



**Universidade Federal da Paraíba**  
**Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional - CTDR**  
**Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira – DTS**



**ANDERSON ALDELYAN RAMALHO DE SOUSA**

**GASEIFICAÇÃO DE PELLETS DO BAGAÇO DA CANA DE AÇUCAR PARA  
OBTENÇÃO DE ENERGIA LIMPA E DE ALTO PODER CALORIFICO**

**JOÃO PESSOA**  
**SETEMBRO 2019**

**ANDERSON ALDELYAN RAMALHO DE SOUSA**

**GASEIFICAÇÃO DE PELLETS DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR PARA  
OBTENÇÃO DE ENERGIA LIMPA E DE ALTO PODER CALORIFICO**

Trabalho de Conclusão do Curso de Tecnologia em Produção Sucroalcooleira no Centro de Tecnologia e Desenvolvimento Regional da Universidade Federal da Paraíba, como requisito para a Graduação de Tecnologia em Produção Sucroalcooleira.

Orientadora: Prof. Dr. Danielle Christine Almeida Jaguaribe

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

S725g Sousa, Anderson Aldelyan Ramalho de.

GASEIFICAÇÃO DO BAGAÇO DE PELLETS DE CANA DE AÇÚCAR  
PARA A OBTENÇÃO DE ENERGIA LIMPA E DE ALTO PODER  
CALORÍFICO / Anderson Aldelyan Ramalho de Sousa. - João  
Pessoa, 2019.

49 f. : il.

Orientação: Danielle Jaguaribe.

Monografia (Graduação) - UFPB/CTDR.

1. Pellets. 2. Gaseificação. 3. Energia Limpa. I.  
Jaguaribe, Danielle. II. Título.

UFPB/BC

TCC aprovado em 23/08/2019 como requisito para a conclusão do curso de Tecnologia em Produção Sucroalcooleira da Universidade Federal da Paraíba.

**BANCA EXAMINADORA:**

*Danielle Christine Almeida Jaguaribe*

PROF<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. DANIELLE CHRISTINE ALMEIDA JAGUARIBE - (UFPB – Orientadora)

*Erika Gomes*

PROF<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. ERIKA ADRIANA DE SANTANA GOMES - (UFPB – Membro interno)

*Joelma Morais Ferreira*

PROF<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. JOELMA MORAIS FERREIRA - (UFPB – Membro interno)

## **DEDICATÓRIA**

*Este trabalho eu dedico, à memória de meus pais, porque sei que no lugar que estão, sempre estarão olhando para mim.*

## AGRADECIMENTO

*Primeiramente quero agradecer a essa força superior que há no universo e que nos mantém forte para acordar todos os dias e seguir em frente. Quero agradecer a meus pais por terem me colocado no mundo porque sem eles eu não estaria aqui, a minha irmã por ter praticamente me criado, aos amigos que sempre estiveram ao meu lado me incentivando, “é nós F.D.M.”, não poderia deixar de mencionar Dr. Edson Andrade (Vô) o primeiro F.D.M. Doutor, e que com isso sempre foi referência para os mais novos estudarem e ser alguém na vida, ao pessoal do CA de Sucro, local de muito estudo e empenho onde passávamos muito tempo estudando para as provas da vida, sem deixar de mencionar, Elton e Hugo, os amigos que sempre estiveram presente nessa minha caminhada acadêmica, gostaria de agradecer ao pessoal do projeto, Alisson e Luana por ter passado tardes e noites me ajudando nas pelletização, aos técnicos do ctdr e o pessoal que ajudaram com o teste de gaseificação, a Dr<sup>a</sup> Juliana Kelly, que além de ser minha pupila nos piercings, me ajudou muito com esse trabalho, conseguindo as análises de TGA e DSC e tirando várias dúvidas, A Dr<sup>a</sup> Aline Lourenço, que me salvou ajudando com as correções e queria agradecer a todos meus professores que me aturaram durante todo esse tempo, principalmente Dr<sup>a</sup> Joelma que foram vários períodos tentando pagar opera 1, Dr<sup>a</sup> Erika que me fez quebra muito a cabeça nos enigmas que eram as provas dela em opera 2 e a minha orientadora Dr<sup>a</sup> Danielle que apesar de que no início, eu não ter sido um bom aluno, em suprimento, mecânica e transmissão, ela me acolheu como seu orientando e me ajudou e ensinou bastante nessa etapa, vocês, acho com toda certeza, foram de todos os professores, as que durante todo o curso, mais passei tempo em aula, agradeço demais a vocês, só assim consegui aprender bastante.*

