizados pelos mesmos consumidores e consumidos pelos mesmos tipos de equipamentos.

É notável, dentre as normas de comercialização de *pellets* de biomassa, a diferença entre faixas de aceitação e, até mesmo, a diferença entre parâmetros regulamentados pelas normas. Todas as normas estipulam faixa de aceitação para valores de diâmetro, e elas variam entre 6 mm à 12 mm. No critério comprimento todas utilizam faixas entre 3,15 mm à 40 mm. Dentre o parâmetro densidade a granel, com exceção da norma PFI/2011, todas utilizam o critério com valores acima de 600 kg/m³. O mesmo acontece com a durabilidade e o teor de finos, onde quase todas as normas partem de valores similares. No parâmetro umidade, as normas referenciam valores abaixo de 10%, sendo abaixo de 12% apenas na norma ISSO 17225-6/2014. Para o poder calorífico é exigido valores acima de 14,5 MJ/kg pela norma

ISSO 17225-6/2014 e valores acima de 16,5 MJ/kg para as outras normas. Valores de nitrogênio, enxofre e cloro são diferenciados para cada norma.

Tabela 5 - Normas de qualidade e de comercialização de biocombustíveis

Especificação	ISO 17225-6	ISO 17225-2	EN 14961-1	USA PFI Standard
Diâmetro (mm)	6 - 10	6,8,12 ±1	6,8,10 ±1	5.84 - 7.25
Comprimento (mm)	3.15 – 40	3.15 - 40	3.15-40	≤42
Densidade a granel (kg/m ³)	≥600	≥600	≥600	608.7-746.9
Durabilidade (%)	≥97.5	≥97.5 - ≤99	≥96.5	≥95.0
Umidade (%)	≤12	≤10	≤10	≤10
Poder calorífico (MJ/kg)	≥14.5	≥16.5	≥16.5	-
Teor de cinzas (%)	≤6	≤0.7	≤1.0	≤2.0
Finos (%)	≤2	≤1	≤1.0	≤1.0
Nitrogenio, N (%)	≤1.5	≤0.3	≤0.5%	-
Enxofre, S (%)	≤0.2	≤0.04	≤0.05%	-
Cloro, Cl (%)	≤0.1	≤0.02	≤0.3%	<300ppm

Fonte: Autoria própria

No Brasil ainda não há uma norma regulamentadora para comercialização de *pellets* de biomassa.

Densidade a granel é definida pela razão entre a massa e o volume no empacotamento livre ou sem compactação (THEERARATTANANOON et al., 2011). Esta medida é utilizada para carregamentos a granel e no cálculo do peso de cargas, como por exemplo, no peso de uma massa determinada ao ocupar o volume de uma carroceria de caminhão. Nestes casos consideram-se, no volume total, os espaços vazios de empacotamento existentes entre partículas do material. Já, na densidade da partícula, é considerada a massa de uma determinada partícula pelo volume real ocupado por ela. Esta é uma propriedade importante para se medir a eficiência do processo de pelletização, já que se espera o aumento significativo da densidade depois da compactação.

Pode-se dizer que a umidade dos *pellets* é um dos fatores mais estudados em processo de pelletização. Vários são os trabalhos que dão destaque para esta propriedade e suas implicações. Em sua definição, umidade é o percentual de água existente em peso no material (STAHL et al., 2004). Em casos de elevadas umidades, acima do especificado em produção

de *pellets* de biomassa, alguns impactos são altamente negativos, como a diminuição da durabilidade e consequente diminuição do tempo de estocagem (CARASCHI, PINHEIRO e VENTORIM, 2012). Além disso, com um valor elevado de umidade aparecem dificuldades para lograr a ignição necessária da biomassa nas fornalhas do sistema de secagem. Outro aspecto importante, levando agora em consideração o valor de compra dos *pellets*, é a alteração do peso, pois com o aumento de umidade se tem mais massa de água por unidade de massa do produto, acarretando perdas para o consumidor.

A durabilidade é um fator físico fundamental na caracterização de *pellets* de biomassa. A durabilidade se caracteriza pela propriedade dos *pellets* de não se dissolver em finos ou pó, ambas as características indesejadas. Finos e pó são prejudiciais à saúde humana caso sejam inalados e podem proporcionar risco de explosão e incêndio se estiverem em concentração acima dos permitidos pelas legislações internacionais. A durabilidade dos *pellets* é definida pela razão entre o peso dos *pellets*, menos o peso de finos e pó, pelo peso total da amostra. Este resultado é apresentado em percentual, que é medido após aplicação do teste de durabilidade. O teste de durabilidade consiste em colocar uma amostra de *pellets* em uma caixa acoplada a um motor com rotação constante por um determinado período. Após as rotações é realizado o peneiramento da amostra e o seu peso é comparado com a amostra inicial, determinando-se a quantidade de finos gerada (TEMMERMAN et al., 2006).

Poder calorífico é o parâmetro que define a quantidade de energia térmica a ser liberada pelo combustível por unidade de massa (MJ/kg). Esta representa uma propriedade competitiva do processo de pelletização de biomassa, uma vez que se obtém um aumento significativo no seu poder calorífico. O poder calorífico de biomassas lignocelulósicas é influenciado pela umidade, lignina e extrativos através de sua composição química. Cerca da energia liberada na combustão é utilizada na vaporização de água. Assim, com a secagem da matéria prima, mais energia ficará disponível para o processo de aquecimento. Pode-se obter o poder calorífico em base seca e o poder calorífico em base úmida (GARCIA, 2010).

O poder calorífico superior (PCS) é medido em uma bomba calorimétrica, onde a energia térmica de uma amostra de combustível é liberada em um recipiente previamente pressurizado com oxigênio, permitindo também a condensação da água gerada durante o processo de queima. Já, o poder calorífico inferior (PCI), é obtido ao descontar a energia gasta para a evaporação da água formada durante o processo de queima (GARCIA, 2010).

Altos teores de cinzas são indesejados na queima de biomassas. O teor de cinzas corresponde à fração mássica dos resíduos restantes após a queima, formados por minerais presentes na biomassa durante o ciclo de vida da matéria viva, ou mesmo, oriundos de

processo prévio ou da própria colheita. Normalmente, nas cinzas são encontrados Cobre, Cálcio, Ferro, Magnésio, Potássio, e Sódio (BRAND, 2007). A presença destes elementos diminui o poder calorífico da biomassa, pois quanto maior a sua quantidade, menor o percentual de material combustível disponível para ser queimado. Outra consequência indesejada é a corrosão de equipamentos, diminuindo a vida útil dos mesmos, bem como, o problema que pode ser gerado na hora do descarte das cinzas visando a preservação do meio ambiente (RICHARDSON et al., 2002).

As emissões a serem destacadas na combustão dos *pellets* de biomassa são os óxidos de nitrogênio (NO_x), as dibenzo-dioxinas policloradas (PCCD), ácido clorídrico (HCl) e cinzas em suspensão, é em alguns casos, os óxidos de enxofre (SO_x). Nestas situações, as emissões estão relacionadas diretamente às concentrações de N, S e Cl presentes na biomassa (RASGA, 2013).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os métodos e os procedimentos necessários para o cumprimento dos objetivos do presente trabalho.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA MATERIA PRIMA E DOS *PELLETS*

A seguir descrevem-se as propriedades de interesse referentes ao bagaço de cana-de-açúcar e a seu respectivo pellet.

3.1.1 Propriedades da matéria prima

Neste trabalho, as propriedades que permitiram a caracterização da matéria prima antes do processo de pelletização foram: densidade a granel, umidade e diâmetro médio de partícula. A seguir descreve-se a metodologia empregada para o cálculo destas propriedades.

3.1.1.1 Densidade a granel

Para medir a densidade a granel da matéria prima foi considerada a massa existente em um *container* com volume de 45,6 m³. A densidade foi obtida pela razão entre a massa e o volume ocupado. Foram realizadas 30 medições.

A densidade a granel do bagaço de cana-de-açúcar seco (retirando amostra após o secador) e do bagaço de cana-de-açúcar moído (retirando amostra após o moinho) foi calculada utilizando a massa do bagaço de cana-de-açúcar seco e moído depositado em uma caixa dividido pelo seu volume (0,0497 m³), sendo consideradas 30 amostras. Nas medições foi utilizada uma balança digital com faixa de medição de 0 a 15 kg, com precisão de 0,01 kg.

3.1.1.2 Umidade

A umidade do bagaço de cana-de-açúcar foi medida utilizando um analisador infravermelho da marca Gehaka, modelo IV2000, com o qual se pode determinar o teor de umidade no intervalo de 0% a 100%. Para a medição de umidade do bagaço de cana-de-açúcar no início do processo e do bagaço de cana-de-açúcar seco (amostra retirada após o processo de secagem), cerca de 8 g da biomassa foram colocadas sobre o prato de amostra descartável. O tempo de secagem foi de 20 minutos para cada amostra. Para ambos os casos, foram realizadas 50 medições.

3.1.1.3 Diâmetro médio do bagaço de cana-de-açúcar moído

Para determinar o diâmetro médio do bagaço de cana-de-açúcar moído, foi utilizado o método de peneiramento proposto por Howard (1989). Neste método, um conjunto de peneiras dispostas verticalmente com diferentes tamanhos de abertura de malha (maior abertura acima e menor abaixo) é utilizado para conhecer a distribuição mássica de uma amostra composta por partículas, estabelecida após aplicação de movimento vibratório do conjunto de peneiras num período de tempo.

Nos testes, aproximadamente 40 g de amostra de bagaço de cana de açúcar moído foram depositadas na peneira superior e com maior diâmetro de abertura de malha. O movimento vibratório nas peneiras foi imposto durante 5 minutos, permitindo a classificação das partículas nas peneiras com diâmetros inferiores (Figura 9). Após o peneiramento, pesa-se a massa contida em cada peneira para o cálculo do diâmetro médio das partículas. Os equipamentos utilizados para as medições foram uma balança BG2000 SOLDTEST da marca Gehaka, com faixa de medição de 0 a 2000 g, e 0,01 g de precisão, e uma bancada vibratória para peneiras da marca Vibrotech, modelo CT025. Foram realizadas três medições.

Para o cálculo do diâmetro médio utiliza-se a abertura média entre peneiras, d_i , a massa retida em cada peneira, M_{pi} , e a massa total da amostra (somatório da massa retida em cada peneira), $\sum M_{pi}$. Utiliza-se também, a divisão da massa obtida em cada peneira pela massa total $X_i = \frac{M_{pi}}{\sum M_{pi}}$, e o somatório das razões entre X_i e d_i , $\sum (\frac{X_i}{d_i})$, obtendo como diâmetro médio o valor inverso desta quantidade, ou seja $1 / (\frac{X_i}{d_i})$ (Tabela 6). As peneiras utilizadas foram as de 4000, 2000, 850, 425 e 212 μm de diâmetro de abertura, mais o prato cego ou de fundo.

Tabela 6 - Diâmetro médio do bagaço de cana-de-açúcar moído

Abertura da peneira	d_i	M_{pi}	X_i	X_i/d_i	Diâmetro médio
4000	8000	6000	M_{p1}	X_1	X_1/d_1
2000	4000	3000	M_{p2}	X_2	X_2/d_2
850	2000	1425	M_{p3}	X_3	X_3/d_3
425	850	637,5	M_{p4}	X_4	X_4/d_4
212	425	318,5	M_{p5}	X_5	X_5/d_5
0	212	106	M_{p6}	X_6	X_6/d_6
			$\sum M_{pi}$	$\sum (\frac{X_i}{d_i})$	$1 / (\frac{X_i}{d_i})$

Fonte: Autoria própria

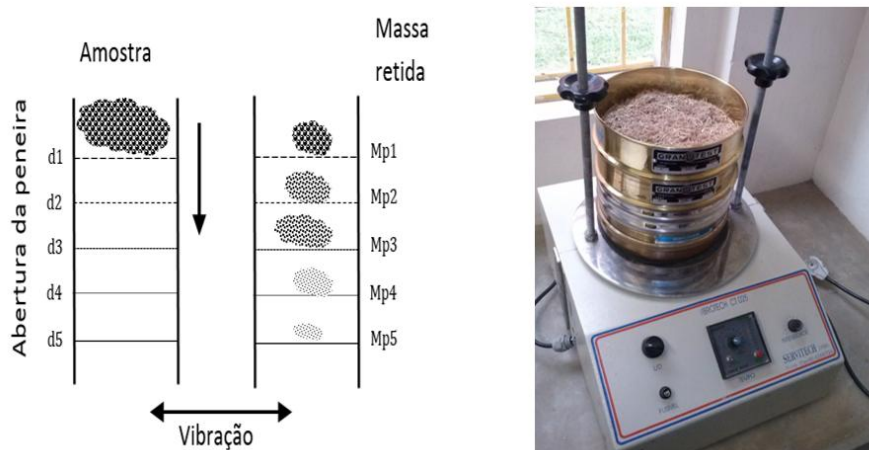


Figura 9 - Teste de peneiramento

Fonte: Autoria própria

3.1.2 Propriedades dos *pellets*

As propriedades dos *pellets* analisadas neste trabalho foram divididas em três categorias: físicas, mecânicas e químicas. No primeiro grupo, foi determinado o diâmetro, o comprimento, a densidade a granel, a densidade das partículas e a umidade. A segunda categoria de propriedades consideradas inclui a durabilidade e o teor de finos. No grupo das propriedades químicas foram incluídos o poder calorífico, o material volátil, carbono fixo, as cinzas, o nitrogênio, o enxofre e o cloro. Para as propriedades físicas, o erro padrão foi calculado com 95% de confiança, observando um mínimo de 30 elementos nas experiências, de modo a caracterizar uma distribuição normal. Para outras propriedades, a distribuição t de Student foi aplicado com o mesmo nível de confiança.