*Não mencionei todos porque seria muita gente, mas quero agradecer a todos, de coração, foram muitas histórias e ainda tem muitas outras para serem escritas.*

*Att, Anderson Fuley.*

## RESUMO

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de se estudar a gaseificação de *pellets* a partir do bagaço de cana de açúcar, confeccionados com aglutinantes ativantes, para obtenção de um combustível de alto poder calorífico e energia limpa. Ainda dentro do processo de *pelletização* da biomassa da cana-de-açúcar, foram feitas as caracterizações das principais propriedades físicas, tais como diâmetro, comprimento, altura, umidade e massa específica do produto final. Foi realizado na produção dos *pellets*, o bagaço com a adição da glicerina, líquido residual da produção de biodiesel que foi utilizado para aumentar o potencial ligante entre as partículas, aumentando a sua estabilidade e tendo com isso uma estrutura melhor e mais resistente. Por fim, gaseificação dos *pellets* do bagaço de cana de açúcar, analisando seu poder calorífico através da composição do gás pobre produzido. Além disso realizou-se um estudo comparativo do poder calorífico dos pellets, através de uma análise térmica, utilizando análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC) e a termogravimétrica (TGA). Nesse estudo observou-se que com o processo de *pelletização* houve um aumento da massa por unidade de volume de bagaço de cana de açúcar de 10 vezes, implicando diretamente no aumento do PCI do *pellet* da biomassa em um aumento de 3,6 vezes o PCI do bagaço in natura.

Palavras-chave: Pellets, gaseificação, poder calorífico, bagaço de cana-de-açúcar, caracterização, biomassa.

## **ABSTRACT**

The present work was developed to study the gasification of pellets from sugarcane bagasse, made with activating binders, to obtain a fuel with high calorific power and clean energy. Still within the sugarcane biomass pelletization process, the main physical properties were characterized, such as diameter, length, height, humidity and specific mass of the final product. In the production of pellets, bagasse was made with the addition of glycerin, a residual liquid from biodiesel production that was used to increase the binder potential between the particles, increasing their stability and thus having a better and more resistant structure. Finally, gasification of sugarcane bagasse pellets, analyzing their calorific value through the composition of the produced poor gas. In addition, a comparative study of the calorific power of the pellets was performed through thermal analysis using differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetric (TGA) analysis. In this study it was observed that with the pelletization process there was a 10-fold increase in mass per unit volume of sugarcane bagasse, directly implying an increase of 3.6 times the biomass pellet PCI in the PCI. of fresh bagasse.

**Keywords:** Pellets, gasification, calorific value, sugarcane bagasse, characterization, biomass.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Biomassa após recebimento.....	18
Figura 2 - Moinho de facas utilizado para padronização das partículas.....	18
Figura 3 - Peneiras de base vibratória fazendo a separação granulométrica. ....	19
Figura 4 - Dessecador diminuindo a umidade das amostras. ....	20
Figura 5 - Ruelas de aço envolto de papel alumínio.....	21
Figura 6 - A prensa hidráulica sendo aquecida com o soprador de calor.....	22
Figura 7 - Pellets da biomassa do bagaço da cana-de-açúcar.....	22
Figura 8 - Pellets triturados submetidos a secagem.....	23
Figura 9 - Gaseificador acoplado com um grupo gerador, contendo um motor do tipo Ciclo Otto. ....	25
Figura 10 - Visor do analisador de energia.....	26
Figura 11 - Curva de TG do Pellet. ....	34
Figura 12 - Curva de DSC do Pellet. ....	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físico química e dados de segurança da glicerina.....	15
Tabela 2 - Informações de segurança da glicerina. ....	15
Tabela 3 - Composições dos gases relacionado a potência obtida. ....	27
Tabela 4 - Perda de umidade. ....	29
Tabela 5 - Dados do reator e da gaseificação. ....	32
Tabela 6 - Gases da admissão e do escape. ....	33
Tabela 7 - Valores de temperaturas com respectivos PCI. ....	35
Tabela 8 - Valores da massa consumida e do tempo. ....	36
Tabela 9 - Análises de energia.....	36