3.1.2.1 Umidade

Para determinar a umidade dos *pellets* foi utilizado o analisador infravermelho da marca Gehaka, modelo IV2000. Nas medições de umidade, cerca de 8 g da substância foram colocadas dispersas sobre o prato de amostra descartável, salientando que foi necessário o esmagamento dos *pellets*, transformando-o em pó para a medição. Observou-se um tempo de 20 minutos, até ao final do processo de medição. Foram realizadas 50 medições.

3.1.2.2 Densidade a granel e da partícula

A densidade a granel dos *pellets* foi determinada de acordo com a norma EN 15103/2005 que se aplica a biocombustíveis sólidos. Para os testes foi utilizado um recipiente

cilíndrico com volume de 5 litros ($0,005\text{m}^3$) com relação entre a altura e diâmetros de 1,38. Os testes foram replicados três vezes (Figura 10).



Figura 10 - Teste da densidade a granel dos *pellets*

Fonte: Autoria própria

Para a determinação da densidade dos *pellets* foi utilizado um paquímetro como instrumento para medir as dimensões dos *pellets* (comprimento e diâmetro), o peso foi obtido em uma balança digital com faixa de medição de 0 kg a 10 kg e 0,001 kg de precisão. A densidade foi obtida pela razão entre a massa e volume. A amostra utilizada aleatoriamente foi de 50 *pellets*.

3.1.2.3 Diâmetro e comprimento dos *pellets*

O diâmetro dos *pellets* é imposto pela ferramenta da matriz de pelletização. Tendo em vista a expansão sofrida após este processo ou mesmo pelo desgaste da ferramenta, as variações de diâmetros dos *pellets* podem ocorrer. Por esse motivo foram efetuadas 50 medições do diâmetro e do comprimento do *pellet* utilizando um paquímetro (Figura 11).

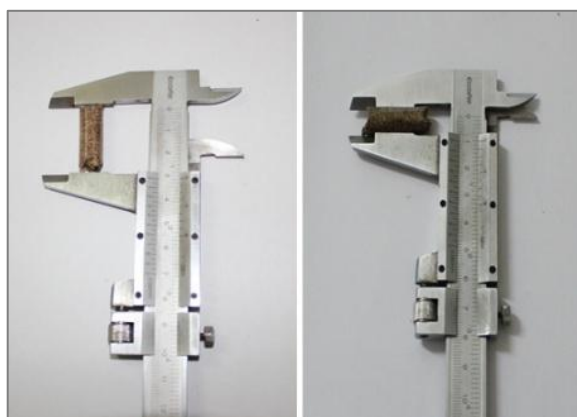


Figura 11 - Medição do comprimento e diâmetro dos *pellets*

Fonte: Autoria própria

3.1.2.4 Durabilidade

A durabilidade é uma característica fundamental dos *pellets*, e depende principalmente da taxa de compressão definida entre a razão diâmetro e comprimento do furo da matriz de pelletização ($taxa = D/L$) e da temperatura alcançada durante o processo (LEE et al., 2013).

Neste trabalho o teste de durabilidade foi realizado de acordo com a norma EN 15210-1/2005 que consiste em colocar 500g do produto dentro de uma caixa com dimensões de 300 mm x 300 mm x 125 mm em uma rotação de 50 rpm, completando 500 rotações (Figura 12). Posteriormente são separados os finos através da passagem do material por uma peneira com abertura de malha de 3,15 mm. (TEMMERMAN et al., 2006). Os testes foram replicados três vezes.

A durabilidade mecânica foi calculada dividindo-se a massa dos *pellets* peneirada depois do ensaio, separando a quantidade de finos, e dividindo pela massa total de *pellets* antes do ensaio. E a quantidade de finos foi calculada pela razão entre a massa de finos peneirada pela massa total de *pellets* antes do ensaio. Ambos dados são apresentados em termos percentuais.



Figura 12 - Dispositivo utilizado para teste de durabilidade dos *pellets*

Fonte: Autoria própria

3.1.2.5 Poder calorífico

O valor do poder calorífico superior foi medido em conformidade com a norma brasileira NBR 8633/1984, prescreve o método para a determinação do valor calorífico de carvão em volume constante. A fim de determinar esta propriedade, uma amostra de grânulos foi esmagado e em seguida secou-se num forno a 100 ° C. Depois de arrefecida, o valor calorífico (MJ/kg) foi medido utilizando um calorímetro modelo IKA C-5000, com

reprodutibilidade de desvio padrão de 0,05% - 0,1% . As medidas foram replicadas duas vezes.

3.1.2.6 Teor de cinzas, material volátil e elementos químicos (N, S, Cl).

O teor de cinzas, material volátil e carbono fixo foram avaliados de acordo com a norma brasileira NBR 8112/1986 para o carvão vegetal. Para a determinação do material volátil, uma amostra de biomassa previamente seca foi colocada em um forno elétrico, à temperatura de 900 ° C e, em seguida, a massa foi registrada antes e depois do procedimento. A fim de determinar o teor de cinzas, uma amostra de material foi colocada num forno elétrico, à temperatura de 700 ° C até que fosse completamente queimada e, em seguida, a massa foi registrada antes e depois do procedimento. O percentual de carbono fixo foi calculado pela diferença entre 100% inicial e a soma da umidade, do material volátil e do teor de cinzas. As medições foram replicadas três vezes.

A determinação de nitrogênio, enxofre e cloro, foram realizadas em conformidade com as seguintes normas, respectivamente: EPA 5050 e 4500NO3 E; EPA 5050 e 4500 SO42-E; EPA 5050 e 4500Cl L.

3.2 BALANÇO DE MASSA

O intervalo de tempo considerado nas análises para mensurar o fluxo dos materiais, bem como as energias envolvidas e os custos de produção no processo analisado foi de uma hora de produção com todo o sistema em condição estável.

Foi considerada como consumo de matéria prima do processo (M_b), a massa em kg de bagaço de cana-de-açúcar consumida pelo sistema em uma hora. Para o cálculo do consumo de *pellets* queimado na fornalha (M_{pf}), foi considerada a massa em kg de *pellets* alimentados na fornalha em uma hora de produção. O mesmo procedimento foi adotado para a massa em kg de *pellets* produzida em uma hora de produção (M_{pp}).

3.3 ENERGIAS ENVOLVIDAS NO PROCESSO

Para obtenção do valor da energia térmica equivalente nas fases do processo medidas, em MJ, foi considerada, a energia presente na massa de bagaço de cana-de-açúcar alimentada no sistema (E_{tb}), a energia presente na massa de *pellets* queimado na fornalha e a energia presente na massa de *pellets* produzido no intervalo de uma hora de produção, obtidas através da multiplicação da massa pelo poder calorífico correspondente:

$$\text{Equação (1)} \quad E_{tb} = M_b * PCS_b$$

$$\text{Equação (2)} \quad E_{tpf} = M_{pf} * PCS_p$$

$$\text{Equação (3)} \quad E_{tpp} = M_{pp} * PCS_p$$

- onde, E_{tb} é a energia térmica equivalente do bagaço, M_b é a massa de bagaço, PCS_b é o poder calorífico do bagaço, E_{tpf} é a energia térmica dos pellets queimados na fornalha para o sistema de secagem, M_{pf} é a massa de *pellets* queimado na fornalha, PCS_p é o poder calorífico do *pellet*, E_{tpp} é a energia térmica do *pellet* produzido e M_{pp} é a massa de *pellets* produzido.

Para a obtenção da energia elétrica gasta no intervalo de uma hora de produção foi considerado o somatório da energia gasta por cada motor elétrico:

$$\text{Equação (4)} \quad E_{el} = E_{elm1} + E_{elm2} + E_{elm3} + \dots$$

- onde, E_{el} é a energia elétrica consumida pelos motores elétricos, E_{elm1} é a energia elétrica consumida por cada motor ($m_1, m_2, m_3 + \dots$).

Os motores foram ligados a fonte de 380 V em três fases e as medições de corrente elétrica foram realizadas separadamente para cada uma das três fases considerando a média aritmética entre elas (GARCIA, 2003; CHIOVATTO, 2011). Foram realizadas 3 medições para cada motor e para cada fase durante uma hora de produção. O instrumento de medição de corrente elétrica foi um alicate amperímetro digital da marca MIMIPA, modelo ET-3367 com precisão de medição de $\pm 1,5 \% + 5 D$.

$$\begin{aligned} \text{Equação (5)} \quad I_{m1} &= \left[\frac{(I_{f1}+I_{f2}+I_{f3})}{3} \right] + \left[\frac{(I_{f1}+I_{f2}+I_{f3})}{3} \right] + \left[\frac{(I_{f1}+I_{f2}+I_{f3})}{3} \right] \\ I_{m2} &= \left[\frac{(I_{f1}+I_{f2}+I_{f3})}{3} \right] + \left[\frac{(I_{f1}+I_{f2}+I_{f3})}{3} \right] + \left[\frac{(I_{f1}+I_{f2}+I_{f3})}{3} \right] \\ I_{m \dots} &= \left[\frac{(I_{f1}+I_{f2}+I_{f3})}{3} \right] + \left[\frac{(I_{f1}+I_{f2}+I_{f3})}{3} \right] + \left[\frac{(I_{f1}+I_{f2}+I_{f3})}{3} \right] \end{aligned}$$

- onde, I_m é a corrente elétrica em cada motor ($I_{m1}, I_{m2} \dots$), I_{f1} é a medição da corrente da fase 1, I_{f2} é a medição da corrente da fase 2, I_{f3} é a medição da corrente da fase 3, medidas três vezes.

Em seguida foi aplicada a equação do cálculo da potência elétrica determinada pelo produto entre voltagem, corrente elétrica e fator de potência. A voltagem da rede considerada

foi de 380 V. O fator de potência foi retirado dos dados dos motores elétricos fornecidos pelo fabricante:

$$\begin{aligned} \text{Equação (6)} \quad P_{m1} &= \sqrt{3} * U * I_{m1} * \cos\phi_1 \\ P_{m2} &= \sqrt{3} * U * I_{m2} * \cos\phi_2 \\ P_{m \dots} &= \sqrt{3} * U * I_{m \dots} * \cos\phi \dots \end{aligned}$$

- onde, P_m é a potência elétrica de cada motor (P_{m1} , P_{m2} , ...), U tensão da fonte, I_m é a corrente elétrica em cada motor (I_{m1} , I_{m2} ...), e $\cos\phi \dots$ é o fator de potência de cada motor ($\cos\phi_1$, $\cos\phi_2$, ...).

Com os valores da potência calculados, foi aplicada a fórmula da energia elétrica para uma hora de produção

$$\begin{aligned} \text{Equação (7)} \quad E_{el1} &= P_{m1} * \Delta t \\ E_{el2} &= P_{m2} * \Delta t \\ E_{el \dots} &= P_{m \dots} * \Delta t \end{aligned}$$

- onde, E_{el} é a energia elétrica consumidas pelos motores elétricos, P_m é a potência elétrica de cada motor e Δt é o intervalo de tempo.

$$\text{Equação (4)} \quad E_{el} = E_{elm1} + E_{elm2} + E_{elm3} + \dots$$

- onde, E_{el} é a energia elétrica consumida pelos motores elétricos, E_{elm1} é a energia elétrica consumida por cada motor ($m1$, $m2$, $m3 + \dots$).

3.4 CUSTOS ENVOLVIDOS

Para o custo da matéria prima bagaço de cana-de-açúcar (C_b) foi considerado um valor de compra de R\$ 50,00 por tonelada, informado pela empresa onde o estudo foi realizado. Para a obtenção do valor total de compra de matéria prima foi considerado o valor de cada tonelada multiplicada pela quantidade utilizada em uma hora de produção. O custo da energia elétrica a ser considerado foi o informado no endereço eletrônico da fornecedora da energia elétrica. A tarifa considerada foi de R\$0,21449/kWh ou R\$0,0595/MJ (C_{el}) (COPEL, 2014). O preço estimado de venda de *pellets* (C_p) por tonelada a ser considerado foi de R\$520,00, informada pela empresa onde o estudo foi realizado.

Para o cálculo do valor em R\$ do bagaço de cana-de-açúcar (V_b), e *pellets* produzido (V_{pp}) em uma hora de produção foi considerado a massa medida em uma hora de produção (em kg) vezes o valor em R\$ de cada parâmetro (C_b e C_p). O valor equivalente dos *pellets* gasto na fornalha foi estabelecido como valor da energia térmica gasta na secagem (V_{et}) calculado como sendo a massa de *pellets* queimada na fornalha vezes o valor em R\$ dos *pellets* produzido.

$$\text{Equação (8)} \quad V_b = M_b * C_b$$

$$\text{Equação (9)} \quad V_{pp} = M_{pp} * C_p$$

$$\text{Equação (10)} \quad V_{et} = M_{pf} * C_p$$

$$\text{Equação (11)} \quad V_{el} = (E_{elm1} + E_{elm2} + E_{elm3} + \dots) * C_{el}$$

- onde, V_b é o valor do bagaço, M_b é a massa de bagaço, C_b custo do bagaço, V_{pp} é o valor do pellets produzido bagaço, M_{pp} é a massa de pellets produzido, C_p é o preço de vendas do pellets, V_{et} é o valor da energia térmica consumida, M_{pf} é a massa de pellet queimado na fornalha, V_{el} é o valor da energia elétrica consumida, E_{elm1} é a energia elétrica consumida por cada motor e C_{el} é o custo da energia elétrica.

3.5 CONSUMO DE ENERGIA E CUSTOS EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE UMIDADE

Foram realizadas 35 medições no processo de pelletização com o objetivo de conhecer a variação do consumo de energia gasta na fornalha durante o processo de secagem em função da variação da umidade de entrada da matéria prima. Os testes foram realizados com um volume de produção de 2.000 kg de *pellets* por hora (produto final), e foi considerado uma hora de produção. Na primeira leitura foi fixado a umidade de saída do secador do bagaço de cana-de-açúcar em 11%, valor indicado para pelletização de biomassa (CARONE, PANTALEO e PELLERANO, 2011) e foi variado a umidade de entrada da matéria prima. Foram lidas no processo a temperatura interna da fornalha e o consumo de *pellets* alimentado na fornalha. Com essas leituras foi obtida uma função do consumo de *pellets* na fornalha em função da variação da umidade da matéria prima para a produção de 2.000 kg de *pellets* por hora.

Outra leitura realizada no processo foi a de corrente elétrica de trabalho do moinho em função da variação da umidade do bagaço de cana-de-açúcar a ser moído para uma produção de 2.000 kg de *pellets* por hora. Com os dados foi encontrada uma função da corrente de

trabalho do moinho em função da variação de umidade de entrada do bagaço de cana-de-açúcar seco. Foram realizadas 39 medições.

Adicionalmente, foram realizadas também medições da corrente elétrica de trabalho da pelletizadora em função do volume de produção. Foram analisadas 20 medições.

4 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

4.1 A EMPRESA ESTUDADA

O presente trabalho foi desenvolvido em uma indústria de capital fechado situada na região sul do Brasil. A empresa foi criada no ano de 2009 com o objetivo de transformar o bagaço de cana-de-açúcar em *pellets*, através de um processo de fabricação inovador para os padrões brasileiros de produção de *pellets* de biomassa. A capacidade instalada até o momento é de 14400 toneladas ano de *pellets*, com previsão de quadruplicar a produção em um médio prazo.

A matéria prima utilizada no processo é bagaço de cana-de-açúcar oriunda de usinas de álcool e açúcar da região, situadas em um raio de no máximo 80 km de distância da unidade produtora. Todo o bagaço de cana-de-açúcar utilizado no estudo foi da safra de 2013, não foi utilizado bagaço de cana-de-açúcar com tempo de estocagem superior a seis meses.

4.2 O PROCESSO DE PELLETIZAÇÃO

O processo de pelletização é caracterizado por secagem, moagem e pelletização, como ilustrado na Figura 13.

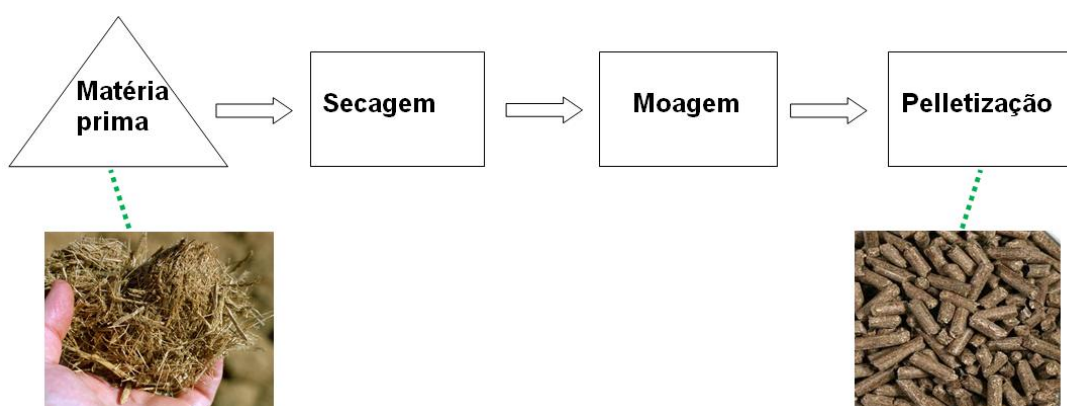


Figura 13 - Processo de pelletização

Fonte: Autoria própria

4.2.1 Secagem

O processo se inicia com a introdução de bagaço de cana-de-açúcar em uma moega de recebimento, que através de transportadores helicoidais e esteiras, transportam o bagaço de cana-de-açúcar para o secado rotativo para o processo de secagem.

O processo de secagem é realizado pelo contato do bagaço de cana-de-açúcar que se encontra à temperatura ambiente com o ar previamente aquecido pela fornalha, retirando assim uma quantidade de água do produto, diminuindo a sua umidade.

O aquecimento do ar é feito em uma fornalha e o contato do ar quente com o produto é feito em um secador rotativo através da rotação do secador e pela exaustão de ar.

Segue um fluxograma do sistema de secagem do bagaço de cana-de-açúcar na Figura 14.

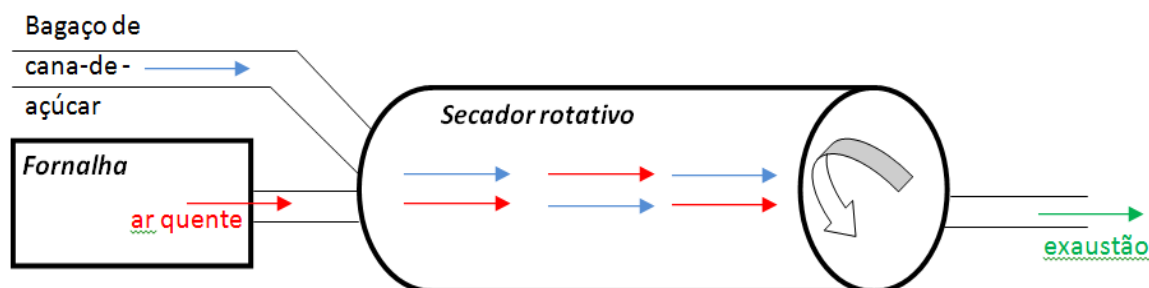


Figura 14 - Sistema de secagem

Fonte: Autoria própria

4.2.1.1 Fornalha

O calor para a secagem é fornecido por uma fornalha alimentada com *pellets* (Figura 15b). O combustível fica em combustão em uma câmara termicamente isolada, conduzidos internamente por grelhas movimentadoras. A ventilação dentro da câmara de combustão é forçada por meio de ventiladores e exaustão. A temperatura de trabalho para o ar aquecido na entrada do secador é em torno de 350° durante o processo de secagem, segundo o fabricante.

Capacidade nominal da fornalha segundo fabricante: 14.654 MJ/h.

Temperatura dentro da câmara da fornalha: de 300 °C à 750 °C.

Combustível utilizado: *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar.

4.2.1.2 Secador rotativo

O objetivo do secador rotativo é retirar água do produto que nele se encontra, diminuindo assim a sua umidade. O secador rotativo é um cilindro metálico composto internamente por aletas com ângulos direcionadas para frente para empurrar o produto quando em rotação. A movimentação do produto se deve ao direcionamento dado pelas aletas e também pela exaustão do ar aquecido dentro do secador através de um exaustor (SILVA, 2011). Na secagem do bagaço de cana-de-açúcar do estudo foi utilizado um secador rotativo (STAHL et al., 2004) de 14 m de comprimento por 2,5 m de diâmetro da marca SCHIFFL (Figura 15a), no qual a troca térmica se dá por convecção.

A capacidade nominal do secador rotativo, segundo o fabricante, é de 3.000,00 kg água/hora.

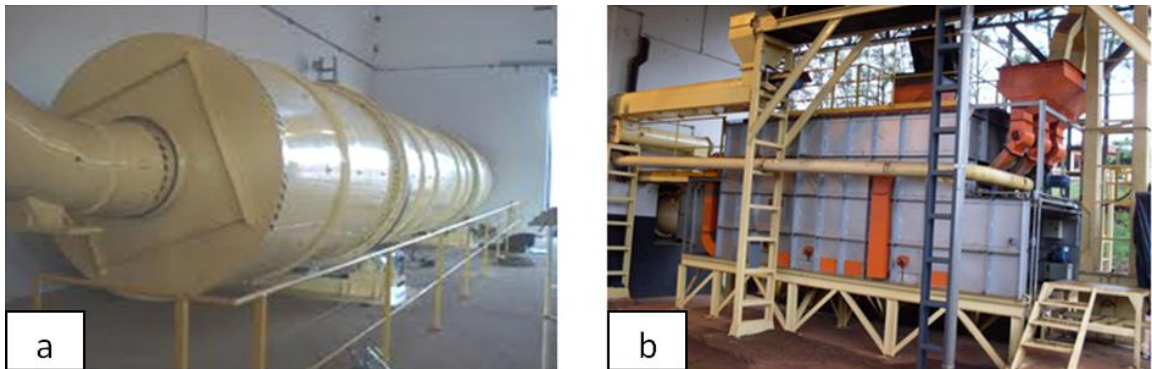


Figura 15 - Secador rotativo (a) e fornalha (b)

Fonte: Autoria própria

4.2.1.3 Ciclone separador e exaustor

Um ciclone separador é utilizado para separar os gases na saída do secador com o bagaço de cana-de-açúcar em suspensão. Na unidade, a separação é feita por dois ciclones em paralelo (Figura 16a).

A exaustão do ar aquecido, acontece após a passagem pelos ciclones e secador (Figura 16b).

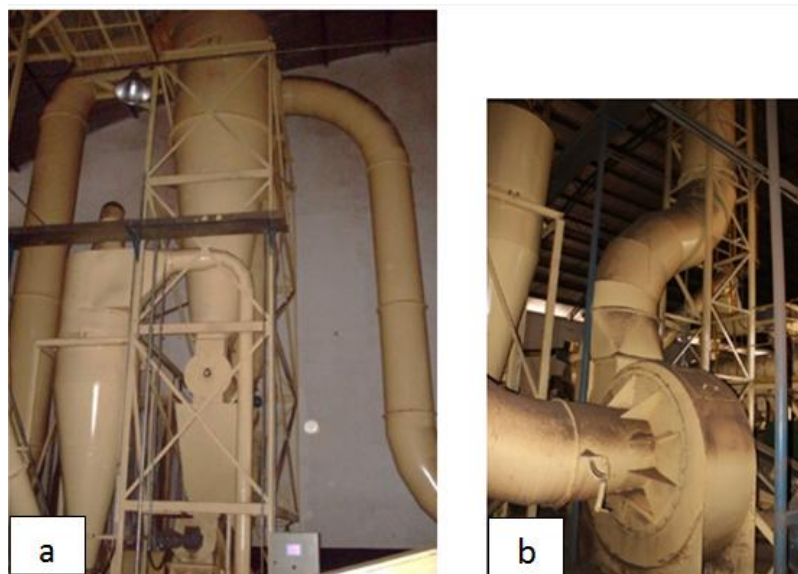


Figura 16 - Ciclones (a) e exaustor (b)

Fonte: Autoria própria

Em todo o processo que inclui a fornalha, secador, ciclone, exaustor e todos os mecanismos transportadores, existem motores elétricos para a operação dos equipamentos. Segue a descrição da quantidade e da potência nominal: 1 motor de 0,75 kW (transportador),

1 motor de 11 kW (transportador), 3 motores de 1,5 kW (transportador), 1 motor de 2,2 kW (transportador), 1 motor de 2,2 kW (movimentador da grelha da fornalha), 2 motores de 2,2 kW (ventiladores da fornalha), 1 motor de 0,75 kW (removedor de cinzas da fornalha), 1 motor de 11 kW (secador rotativo), 1 motor de 90 kW (exaustor), 2 motores de 2,2 kW (válvulas rotativas). Totalizando 142,3 kW de potência nominal.

4.2.2 Moagem

O processo de moagem do bagaço de cana é realizado mediante um moinho de martelo. No moinho, acontece a quebra das fibras do bagaço de cana-de-açúcar reduzindo a granulometria do produto até o nível desejado. Quanto mais seco, a matéria prima, mais fácil é a moagem.

O moinho de martelo é um equipamento formado por uma câmara onde os martelos de metal ficam girando em alta rotação a fim de reduzir o tamanho do bagaço de cana-de-açúcar. O produto fica no equipamento até se obter uma granulometria desejada, controlada com base no tamanho dos furos da peneira. A saída do produto da câmara de moagem se dá através do movimento giratório dos martelos e da exaustão gerada por um ventilador que fica acionado pelo eixo principal do moinho (GIL et al., 2012).

O equipamento utilizado é um moinho de martelo da marca GVE modelo 55 AV (Figura 17a), movido por um motor elétrico de 45 kW, operando a 3.200 rpm. O moinho usa uma peneira com furo de 12 mm de diâmetro. A capacidade nominal do moinho, segundo fabricante é de 3.000 kg/hora de bagaço de cana-de-açúcar seco.

Os motores elétricos envolvidos no processo são: 1 motor de 45 kW (moinho), 2 motores de 3,7 kW (transportadores). Totalizando 52,4 kW de potência nominal. Totalizando 52,4 kW de potência nominal.

4.2.3 pelletização

Na pelletização, o bagaço de cana-de-açúcar é forçado através de rolos a passar por uma matriz que está em rotação por esforço mecânico. Na passagem por uma matriz com orifícios circulares de 9 mm de diâmetro, o produto fica com uma forma final cilíndrica (LI et al., 2012).

Destaca-se, como principais pré-requisitos de entrada neste processo, o controle de umidade, que deve estar em torno de 15%, e o controle de granulometria do produto, que afeta diretamente a qualidade e aparência dos *pellets* final. Adicionalmente, controla-se a taxa de

compressão, determinada pela área de compressão e o diâmetro final dos *pellets*, conforme a matriz de pelletização (RASGA, 2013).

A pelletização foi realizada em uma pelletizadora da marca Pelmec (Figura 17b), modelo 7000, com rotação do motor de 1.190 rpm e 300 CV de potência, diâmetro externo da matriz de 740 mm, diâmetro interno da matriz 578 mm, com 2.044 furos de 9,54 mm de diâmetro cada. A Figura 18 ilustra uma vista de corte mostrando o perfil do furo da matriz com dimensões para a taxa de compressão. A capacidade nominal da pelletizadora segundo fabricante é de 3.500 kg de *pellets*/hora.

Os motores envolvidos no processo são: 1 motor de 15 kW (transportador), 1 motores de 220 kW (pelletizadora). Totalizando 235 kW de potência nominal.