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - (Poder calorífico do gás a partir da sua composição.).....	16
Equação 2 - (Massa específica) .....	20
Equação 3 - (Volume).....	23
Equação 4 - (Consumo da biomassa) .....	28
Equação 5 - (Umidade%) .....	29

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	7
1.1. Obetivos .....	8
1.1.1. Objetivo Geral .....	8
1.1.2. Objetivos Específicos .....	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	9
2.1. Gaseificação .....	9
2.2. Breve Histórico da Gaseificação .....	9
2.3. Princípios do Processo de Gaseificação .....	11
2.4. Razões para a escolha da gaseificação .....	12
2.5. O Bagaço de Cana como Resíduo da Indústria Sucroalcooleira .....	12
2.6. Pellets .....	13
2.7. Glicerina .....	14
2.8. Poder Calorífico Superior e Poder Calorífico Inferior .....	15
2.9. Poder Calorífico Inferior do Gás, Determinado a partir de sua Composição .....	16
2.10. Análise Termogravimétrica (TG/DTA e DSC) .....	17
3. MATERIAIS E METÓDOS .....	17
3.1. Preparação da Biomassa .....	17
3.2. Caracterização da Biomassa .....	19
3.2.1. Umidade .....	19
3.2.2. Massa específica .....	20
3.3. Produção dos pellets .....	20
3.4. Caracterização dos pellets .....	22
3.4.1. Umidade .....	22
3.4.2. Massa específica .....	23
3.4.3. Diâmetro, comprimento e altura dos pellets .....	23
3.4.4. Poder calorífico inferior do gás, determinado a partir de sua composição .....	24
3.5. Sistema de Gaseificação .....	24
3.6. Funcionamento do Sistema Gaseificador .....	25
3.7. Banco de Lâmpadas e Analisador de Energia .....	25
3.8. Carga Aplicada ao Grupo Gerador .....	26
3.9. Composição dos Gases Durante o Funcionamento do Gaseificador Grupo Gerador .....	27
3.10. Testes com Gaseificador .....	27
3.11. Análise Termogravimétrica (TG/DTA e DSC) .....	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	28
4.1. Preparação da Biomassa .....	29

4.2.	Caracterização do Bagaço.....	29
4.2.1.	Umidade.....	29
4.2.2.	Massa Específica .....	29
4.3.	Caracterização dos Pellets.....	30
4.3.1.	Umidade.....	30
4.3.2.	Massa específica.....	30
4.3.3.	Diâmetro, comprimento e altura dos pellets .....	30
4.3.4.	Poder calorífico inferior do gás, determinado a partir de sua composição.....	30
4.4.	Testes com Gaseificador .....	31
4.5.	Composição do Gás Pobre Produzido.....	32
4.6.	Análise Termogravimétrica (TG/DTA e DSC).....	33
4.7.	Consumo da Biomassa.....	35
5.	CONCLUSÃO .....	36
6.	SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS .....	37
7.	REFERÊNCIAS .....	37
8.	ANEXO.....	41

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o Brasil apresenta-se no cenário energético o nono maior consumidor de energia do mundo, e com uma demanda por energia elétrica sempre crescente (ENERDATA, 2019). No contexto de matriz energética, considerando o potencial hidráulico do país, a energia hidrelétrica ocupando um papel de destaque, dominando a produção de energia elétrica. Entretanto, considerando a falta de chuvas, a disponibilidade desse recurso acaba por tornar-se instável, trazendo consigo, o acionamento das termoelétricas para auxiliar o suprimento da demanda, maiores índices de poluição, e maiores dificuldades econômicas para o próprio País, com isso, alternativas são necessárias, e o uso de biomassa como fonte de energia apresenta um grande potencial.

A escassez do petróleo é um fato a cada dia mais concreto, e enquanto o preço desse combustível sobe, a busca por energias alternativas se faz ainda mais presente. As energias renováveis se impõem, ganhando cada vez mais mercado. Dentre essas novas alternativas de energia limpa, está a gaseificação da biomassa.

O interesse atual no mundo pela gaseificação de biomassa está baseado na possibilidade de se desenvolver comercialmente a tecnologia que permite diminuir o custo do kW/h e que tornaria a energia obtida a partir da biomassa competitiva com relação à energia de combustíveis convencionais e sua utilização contribui na melhoria do balanço de CO<sub>2</sub>, de NO<sub>x</sub> e de SO<sub>x</sub> na atmosfera, quando comparado com os combustíveis fósseis.