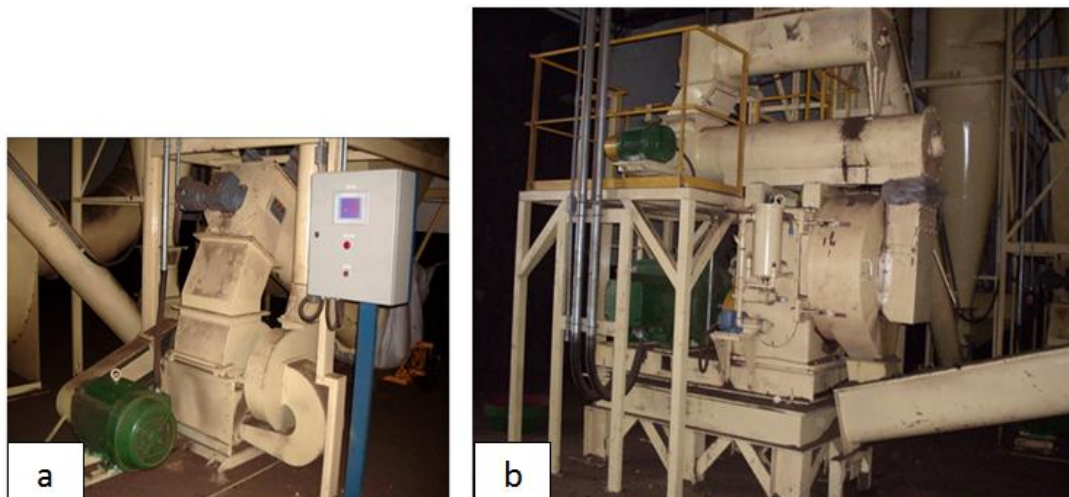


Figura 17 - Moinho de martelo (a) e pelletizadora (b)

Fonte: Autoria própria

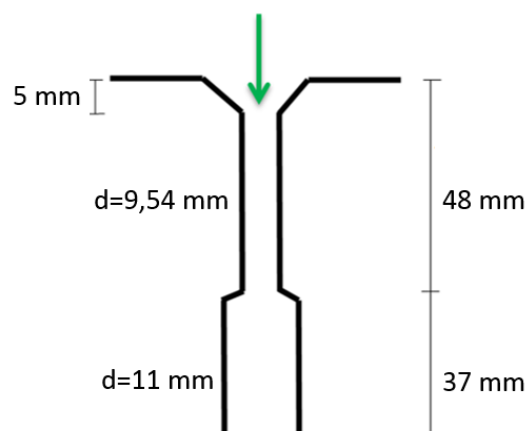


Figura 18 - Perfil da matriz de pelletização

Fonte: Autoria própria

A Figura 19 ilustra a aparência da matéria prima em cada etapa do processo, bem como do produto final.



Figura 19 - Matéria prima e pellets

Fonte: Autoria própria

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos na pesquisa, bem como a discussão destes em relação aos dados encontrados na literatura.

5.1 MEDIÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E QUÍMICAS

O valor encontrado no teste de peneiramento para o diâmetro médio do bagaço de cana-de-açúcar moído foi de 726 μm com desvio padrão de 94.

Na Tabela 7 são apresentados os resultados das medições das propriedades umidade, densidade e comprimento das partículas em cada etapa do processo.

Tabela 7 - Propriedades físicas e mecânicas do bagaço de cana-de-açúcar e dos *pellets*

	Amostra	Média	Menor valor	Maior valor	Desvio padrão
Umidade, em % água					
Bag. cana-de-açúcar	50	53,41	51,40	55,60	1,12
Bag. cana-de-açúcar seco	50	10,05	7,3	11,5	0,88
<i>Pellets</i>	50	6,84	5,90	8,00	0,49
Densidade a granel, em kg/m³					
Bag. cana-de-açúcar	30	209,55	192,39	231,58	10,11
Bag. cana-de-açúcar seco	30	130,33	121,03	138,96	5,32
Bag. cana-de-açúcar moído	30	189,96	175,23	204,20	7,21
<i>Pellets</i>	3	726,32	725,80	727,00	0,616
Comprimento das fibras, em mm					
<i>Pellets</i>	50	22,70	11,00	33,00	4,94

Fonte: Autoria própria

No Gráfico 4 são apresentados a evolução dos valores encontrados das propriedades umidade e densidade considerando a sua variação em percentual, tendo como base as condições de entrada da matéria prima (0%), passando pelo processo de secagem, moagem e pelletização.

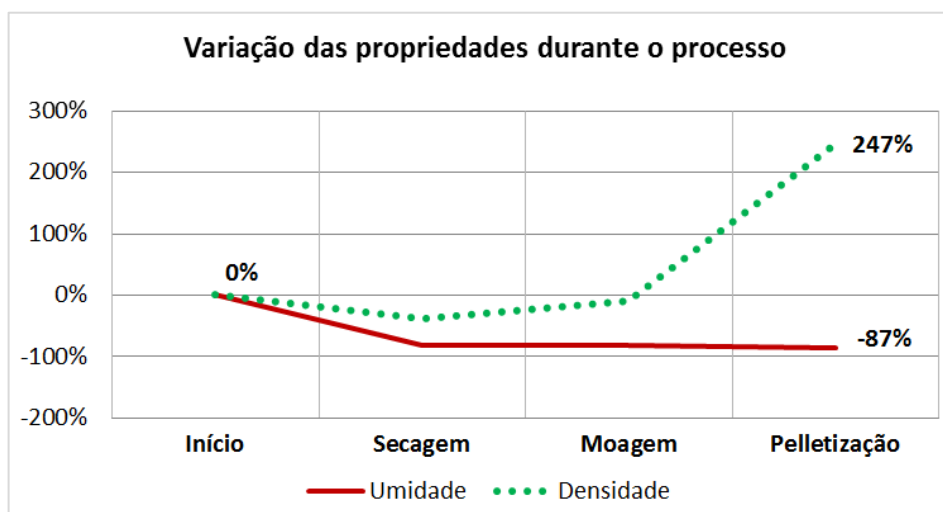


Gráfico 4 - Variação das propriedades físicas e mecânicas da matéria prima e pellets

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 8 são apresentados os resultados dos testes referentes ao diâmetro dos pellets, densidade da partícula, durabilidade e quantidade de finos.

Tabela 8 - Propriedades físicas e mecânicas do pellets

	Menor valor	Valor médio	Maior valor	Desvio padrão
Diâmetro (mm)	9.60	9.70	10.00	0.10
Densidade da partícula (kg/m ³)	1140	1270	1350	60
Durabilidade mecânica (%)	97,80	98,20	98.60	0.40
Finos (%)	1,40	1,80	2.20	0,40

Fonte: Autoria própria

Erlich et al. (2006) analisaram as propriedades físicas e mecânicas de pellets de 6 mm de diâmetro produzidos na Suécia, a partir do bagaço de cana-de-açúcar do Brasil e de Cuba, bem como de pellets de 12 mm de diâmetro importado do Brasil. Os autores encontraram valores de umidades que variaram de 4,6% a 4,9% para pellets de biomassa brasileiro e 6,6% para pellets de biomassa cubano. Em outro estudo realizado por Erlich e Fransson (2011), pellets de bagaço de cana-de-açúcar produzidos na Suécia, com matéria-prima da Colômbia, apresentou teor de umidade médio de 9,7%, sendo maior que o valor de 6,84% encontrado no presente estudo. O valor encontrado de 6,84% está dentro da faixa de pelletização indicada por Stelte et al. em 2011 para a formação de pellets de qualidade e com estabilidade de formação.

Em estudos referentes a densidade da partícula dos *pellets* realizados por Erlich et al. (2006) os valores encontrados variaram de 1.000 kg/m³ a 1.250 kg/m³ para *pellets* brasileiro de 12 mm de diâmetro e valores de 1.050 kg/m³ a 1.150 kg/m³ para *pellets* brasileiro de 6 mm de diâmetro. Em outro estudo Erlich e Fransson (2011), *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar produzidos na Suécia, com matéria-prima da Colômbia apresentaram densidade da partícula de 1.049 ± 43 kg / m³ e densidade a granel de 590 kg / m³. Cardozo (2014), utilizando *pellets* produzidos na Suécia com bagaço de cana-de-açúcar da Colômbia, encontrou os seguintes valores: 998 ± 200 kg/m³ para densidade da partícula e 590 kg/m³ para densidade a granel. Os valores reportados são inferiores aos encontrados neste estudo (1270 kg/m³ para densidade da partícula e 726 kg/m³ para densidade a granel), com variação de 37% a 1,5% para densidade da partícula e 19% para densidade a granel.

Gil et al. em 2012 destacaram a importância do processo de moagem para a homogeneização do tamanho das partículas e a influência direta nas energias gastas no processo, além de melhorar o fluxo de materiais pelos transportadores. Um estudo realizado por Carone, Pantaleo e Pellerano em 2011 mostra que o tamanho das partículas da biomassa é um dos fatores mais importantes que influenciam a densidade e a dureza dos *pellets*. Stelte et al. em 2011 observaram que a pressão de pelletização aumenta com o tamanho da partícula diminuindo de matérias-primas, o que resulta em um aumento da densidade dos *pellets*. Embora muito estudado, não foram encontradas medições que permitissem realizar comparações.

As características químicas encontradas neste estudo são apresentadas na Tabela 9. O limite de quantificação (LQ) refere-se à concentração da respectiva substância analisada, acima do qual os resultados podem ser obtidos com um determinado nível de confiança.

As propriedades químicas dos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar de Cuba e do Brasil foram analisadas por Erlich et al. (2005). Os autores encontraram os seguintes resultados: teor de cinzas de 1,7% para *pellets* cubanos e de 5,5% para *pellets* brasileiros; Nitrogênio 0,18% para *pellets* cubanos de 6 mm, e 0,21% para *pellets* brasileiros de 6 mm e 0,24% para *pellets* de 12 mm. O valor de nitrogênio neste experimento está próximo dos valores de *pellets* brasileiro, mas é diferente dos valores de *pellets* cubano. Neste estudo realizado, o teor de cinzas foi muito mais elevado do que os valores encontrados na literatura.

Em outro estudo, as principais propriedades químicas de *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar relatados por Erlich e Fransson (2011) foram: Nitrogênio $0,3 \pm 0,1\%$, Enxofre $0,03 \pm 0,007\%$, Cloro $0,05 \pm 0,01\%$, teor de cinzas de $1,1 \pm 0,1\%$ e poder calorífico superior de $19,26 \pm 0,39$ MJ/kg. No presente estudo, o valor encontrado foi 7 % menor para Nitrogênio e

50 % menor para Enxofre. Em relação ao Cloro conclui-se apenas que valor encontrado foi menor, já que o valor encontrado por Erlich e Fransson (2011) foi de $0,05 \pm 0,01\%$, e no presente estudo foi inferior a 0,02%. Em relação ao poder calorífico, o valor encontrado no presente estudo foi 5% inferior ao encontrado por Erlich e Fransson (2011). Já em relação ao teor de cinzas, o valor do presente estudo ficou 8 vezes maior ao apresentado por Erlich e Fransson (2011).

Tabela 9 - Propriedades químicas dos pellets

Normas ABNT	Valor médio	Desvio padrão	Erro (\pm)
Poder calorífico superior (MJ/kg)	18,35	0,36	0,9
Teor de cinzas (%)	8.70	0.13	0.34
Carbono fixo (%)	14.03	0.34	0.84
Materiais voláteis (%)	77.27	0.90	2.24
Normas EPA	Un.	Valor	Limite de qualificação (LQ)
Nitrogenio (N)	%	0.28	0.05
Enxofre (S)	%	0.02	0.03
Cloro (Cl)	%	<LQ	0.02

Fonte: Autoria própria

5.2 ANÁLISE COMPARATIVA COM AS NORMAS INTERNACIONAIS DE QUALIDADE

Em relação às propriedades físicas e mecânicas, todas as normas para *pellets* estabelecem valores de diâmetro, comprimento, densidade e durabilidade. O diâmetro médio dos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar encontrados neste trabalho (9,7 mm) está de acordo com algumas normas internacionais, mas é diferente se comparado com o padrão da norma ISO 17225-2/2014 utilizada para *pellets* de madeira e da norma PFI/2011 utilizada para *pellets* de biomassa. A diferença entre o valor médio e o valor máximo encontrado neste experimento ($\pm 0,3$ mm) está de acordo com o valor esperado pela norma EN14961-1/2011 padrão europeu (± 1 mm). O comprimento médio (22,70 mm), a densidade a granel (726,32 kg/m³) e a durabilidade (98,2%) estão de acordo com todas as normas apresentadas.

Quanto a características químicas, apenas os valores de umidade, teor de cinzas e cloro são definidos para todos os padrões. O teor de umidade e o poder calorífico encontrados estão em conformidade com todas as normas estudadas.

O teor de cinzas dos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar encontrado neste trabalho (8,7%) é mais elevado do que o encontrado em todos os padrões. O valor máximo verificado é o da norma ISO 17225-6/2014 (≤ 6.0) e o valor mínimo definido é pela norma ISO 17225-2/2014 (≤ 0.7). Sendo assim, o maior nível de teor de cinzas encontrados, nos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar neste estudo pode dificultar o seu uso em alguns sistemas de aproveitamento energético.

O valor médio da quantidade de finos encontrados (1,8%) está de acordo apenas com a norma ISO 17225-6/2014, utilizada para *pellets* produzido à partir de biomassa não lenhosa, sendo maior do que os definidos pelas outras normas.

Finalmente, verificou-se que a quantidade de nitrogênio (0,28), enxofre (0,02) e de cloro encontradas para *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar estão em conformidade com todas as normas internacionais. As propriedades carbono fixo e material volátil são importantes parâmetros de qualidade da biomassa, mas eles não constam nas normas internacionais.

Na Tabela 10 é apresentado um resumo com todos os itens das normas, bem como os valores encontrados no presente estudo. É indicado ainda os itens que estão em conformidade e os itens em não conformidades com as normas.

Tabela 10 - Itens em conformidade dos *pellets* estudados com as normas de qualidade

Especificação	ISO 17225-6	ISO 17225-2	EN 14961-1	USA PFI Standard	Valores do estudo
Diâmetro (mm)	6 - 10	6,8,12 \pm 1	6,8,10 \pm 1	5.84 - 7.25	9,70
Comprimento (mm)	3.15 - 40	3.15 - 40	3.15-40	≤ 42	22,70
Densidade granel (kg/m ³)	≥ 600	≥ 600	≥ 600	608.7-746.9	726,32
Durabilidade (%)	≥ 97.5	$\geq 97.5 - \leq 99$	≥ 96.5	≥ 95.0	98,20
Umidade (%)	≤ 12	≤ 10	≤ 10	≤ 10	6,84
Poder calorífico (MJ/kg)	≥ 14.5	≥ 16.5	≥ 16.5	-	18,35
Teor de cinzas (%)	≤ 6	≤ 0.7	≤ 1.0	≤ 2.0	8,70
Finos (%)	≤ 2	≤ 1	≤ 1.0	≤ 1.0	1,80
Nitrogenio, N (%)	≤ 1.5	≤ 0.3	$\leq 0.5\%$	-	0,28
Enxofre, S (%)	≤ 0.2	≤ 0.04	$\leq 0.05\%$	-	0,02
Cloro, Cl (%)	≤ 0.1	≤ 0.02	$\leq 0.3\%$	<300ppm	<0,02

Fonte: Autoria própria

5.3 ANÁLISE DO FLUXO DE MASSA, ENERGIAS ENVOLVIDAS E CUSTOS DO PROCESSO

A Tabela 11 traz os resultados do consumo de bagaço de cana-de-açúcar-de-açúcar, consumo de *pellets* queimados na fornalha e a produção de *pellets* em uma hora de produção

em kg. Em seguida é apresentada a energia total envolvida em cada etapa do material calculada mediante as equações 1 a 3 para uma hora de produção. Na última coluna é calculado o valor da energia presente em cada etapa do processo por tonelada de produção de *pellets*, dividindo os valores de uma hora de produção pela produção de uma hora de produção de *pellets*.

Tabela 11 - Fluxo de massa e energia presente na matéria prima e *pellets* em uma hora de produção

Material	Massa kg	Poder calorífico MJ/kg	Energia total MJ	Energia / ton de <i>pellets</i> produzido MJ
Bagaço cana-de-açúcar	4392 (<i>Mb</i>)	9,05 (<i>PCSb</i>)	39737 (<i>Etb</i>)	21714 (<i>Etb</i>)
<i>pellets</i> gasto na fornalha (energia térmica)	480 (<i>Mpf</i>)	18,35 (<i>PCSp</i>)	8810 (<i>Etpf</i>)	4814 (<i>Etpf</i>)
Produção de <i>pellets</i>	1830 (<i>Mpp</i>)	18,35 (<i>PCSp</i>)	33590 (<i>Epp</i>)	18355 (<i>Epp</i>)

Fonte: Autoria própria

No balanço de massa de entrada de matéria prima e saída de *pellets* é preciso quantificar a perda de massa durante o processo. Se a matéria prima de entrada foi de 4.392 kg a uma umidade média de 53,41% de água têm-se uma massa seca a 0% de água de bagaço de cana-de-açúcar de 2.046,23 kg, da mesma maneira a saída de *pellets* foi de 1.830 kg à umidade média de 6,84% de água sendo uma massa seca a 0% de 1.704,83 kg de *pellets* (bagaço de cana-de-açúcar). Desta maneira, tem-se uma diferença de massa seca de entrada de bagaço de cana-de-açúcar e saída do processo de bagaço de cana-de-açúcar na forma de *pellets* de 17%. Esta diferença pode ser atribuída a perdas durante o processo em sistemas como exaustão, moagem, ciclone e pelletização.

Na Figura 20 é apresentado um fluxograma do balanço de massa total do sistema para 1000 kg de *pellets* produzido, com as perdas do processo, levando como base para os cálculos da Tabela 11.

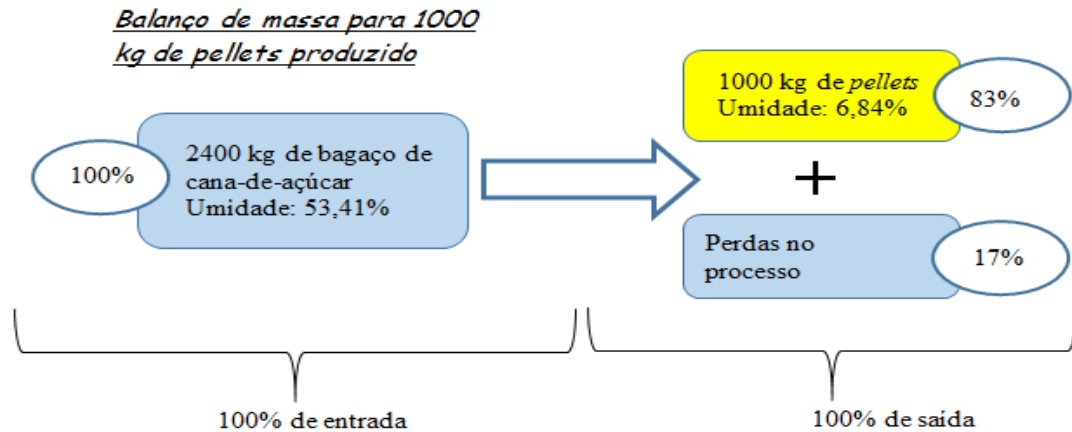


Figura 20 - Balanço de massa

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 12 é apresentada a energia consumida por cada motor elétrico participante dos processos durante uma hora de produção (energia elétrica).

Tabela 12 - Medição da energia consumida pelos motores elétricos do processo

Processo	Motor	Pot nominal [KW]	Tensão nominal [V]	Média das correntes [A]	Fator de potência	Energia [MJ] (eq. 07)
Secagem	1	11	380	7,13	0,83	14,03
	2	1,5	380	2,07	0,78	3,82
	3	3,7	380	2,53	0,81	4,86
	4	3,7	380	1,63	0,81	3,13
	5	1,5	380	3,60	0,78	6,65
	6	2,2	380	4,27	0,80	8,09
	7	2,2	380	1,10	0,80	2,09
	8	3,7	380	1,53	0,81	2,94
	9	2,2	380	2,00	0,80	3,79
	10	2,2	380	2,00	0,80	3,79
	11	0,75	380	1,23	0,82	2,40
	12	0,75	380	1,63	0,82	3,17
	13	11	380	10,17	0,81	19,51
	14	90	380	146,33	0,83	287,78
	15	2,2	380	2,27	0,86	4,62
	16	2,2	380	2,10	0,80	3,98
	17	1,5	380	0,67	0,80	1,26
Moagem	18	45	380	43,73	0,89	92,23
	19	3,7	380	4,03	0,81	7,74
	20	3,7	380	1,47	0,79	2,75
Pelletização	21	15	380	15,63	0,80	29,63
	22	220	380	220,33	0,80	417,65
TOTAL: 925,93 (Eel)						

Fonte: Autoria própria

Na Tabela 13 é apresentado o valor dos custos com consumo de energia, compra de matéria prima e valor da produção dos *pellets* em uma hora de produção e por tonelada de *pellets* produzido.

No cálculo do valor do custo (em R\$ por unidade de energia, MJ) para a energia térmica foi utilizado o valor de R\$520,00 (C_p) por tonelada de *pellets*, multiplicado este valor pelo inverso do poder calorífico (MJ/kg), conforme a equação 12.

$$\text{Equação (12)} \quad C_{et} = C_p * \frac{1}{PCS} = 0,520 * \frac{1}{18,35} = 28,34$$

- onde, C_{et} é o custo da energia térmica, PCS é o valor calorífico dos pellets.

Tabela 13 - Energia consumida, fluxo de massa e custos do processo em uma hora de produção

Tipo de energia	Energia MJ	Custo R\$/MJ	Valor total R\$	Valor R\$ / ton
Energia térmica	8810 (E_{tpf})	0,028 (C_{et})	249,60 (V_{et})	136,39 (V_{et})
Energia elétrica	925,93 (E_{el})	0,0595 (C_{el})	55,09 (V_{el})	30,11 (V_{el})
Materiais	Massa kg	Custo R\$/tonelada	Valor total R\$	Valor R\$ / ton
Bagação de cana-de-açúcar	4392 (M_b)	50 (C_b)	219,60 (V_b)	120 (V_b)
<i>Pellets</i> gasto na fornalha	480 (M_{pf})	520 (C_p)	249,60 (V_{pf})	136,39 (V_{pf})
Produção de <i>pellets</i>	1830 (M_{pp})	520 (C_p)	951,60 (V_{pp})	520 (V_{pp})

Fonte: Autoria própria

No Gráfico 5 é apresentado o consumo total de energia elétrica e térmica, o consumo de energia em cada etapa do processo e o custo da energia para cada etapa do processo por tonelada de *pellets* produzidos.

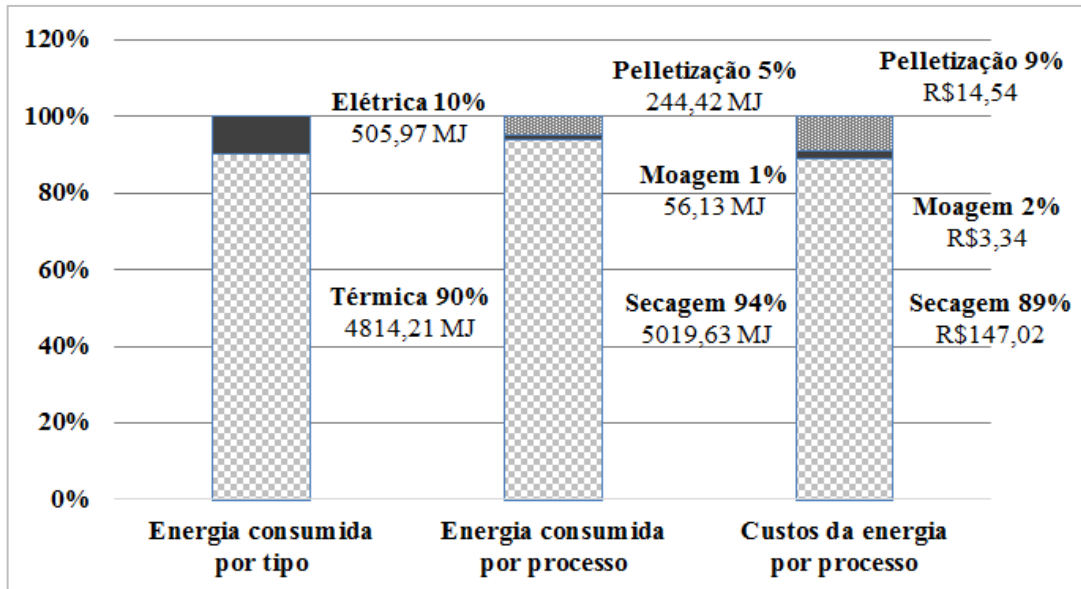


Gráfico 5 - Energia e custos por tonelada de *pellets* produzido

Fonte: Autoria própria

Na Figura 21 é apresentado um fluxograma do balanço de energia total e de cada etapa do processo para 1000 kg de *pellets* produzido. Neste fluxograma são apresentados os valores das perdas do processo (32,12%). Deste total de perdas (32,12%), 17% são referentes às perdas de massa apresentadas na Figura 20. Os outros 15,12% são referentes às perdas com ineficiências do processo de secagem, moagem e pelletização, somando-se ainda perdas com o resfriamento dos *pellets* no final do processo para o meio ambiente.

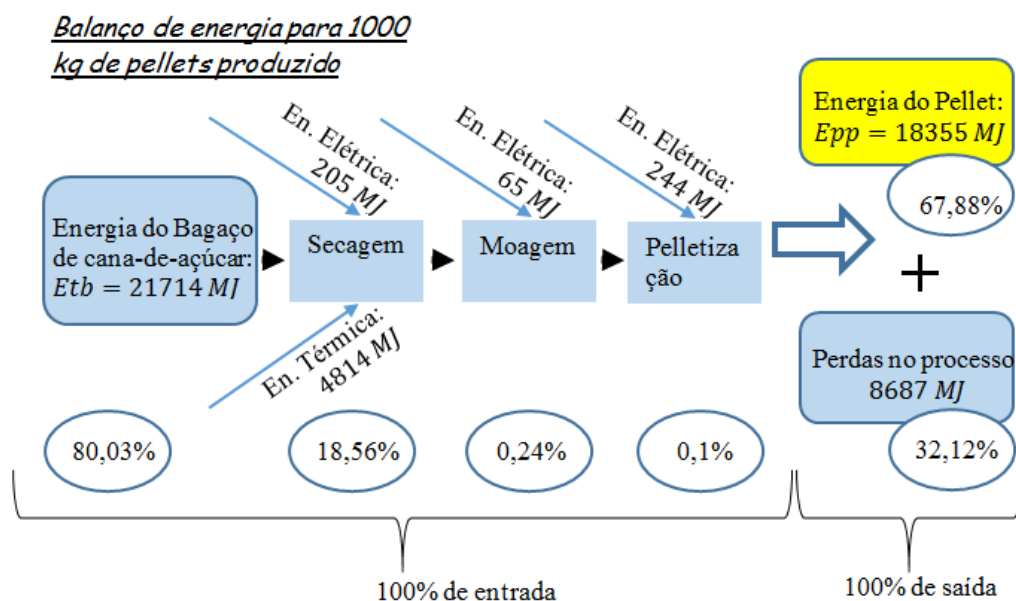


Figura 21 - Balanço de energia

Fonte: Autoria própria

No Gráfico 6 é apresentado o Valor Líquido resultante do preço de venda dos *pellets* menos o custo com aquisição de matéria prima, consumo de energia térmica e elétrica por tonelada de *pellets* produzido.

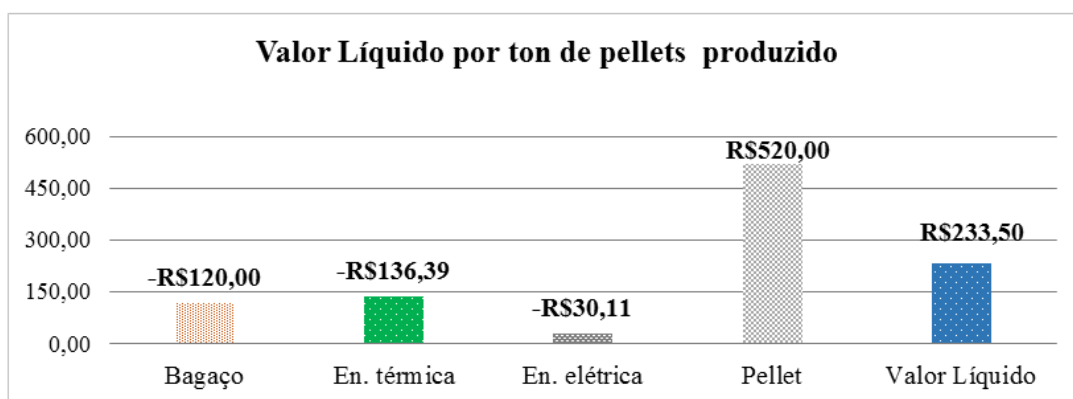


Gráfico 6 - Valor Líquido por tonelada de *pellets* produzido

Fonte: Autoria própria

Os gastos energéticos encontrados podem ser comparados com dados do processo de pelletização desenvolvido por Uasuf e Becker (2011), onde foram encontrados os valores de 82% gastos em energia térmica e 14% gastos em energia elétrica, diferenciando-se em relação ao processo em estudo, com gasto de 90% de energia térmica e 10% de energia elétrica. Em outro estudo Digiacomo e Taglieri (2009) quantificaram os gastos energéticos em cada etapa do processo de pelletização obtendo gastos de 1.116 MJ/ton com secagem, 72 MJ/ton com moagem, 144 MJ/ton com pelletização, 108 MJ/ton com outros processos totalizando 1.440 MJ por tonelada de *pellets* produzidos. Em comparação com o presente estudo tem-se que no processo de secagem foram gastos 5.019,63 MJ/ton, para moagem 56,13 MJ/ton e para pelletização 244,42 MJ/ton. Com os estudos citados, o valor que mais se afasta com os reportados é a quantidade de energia gasta no processo de secagem. Isto pode ser atribuído as diferenças na umidade da matéria prima e as características das instalações industriais.

5.4 CONSUMO DE ENERGIA E CUSTOS EM FUNÇÃO DA VARIAÇÃO DE UMIDADE

No Gráfico 7 são apresentados os valores da temperatura de dentro da fornalha em °C para assegurar a secagem a 11% de umidade em função da variação da umidade de entrada do bagaço de cana-de-açúcar (Carone, Pantaleo e Pellerano, 2011). É apresentada também a relação entre o consumo de *pellets* queimado na fornalha (kg) e os valores da temperatura atingidos dentro da fornalha (°C) para volume de produção de 2.000 kg de *pellets* por hora.

Ainda no Gráfico 7, é apresentado o valor do consumo de *pellets* queimado na fornalha (*Mpf* dado kg) em função da umidade de entrada da matéria prima (*ub* dado %) para secagem à 11% para uma produção de 2.000 kg de *pellets* por hora, durante uma hora de produção. A função pode ser expressa por:

$$\text{Equação (13)} \quad Mpf = 189,54 * e^{0,0172ub}$$

- onde, *Mpf* é a massa de pellet queimada na fornalha e *ub* é a umidade da matéria prima.

Aplicando à equação 2 de energia:

$$Etpf = Mpf * PCSp ;$$

com *PCSp* = 18,35 MJ/kg, é determinada a relação de energia térmica queimada na fornalha em função da umidade de entrada do bagaço de cana-de-açúcar-de-açúcar.

$$\text{Equação (14)} \quad Etpf = 3478,01 * e^{0,0172ub} [MJ]$$

- onde, *Etpf* é a energia térmica consumida na fornalha e *ub* é a umidade da matéria prima.

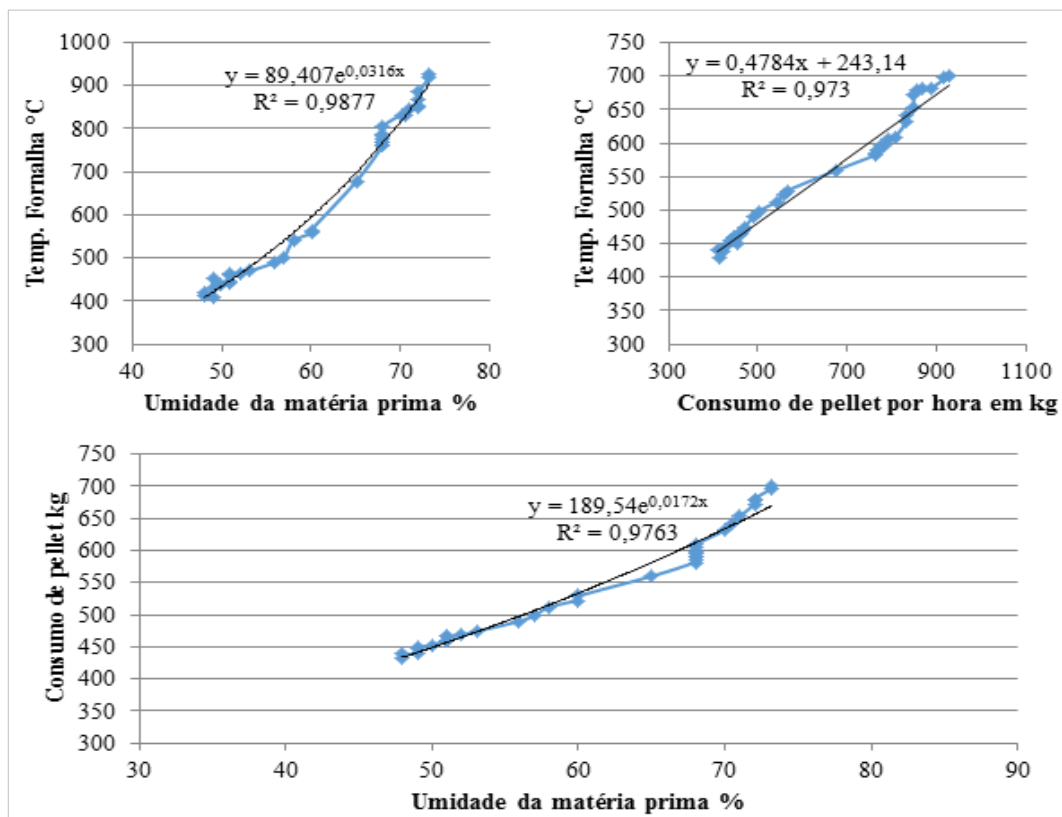


Gráfico 7 - Consumo de *pellets* na fornalha em função da umidade da matéria prima para uma produção de 2.000 kg de *pellets* por hora, durante uma hora.

Fonte: Autoria própria

No Gráfico 8 são apresentados os valores da corrente de trabalho do moinho (I_{mo} dada em Amperes) em função da variação da umidade de entrada do bagaço de cana-de-açúcar-de-açúcar. A função pode ser expressa por:

$$\text{Equação (15)} \quad I_{mo} = 17,654 * e^{0,0842us}$$

- onde, I_{mo} é a corrente elétrica do moinho e us é a umidade da matéria prima após o processo de secagem.

$$\text{Aplicando a equação } Pm \dots = \sqrt{3} * U * I_m \dots * \cos\phi \dots \text{ e } 07$$

$Eel \dots = Pm \dots * \Delta t$ para um tempo de 1 hora de produção, é determinada a equação de energia consumida pelo motor elétrico do moinho em função da umidade de entrada de material no moinho.

$$\text{Equação (16)} \quad Eelmo = \sqrt{3} * U * I_{mo} * \cos\phi * \Delta t$$

$$Eelmo = \sqrt{3} * 380 * 17,654 * e^{0,0842us} * 0,89 * \frac{1}{1000} * 3,6 * 1$$

$$\mathbf{Eelmo = 37,227 * e^{0,0842us} [MJ]}$$

- onde, $Eelmo$ é a energia consumida pelo moinho e us é a umidade da matéria prima após o processo de secagem.

Também no Gráfico 8 são apresentados os valores da corrente de trabalho da pelletizadora (I_{p} dada em Amperes) em função do volume de produção de *pellets* à 8% de umidade. A função pode ser expressa por:

$$\text{Equação (17)} \quad I_{mp} = 0,0503 * M_{pp} + 130,97$$

- onde, I_{mp} é a corrente elétrica da pelletizadora e M_{pp} é a massa de *pellets* produzida.

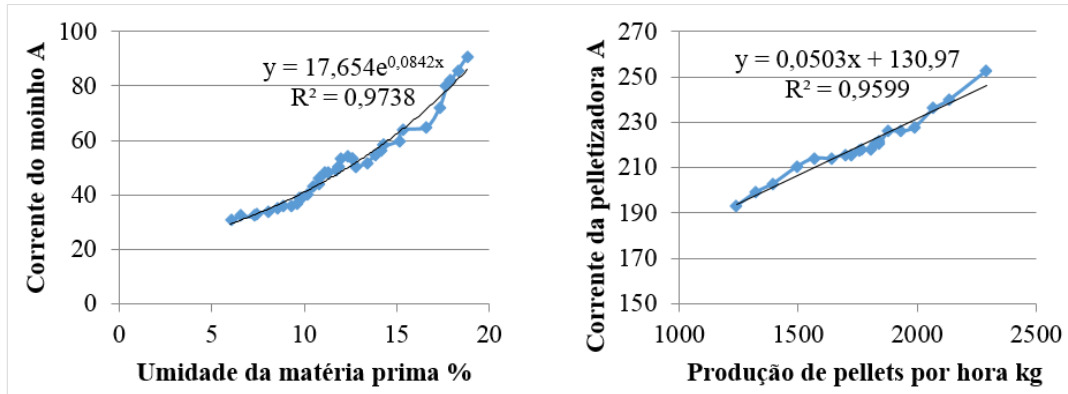


Gráfico 8 - Corrente elétrica consumida no moinho e pelletizadora em função da umidade e volume de produção

Fonte: Autoria própria

Aplicando a equação 6 $Pm \dots = \sqrt{3} * U * Im \dots * \cos\phi \dots$ e 07

$Eel \dots = Pm \dots * \Delta t$ para um tempo de 1 hora de produção, se tem a equação de energia consumida pelo motor elétrico da pelletizadora em função do volume de produção dada em kg.

$$\text{Equação (18)} \quad Eelp = \sqrt{3} * U * Imp * \cos\phi * \Delta t$$

$$Eelp = \sqrt{3} * 380 * (0,0503 * Mpp + 130,97) * 0,8 * 1 * \frac{1}{1000} * 3,6$$

$$Eelp = 0,095 * Mpp + 248,19 [MJ]$$

- onde, $Eelp$ é a energia elétrica da pelletizadora e Mpp é a massa de *pellets* produzida.

Pode-se então definir uma função matemática para o consumo de energia para a produção de *pellets* em função da variação de umidade da matéria prima (ub), umidade de secagem (us) e volume de produção (Mpp). Como constantes é assumido o valor da energia gasta pelos inúmeros motores elétricos do processo descritos na Tabela 12, exceto os motores 18 e 22 do equipamento de moagem e de pelletização respectivamente ($Eelk$).

$$\text{Equação (19)} \quad Etotal = Etpf + Eelmo + Eelp + Eelk$$

- onde, $Etotal$ é a energia total consumida, $Etpf$ é a energia térmica consumida na fornalha, $Eelmo$ é a energia consumida pelo moinho, $Eelp$ é a energia elétrica da pelletizadora e $Eelk$ é a energia elétrica constante consumida pelos motores elétricos.

Onde:

- $Etpf$ é a energia térmica queimada na fornalha em função da umidade de entrada do bagaço de cana-de-açúcar em uma hora de produção

$$\text{Equação (14)} \quad Etpf = 3478,01 * e^{0,0172ub} [MJ]$$

- $Eelmo$ é a energia consumida pelo motor elétrico do moinho em função da umidade de entrada de material no moinho em uma hora de produção.

$$\text{Equação (16)} \quad Eelmo = 37,227 * e^{0,0842us} [MJ]$$

- $Eelp$ é a energia consumida pelo motor elétrico da pelletizadora em função da massa de *pellets* produzida em uma hora de produção.

$$\text{Equação (18)} \quad Eelp = 0,095 * Mpp + 248,19 [MJ]$$

- $Eelk$ é a energia dissipada pelos motores elétricos considerados constantes do sistema. Valores das energias da Tabela 12 com exceção dos motores 18 e 22.

$$Eelk = 416,05 [MJ]$$

Para este estudo se aplicam as restrições ao processo:

1° - O valor da umidade do material na entrada do moinho é fixado em 11%, condição ideal para pelletização de biomassa (Carone, Pantaleo e Pellerano, 2011) $us = 11$ para a equação 16.

2° - O valor da massa produzida de *pellets* por hora é fixado em 2.000 kg devido as restrições físicas das instalações. $Mpp = 2000$ para a equação 18.

Assim sendo, o consumo de energia do processo de pelletização em função da variação da umidade de entrada do bagaço de cana-de-açúcar fica:

$$\text{Equação (19)} \quad Etotal = 3478,01 * e^{0,0172ub} + 93,99 + 438,19 + 416,05$$

$$Etotal = 3478,01 * e^{0,0172ub} + 948,23 [MJ]$$

- onde, $Etotal$ é a energia total consumida e ub é a umidade de entrada da matéria prima.

Apresentado no Gráfico 9, onde a energia consumida pelo processo aumenta de forma exponencial com a variação de umidade de entrada da matéria prima.

Através da equação 19 pode-se chegar ao valor líquido do processo em função da variação da umidade da matéria prima para uma produção hora de *pellets* de 2.000 kg à umidade de 8%. Considerando as mesmas restrições 1 e 2 estabelecidas.

O valor líquido foi definido no estudo como sendo:

$$\text{Equação (20)} \quad Vl = Vpp - Vb - Vet - Velk$$

Onde:

- V_{pp} é o valor de venda de *pellets* produzido da Equação (9).

$$V_{pp} = M_{pp} * C_p = 2000 * 520 = 1040$$

- V_b é o valor de aquisição da matéria prima em função da umidade de entrada da Equação (9).

$$V_b = M_b * C_b = \left(\frac{2000}{1 - \frac{ub}{100}} \right) * 50$$

- V_{et} é o valor da energia térmica consumida

$$V_{et} = E_{tpf} * C_{et} = (3478,01 * e^{0,0172ub}) * 0,028$$

- V_{elk} é o valor da energia elétrica constante gasta no processo, considerando as restrições 1 e 2, tendo como todos os motores constantes. Da equação (11).

$$V_{elk} = (E_{elmo} + E_{elp} + E_{elk}) * C_{el} = 948,23 * 0,0595 = 56,42$$

Assim sendo a equação (20) fica:

$$V_l = 1040 - \left(\frac{2000}{1 - \frac{ub}{100}} \right) * 50 - (3478,01 * e^{0,0172ub}) * 0,028 - 56,42$$

$$V_l = 983,58 - \left(\frac{2000}{1 - \frac{ub}{100}} \right) * 50 - (97,38 * e^{0,0172ub})$$

- onde, V_l é o valor líquido, V_{pp} é o valor de venda do pellet, V_b é o valor bagaço, V_{et} é o valor da energia térmica consumida, V_{elk} é a energia elétrica constante e ub é a umidade da matéria prima.

Demonstrado no Gráfico 9, onde o custo do processo aumenta e por consequência o valor líquido diminui de forma exponencial com o aumento da umidade de entrada da matéria prima.

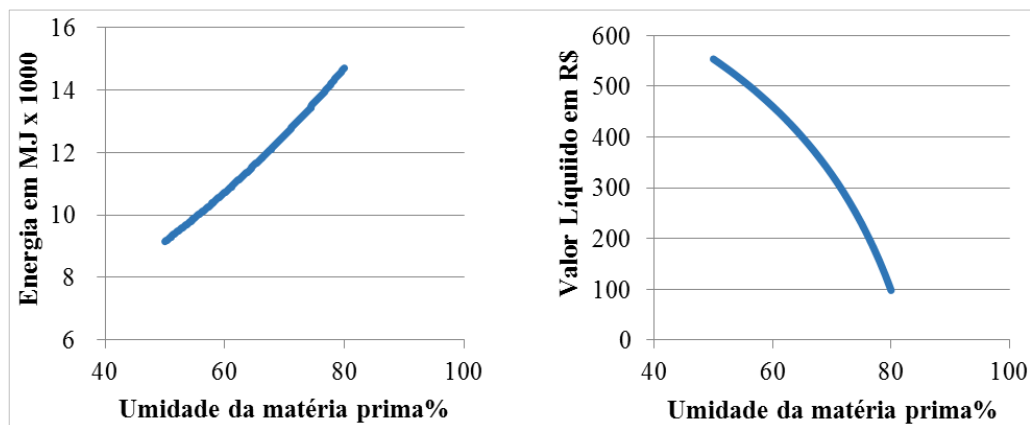


Gráfico 9 - Energia consumida e valor líquido em função da umidade da matéria prima para uma produção de 2.000 kg de *pellets* por hora, durante uma hora de produção.

Fonte: Autoria própria

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo realizado em uma indústria brasileira e inovadora na pelletização da biomassa bagaço de cana-de-açúcar. A primeira etapa do estudo caracterizou os equipamentos e todos os processos de fabricação envolvidos e determinou através de metodologias e trabalhos científicos as principais propriedades do bagaço de cana-de-açúcar e do *pellet* produzidos. As propriedades analisadas para a matéria prima em todas as etapas do processo foram o comprimento das partículas, umidade e densidade a granel. Para os *pellets* foram determinados o diâmetro, comprimento, densidade a granel, densidade da partícula, umidade, durabilidade, quantidade de finos, poder calorífico, teor de cinzas, carbono fixo, matérias voláteis, nitrogênio, enxofre e cloro.

Os resultados encontrados foram comparados com os obtidos por outras pesquisas realizadas por outros autores deste mesmo assunto, abrangendo estudos de pelletização de bagaço de cana-de-açúcar e de processos similares como o processo de pelletização de madeira. Além disso os resultados foram comparados com as principais normas de qualidade para a comercialização de *pellets* de biomassa e biocombustíveis sólidos. Em geral o estudo mostrou que para alguns parâmetros, existem diferenças entre os resultados encontrados neste experimento e os resultados relatados em outros trabalhos científicos. O bagaço de cana-de-açúcar proveniente de diferentes regiões, como o Brasil, Cuba e Colômbia, processados em diferentes países, tem apresentado resultados diversos. Isso indica que as propriedades dos *pellets* podem variar dependendo da origem da matéria-prima, do processo de produção e, certamente, depende do procedimento de avaliação utilizado para determinar as suas propriedades físicas, mecânicas e químicas.

Uma análise comparativa com as normas internacionais de *pellets* de biomassa e de biocombustíveis sólidos revelou que apenas algumas características dos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar apresentado neste estudo estão de acordo com todas as normas. Isso indica que nenhuma das normas analisadas para *pellets* de biomassa e de biocombustíveis sólidos são apropriadas para orientar *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar e que portanto, esse biocombustível precisa de uma norma específica e procedimentos de caracterização próprios para produzir e avaliar o produto final.

Como resultado da segunda etapa do trabalho, verificou-se através de medições do processo que o consumo energético para a produção de *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar se difere com os referenciais bibliográficos analisados. Foi verificado para o processo de pelletização que o gasto energético e conseqüentemente o custo com o consumo de energia térmica necessária para o processo de secagem da matéria prima foi significativamente maior,

podendo atribuir estas diferenças à alta concentração de umidade e características peculiares da matéria prima, além do sistema de secagem existente. Além disso, foi determinado os fluxos de massa do sistema considerando a taxa de consumo da matéria prima, *pellets* gasto para a geração de calor na fornalha e taxa de produção do produto final.

Por fim, foram realizadas leituras do processo tendo como variáveis a umidade de entrada e umidade na saída do secador da matéria prima e volume de produção na pelletizadora com objetivo de analisar a variação do gasto energético e de custos da produção dos *pellets*. Como resultado verificou-se que o consumo de energia e o custo de produção aumentam de forma exponencial com o aumento da umidade de entrada da matéria prima.

Contribuições do estudo:

Em geral, os *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar representam uma grande alternativa de biocombustíveis para o Brasil e para o mundo. Sendo assim, os resultados apresentados neste trabalho podem ser aplicados como referência para produtores, formuladores de políticas e pesquisadores para o desenvolvimento de novos estudos e pesquisas para o processo de pelletização da biomassa bagaço de cana-de-açúcar. Também, este trabalho contribui na busca pela otimização dos processos e qualidade dos *pellets* elaborados a partir do bagaço de cana-de- açúcar.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Estudar os testes exigidos nas normas internacionais de qualidade e de comercialização de *pellets* e aplicar em outras amostras do produto, produzidas em outras indústrias e provenientes de outras variedades de matéria prima.
- Estudar os processos industriais variando os parâmetros de produção como capacidade produtiva e parâmetros de controle da matéria prima em processo.
- Realizar análise energética e de processo em outras unidades industriais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WORKS ASSOCIATION, WATER ENVIRONMENT FEDERATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 22nd ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2012.

ANDERSON, E.; HARVEY, S.; BERNTSSON, T.; energy efficient upgrading of biofuel integrated a pulp mill. **Energy**, v.31, p. 1384-1394, 2006.

ALMEIDA, N. C. V.; **Sistemas de Gestão Ambiental: Um Estudo dos Terminais do Porto de Santos**. 2010, 191 f. Dissertação (Mestre em Administração de Empresas) - Escola de Administração de Empresas de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas, 2010, São Paulo.

ARSHADI, M.; GREF, R.; GELADI, P.; DAHLQVIST, S.; LESTANDER, T.; The influence of raw material characteristics on the industrial pelletizing process and *pellet* quality. **Fuel Process Technol.** v. 89, p.1442-1449, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8112 – Carvão Vegetal – Análise Imediata. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8633 – Carvão Vegetal – Determinação do poder calorífico. Rio de Janeiro, 1984.

Austrian standard ÖNORM M 7135. Compressed wood or compressed bark in natural state, *pellets* and briquettes. Requirements and test specifications. Vienna, Austria: Österreichisches; 2003.

BACCI, M.S.; SANTOS, A. M.; Avaliação energética do bagaço de cana em diferentes níveis de umidade graus de compactação. **Anais do XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP)**, 2008.

BASTOS, V. D.; Etanol, Alcoolquímica e biorrefinarias. **BNDES Setorial**, n. 25, p. 5-38, mar. 2007.

BIOENERGY INTERNATIONAL. The *pellets* Map 2007. Stockholm: Lennart Ljungblom, n. 29, p.48, 2006.

BLOOMBERG. **Wood *pellet* production to rise by multiples through 2020, lobby group says, 2010**. <http://www.bloomberg.com/news/2010-06-30/wood-pellet-production-to-rise-by-multiples-through-2020-lobby-group-says.html>. June 30 (August 19, 2010).

BRASIL. **Balanco Energético Nacional - BNE**. Disponível em <<https://ben.epe.gov.br/>>. Acesso em: 28 julho. 2014.

BRASIL. **COPEL – Companhia Paranaense de Energia**. Disponível em <<http://www.copel.com.br/>>. Acesso em 26 março. 2014.

BRASIL. **Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa**. Disponível em <<https://embrapa.br/>> Acesso em: 28 julho. 2014.

BRASIL. **Indústria e Comércio Chavantes LTDA**. Disponível em <<http://www.chavantes.ind.br/>>. Acesso em: 05 de maio. 2014.

BRASIL. **Lippel**. Disponível em <<http://www.lippel.com.br/>>. Acesso em: 05 de maio. 2014.

BRASIL. **União da Indústria de cana-de-açúcar – UNICA**. São Paulo. Disponível em <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao>>. Acesso em: 09 jan. 2013.

BRAND, M. A. **Qualidade da biomassa florestal para uso na geração de energia em função da estocagem**. 196f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Centro de Ciências Florestais e Agrárias UFPR, Curitiba, 2007.

British BioBen code of Good practice for Biofuel *pellets*. London, UK, 2000.

CARONE, M.T.; PANTALEO, A.; PELLERANO, A.; Influence of process parameters and biomass characteristics on the durability of *pellets* from the pruning residues of *Olea europaea* L. **biomass and bio energy**, v.3 5, p. 402-410, 2011.

CARASCHI, J. C.; PINHEIRO, D. G.; VENTORIM, G.; Caracterização física e química dos *pellets* de madeira produzidos no Brasil. **Encontro brasileiro em madeiras e estruturas de madeira**, 2012.

CHARTERS, W. W. S.; Developing markets for renewable energy technologies. **Renewable Energy**. v. 22, p. 217, 2001.

CHIOVATTO, C.; BISPO, D.; SILVA, V. P.; BERNARDES, W. M. S.; Metodologia de Avaliação das Condições de Funcionamento dos Motores de Indução. **Anais do IV Congresso Brasileiro de Eficiência Energética**, 2011.

COUTO, L. C.; COUTO, L.; WATZLAWICK L. F.; CAMARA, D.; Ways of Energy Valuation Biomass. **Biomass and Energy**, v. 1, n. 1, p. 71 – 92, 2004.

CORRÊA, Jefferson L. G. **Discussão de parâmetros de projeto de secadores ciclônicos**. 2003, 169 f. Tese (Doutor em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003, Campinas.

DANTAS, Djolse N. **Uso da biomassa da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, exergética e ambiental de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista**. 2010, 1012 f. Dissertação (Mestre em Ciência da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Paulo, Universidade de São Paulo, 2010, São Paulo.

DIGIACOMO, G.; TAGLIERI, L.; Renewable energy benefits with conversion of woody residues to *pellets*. **Energy**, v. 34, p. 724–731, 2009.

DOLZAN, P.; BLANCHARD, M. P.; GRASSI, A.; HEINIMO, J.; JUNGINGER, M.; RANTA, T.; IEA Bioenergy. Global Wood *pellets* Markets and Industry: Policy Drivers, Market Status and Raw Material Potential. Organizado pela **IEA-International Energy Agency** – Task 40. Paris, 2006. 112p.

EEA. (2006a). How much bioenergy can Europe produce without harming the environment. Copenhagen: **European Environment Agency**: EEA Report n° 7/2006.

EN ISO 17225-6. Solid biofuels - Fuel specifications and classes Part 6: Graded non-woody *pellets*. 2014.

EN ISO 17225-2. Solid biofuels - Fuel specifications and classes Part 2: Graded wood *pellets*. 2014.

EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – Test methods for evaluating solid wastes - SW 846.

ERLICH, C.; BJORNBO, E.; BOLADO, D.; GINER, M.; Pyrolysis and gasification of *pellets* from sugarcane bagasse and wood. **Fuel**, v.85, p. 1535–1540, 2006.

ERLICH, C.; O'HMAN, M.; BJORNBO, E.; FRANSSON, T. H.; Thermochemical characteristics of sugar cane bagasse *pellets*. **Fuel**, v. 84, p. 569–575, 2005.

ERLICH, H; FRANSSON, T.H.; Downdraft gasification of *pellets* made of wood, palm-oil residues respective bagasse: **Experimental study. Applied Energy**, v. 88, p. 899–908, 2011.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – Technical Specification CEN/TS 15103: Methods for determination of bulk density. Solid biofuels. London, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION – Technical Specification CEN/TS 15210-1: Methods for determination mechanical durability of *pellets*. Solid biofuels – fuel specification and classes. London, 2005.

European *pellets* Standard – EN14961-1 – Solid biofuels — Fuel specifications and classes. European *pellet* Council, 2011.

FANTOZZI, F.; BURATTI, F.; Life cycle assessment of biomass chains: Wood *pellet* from short rotation coppice using data measured on a real plant. **Biomass and bio energy**, v. 34, p. 1796 e 1804, 2010.

FILBAKK, T.; SKJEVRAK, G.; HOIBO, O.; DIBDIKOVA, J.; JIRJIS, R.; The influence of storage and drying methods for Scots pine raw material on mechanical *pellet* properties and production parameters. **Fuel Processing Technology**, v. 92, p. 871–878, 2011.

GARCIA, Dorival P. **Caracterização química, física e térmica de *pellets* de madeira produzidos no Brasil**. 2010, 101 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, 2010, Guaratinguetá.

GARCIA, Agenor G. P. **Impacto da lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria**. 2003, 127 f. Dissertação (Mestre em planejamento energético) – Programas de Pós Graduação de engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003, Rio de Janeiro.

German standard DIN 51731. Testing of solid fuels, compressed untreated wood. Requirements and testing. Berlin, Germany: Deutsches Institut für Normung; 1996.

- GIL,M.; ARAUZO, I.; TERUEL, E.; BARTOLOMÉ, C.; Milling and handling *Cynara Cardunculus L.* for use as solid biofuel: Experimental tests. **Biomass and Bioenergy**, v, 41,p. 145-156, 2012.
- GOES, R. H.T.B.; TRAMONTINI, R. C. M.; ALMEIDA, G. D.; CARDIM, S. T.; RIBEIRO, J. OLIVEIRA, L. A.; MOROTTI, F.; BRABES, K. C. S; OLIVEIRA, E. R.; Degradabilidade ruminal da matéria seca e proteína bruta de diferentes subprodutos agroindustriais utilizados na alimentação de bovinos. **Rev. Bras. Saúde Prod. An.**, v. 9, n.3, p. 715-725, 2008.
- GONZALES, R.; SALONI, D.; PHILLIPS, R.; WRIGHT, J.; Loblolly pine biomass delivered cost, **biomass conference**, Minneapolis, MN; 2010.
- IEA – International Energy Agency. World Energy Outlook 2012 – Renewable Energy outlook.
- HOWARD, J.R., 1989, “Fluidized bed technology: principles and applications”, New York, Adam Hilger, 214 p.
- KALOGIROU SA. Solar thermal collectors and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 03, p. 231-95, 2004.
- KONG, K.; TIAN, S.; HE, C.; DU, C.; TU, Y.; XIONG, Y.; Effect of waste wrapping paper fiber as a “solid bridge” on physical characteristics of biomass *pellets* made from wood sawdust. **Applied Energy** xxx (2012) xxx–xxx, 2012.
- LEE, S. M.; AHN, B. J.; Choi, D. H.; HAN, G.; JEONG, H. S.; AHN, S.H.; YANG, I.; Effects of densification variables on the durability of wood *pellets* fabricated with *Larixkaempferi C.* and *Liriodendron tulipifera L.* sawdust. **Biomass Bioenerg**, v. 48, p. 1-9, 2013.
- LEHMANN, B; SCHRODER, H.W.; WOLLENBERG, R.; REPKE, J.U.; Effect of miscanthus addition and different grinding processes on the quality of wood *pellets*. **BioMass and bioenergy**, v. 44, p. 150-159, 2012.
- LEHTIKANGAS, P.; Quality properties of pelletised sawdust. **Biomass and Bioenergy**, v. 20, p. 351-360, 2001.
- LI, H.; LIU, X.; LEGROS, R.; BI, X. T.; LIM, C, J.; SOKHANSANJ, S.; pelletization of torrefied sawdust and properties of torrefied *pellets*. **Applied Energy**, v. 93, p. 680-685, 2012.
- LJUNGBLOM,L.; Bioenergy International: *pellets* are so hot. Stockholm: 17 ed., n.6, 28p, 2005.
- MANZANO-AGUGLIARO, F.; ALCAYDE, A.; MONTOYA, F. G.; ZAPATA-SIERRA, A.; GIL, C.; Scientific production of renewable energies world wide: An overview. **Renewable and Sustainable Reviews**, v. 18, p. 134-143, 2013.

MAPA – Ministério da Agricultura e Pecuária. 2011. Information available at www.agricultura.gov.br.

MARAVÉ, A.G.; POPOV, V.; ZAMORANO, M.; A review of Europa standards for *pellets* quality. **Renewable Energy**, v. 36, p. 3537 – 3540, 2011.

MORAIS, Rafael F. **Manejo do Nitrogênio e Emissão de Gases de efeito Estufa na Produção de Capim-Elefante para Bioenergia**. 2011, 88f. Tese (Doutor em Ciência) – Programa de Pós Graduação em Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2011, Seropédica.

MONTANHER, Silvana F. **Utilização da biomassa de bagaço de laranja como material sorvente de íons metálicos presentes em soluções aquosas**. 2009, 135f. Tese (Doutor em Ciências) – Programa de Pós Graduação em Química, Universidade Estadual de Maringá, 2009, Maringá.

MURRAY, G.; Estimated global wood *pellet* production 2009. Prince George, BC: **Wood pellet Association of Canada**, 2010.

NIELSEN, N.P.K.; GARDNER B, D.J.; FELBY, C.; Effect of extractives and storage on the pelletizing process of sawdust. **Fuel**, v. 89, p. 94–98, 2010.

OLIVEIRA, L. F.; TOSATO, P. G.; RIBEIRO, M. F.M.; FONSECA, B. E.; CARVALHO, A. G. S.; CORREA, J. L. G.; Secagem de bagaço de cana obtido em duas condições diferentes de teor de umidade. **Anais do XIX congresso de pós-graduação da UFLA**, 2010

OBEMBERGER, I.; THEK, G.; 2010. The *pellet* Handbook - The production and thermal utilisation of biomass *pellets*. Washington DC: Earthscan. 2010.

PANWAR, N.L.; KAUSHIK, S.C.; KOTHARI, S.; Role of renewable energy sources in environmental protection a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15 p. 13–24, 2011.

PAREIRA, Consuelo L. F. **Avaliação da sustentabilidade ampliada de produtos agroindustriais. Estudo de caso: Suco de laranja e etanol**. 2008, 268 f. Tese (Doutor em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

PELLEGRINI, Maria C. **Inserção de Centrais Cogeneradoras a Bagaço de Cana no Parque Energético do Estado de São Paulo: Exemplo de Aplicação de Metodologia para Análise dos Aspectos Locacionais e de Integração Energética**. 2002. 168 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Interunidades de Pós - Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

PEREIRA, Consuelo de Lima Fernandez. **Avaliação da Sustentabilidade Ampliada de Produtos Agroindustriais. Estudo de caso: Suco de Laranja e Etanol**. 2008. 268 f. Tese (Doutor em Engenharia de Alimentos) – Departamento de Engenharia de Alimentos, Universidade de Engenharia de Alimentos, Campinas, 2008.

Pellet Fuels Institute –PFI. Standard Specification for Residential/Commercial Densified Fuel. USA, 2011.

PIRRAGLIA, A.; GONZALES, R.; SALONI, D.; DENIG, J.; Technical and economic assessment for the production of torrefied ligno-cellulosic biomass *pellets* in the US. **Energy Conversion and Management**, v.666, p. 153-164, 2013.

RAKOS, Christian. Current Developments & Potential of *pellets* from a European Perspective. In: **pro pellets**, Áustria, 2007.

RASGA, R. O. S.; **pellets de madeira e sua viabilidade econômico-financeira na substituição do óleo BPF-A1 em pequenos e médios consumidores no Estado de São Paulo 2013**. 2013, 165 f. Dissertação (Mestre em Agroenergia) - Escola de Economia de São Paulo da Fundação Getúlio Vargas, 2013, São Paulo.

RABIER, F.; TEMMERMAN, M. I.; BOHM, T.; HARTMANN, H.; Particle density determination of *pellets* and briquettes. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, p. 954-963, 2006.

RELOVAA, I.; VIGNOTEB, S.; LEONA, M.A.; AMBROSIOB, Y.; Optimisation of the manufacturing variables of sawdust *pellets* from the bark of *Pinus caribaea* Morelet: Particle size, moisture and pressure. **Biomass and bio energy**, v. 33, p. 1351–1357, 2009.

REN21. 2011. Renewables Global Status Report. Report available at www.ren21.org.

RICHARDSON, J.; BJORHEDEN, R.; HAKKILA, P.; LOWE, A.T.; SMITH, C.T.; Bioenergy from sustainable forestry: Guiding principles and practice. *Forestry Sciences* v. 71. Kluwer Academic Publishers, 2002, 364p.

ROMO-FERNÁNDEZ, L. M.; GUERRERO-BOTE, V. P.; MOYA-ANEGÓN, F.; World scientific production on renewable energy, sustainability and the environment. **Energy for Sustainable Development**, v. 16, p. 500–508, 2012.

ROOS, J. A.; BRACKLEY, A. M.; The Asian Wood *pellet* Markets. **United States Department of Agriculture Forest Service Pacific Northwest Research Station General Technical Report**. PNW-GTR-861, 2012.

SAIÃO, Maria G. C.; **Implementação de uma Central a Biomassa. Análise de sustentabilidade Ambiental e Econômica**. 2009, 99 f. Dissertação (Mestre em Engenharia do Ambiente) – Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2009.

SERRANO, Diego M. C; **Avaliação do potencial de produção e exportação de pellets combustível no pólo florestal da região sul do Brasil**. 2009, 90 f. Dissertação (Mestre em Planejamento de Sistemas energéticos) – Pós graduação da Faculdade de engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

SILVA, Carla; **pelletes de Acácia deolbata. Uma oportunidade bioenergética?** 2009/2011, 59 f. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica e Gestão Industrial) – Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Viseu, 2011.

SILVA, V. L. M. M.; GOMES, W. C.; ALSINA, O. L. S.; Utilização do bagaço de cana-de-açúcar como biomassa adsorvente na adsorção de poluentes orgânicos. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.2, p. 27-32, 2007.

SILVA, R. L.; JUNIOR, O. M.; Biomassa e Bioenergia: Perspectiva para utilização da combustão da casca de arroz na região de Dourados – MS. Disponível em <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:gCBRN8GLLgUJ:www.renenergyobservatory.org/alfresco/d/a/workspace/SpacesStore/4e9f368b-d31b-45ee-8978-bcbe5f94bc38/BIOMAS1.PDF%3Fguest%3Dtrue+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>> Acesso em 27 jun. 2013.

SOARES, T. S.; OLIVEIRA, A. C.; Uso da Biomassa Florestal na Geração de Energia. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**. Ano IV, número 8, 2006.

STAHL, M.; BERGHEL, J.; Energy efficient pilot-scale production of wood fuel *pellets* made from a raw material mix including sawdust and rapeseed cake. **Biomass and bioenergy**, v. 35, p. 4849-4854, 2011.

STAHL, M.; GRANSTROM K.; BERGHEL, J.; RENSTROM, R.; Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood *pellets*. **Biomass and bioenergy**, v.27 , p. 621-628, 2004.

STAHL, M.; WIKSTROM, F.; Swedish perspective on wood fuel *pellets* for household heating: A modified standart for *pellets* reduce end-user problems.. **BioMass and bioenergy**, v.33, p. 803-809, 2009.

STELTE, W.; HOLM, J. K.; SANADI, A. R.; BORSBERG, S.; AHRENFELDT, J.; HENRIKSEN, U.; Fuel *pellets* from biomass: The importance of the pelletizing pressure and its dependency on the processing conditions. **Fuel**, v. 90, p. 3285 – 3290, 2011.

Swedish standard SS 187120. Biofuels and peat, fuel *pellets*. Classification. Stockholm, Sweden: Swedish Standards Institution; 1998.

TEMMERMAN, M.; RABIER, F.; JENSEN, P. D.; HARTMANN, H.; BOHM, T.; Comparative study of durability test methods for *pellets*. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, p. 964 – 972, 2006.

THEERARATTANANOON, K.; XU, F.; WILSON, J.; BALLARD, R.; MCKINNEY, L.; STAGGENBORG, S.; VADLANI, P.; PEI, Z. J.; WANG, D.; Physical propertieis of *pellets* made from sorghum stalk, corn stover, wheat straw and big bluestem. **Industrial Crops and Products**. v, 33, p. 325 – 332, 2011.

THEK, G; OBERNBERGER, I; Wood *pellet* production costs under Austrian and in comparison to Swedish framework conditions. **Biomass and Bioenergy**. v. 27. P. 671-93, 2004.

TROMBORG, E.; RANTA, T.; SCHWEINLE, J.; SOLBERG, B.; SKJEVRAK, G.; TIFFANY, D. G.; Economic sustainability for wood *pellets* production. A comparative study between Finland, Germany, Norway, Sweden and the US. **Biomass end Bioenergy**, v. 30, p. 1-10, 2013.

UASUF, A.; BECKER, G.; Wood *pellets* production costs and energy consumption under different framework conditions in Northeast Argentina. **Biomass and bioenergy**, v. 35, p. 1357 - 1366, 2011.

UHLIG, Alexandre; **Lenha e carvão vegetal no Brasil: balanço oferta-demanda e métodos para a estimativa do consumo**. Tese (Doutor em Energia) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

VALE, A. T.; BARROSO, R. A.; QUIRINO, W. F.; Characterization of Biomass and Charcoal *Cocos nucifera* L. for Energetic Use. **Biomass and bioenergy**, v. 1, n. 4, p. 365-370, 2004.

WOLF, A.; VIDLUND, A.; ANDERSON, E.; Energy efficient *pellet* production in the forest industry - a study of obstacles and success factors. **Biomass and bioenergy**, v, 30, p. 38 – 45, 2006.