A gaseificação é um processo de conversão termoquímica que ocorre entre o oxigênio e as substâncias que possuam carbono na sua constituição, em geral biomassa residual (carvão, madeira, bagaço e etc.), para a obtenção de uma mistura de gases denominada gás de síntese ou *syngas* (acrônimo de *synthesis gas*). Nesse processo, o carbono sofre oxidação térmica com o oxigênio utilizado em quantidades inferiores ao estequiometricamente necessário para a sua combustão completa. Por esse motivo, o *syngas* gerado é constituído por componentes gasosos ainda passíveis de combustão, principalmente o hidrogênio (H<sub>2</sub>) e o monóxido de carbono (CO). (REZAIYAN et al., 2005).

Dentre as fontes alternativas de biomassa residual, está o bagaço de cana-de-açúcar. O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, que para cada tonelada de cana produzida, há o excedente de 280 kg de bagaço. É sabido que essa biomassa

excedente possa ser utilizada para a cogeração de energia, através de uma rota de gaseificação (MELO, 2018).

O bioproduto como os pellets torna-se, portanto, uma fonte concentrada e comprimida de material energético. Trata-se de uma lenha ecológica (bioenergética) que substitui com eficácia o gás, a energia elétrica, o carvão vegetal e mineral e a lenha, bem como outros combustíveis utilizados nos diversos processos industriais (SILVA, 2017).

Os *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar são potenciais substitutos da lenha em muitas aplicações, incluindo o uso residencial, estabelecimentos comerciais como olarias, cerâmicas, padarias, pizzarias, laticínios, fábricas de alimentos, indústrias químicas, têxteis e de cimento dentre outros (SILVA, 2017), inclusive, podendo tornar a indústria sucroalcooleira autossustentável.

Os *pellets* resultantes da compactação do bagaço de cana são utilizados na geração de energia na forma de calor ou eletricidade. Os *pellets* apresentam massa específica entre 650-1200 kg/m<sup>3</sup>, diâmetro de aproximadamente 60 mm e comprimento de 25 a 300 mm. Dispõe de um Poder Calorífico Superior (PCS) de 4.043,098 a 4.216,060 kcal/kg e umidade entre 7 e 12% (ROCHA, 2014).

Estudos anteriores (MELO, 2018) demonstraram que com a compactação, a sua massa específica aumenta em mais de 300%, o que obviamente, induz a um aumento no poder calorífico em relação ao bagaço *in natura*.

Esse estudo, foi realizado no Laboratório de Tecnologia em Produção Sucroalcooleira-CTDR da Universidade Federal da Paraíba, foi conduzido no sentido de adequar a produção dos *pellets* de bagaço de cana-de-açúcar, caracterizando as principais propriedades físicas, tais como: diâmetro, comprimento, umidade, quantidade de aglutinante por massa (ml/g) e massa específica da matéria prima e do produto final. Por fim, o estudo de poder calorífico dos *pellets*, e análise de gás, através da gaseificação da biomassa, foi efetuado no Campus I, no Laboratório de Inovações e NPE - Lacom.

## **1.1.Obetivos**

### *1.1.1. Objetivo Geral*

O principal objetivo desse Trabalho de Conclusão de Curso é avaliar o gás combustível, oriundo da combustão parcial dos *pellets* de bagaço de cana de açúcar, em

um gaseificador, acoplado com um grupo gerador, contendo um motor do tipo Ciclo Otto, para assim analisar o seu potencial como produtor de energia alternativa.

### 1.1.2. *Objetivos Específicos*

- Adequação da produção dos *pellets* de bagaço de cana de açúcar.
- Caracterização das propriedades físicas dos *pellets*, tais como, umidade, dimensões e massa específica.
- Avaliar o poder calorífico dos *pellets* em relação ao bagaço *in natura*.
- 

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Gaseificação

Segundo LORA et al., 2012, o processo de gaseificação diz respeito à obtenção de gás pobre proveniente da conversão termoquímica de um material sólido ou líquido, através da oxidação parcial a altas temperaturas. Essas reações geralmente tomam lugar entre 800 e 1100°C. Por não permitir oxidação completa do carbono e do hidrogênio presentes, a gaseificação é entendida como um processo “intermediário” entre a pirólise e a combustão, proporcionando a origem de outros compostos como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>. E esses, por sua vez, são combustíveis.

A mistura de gás assim produzida é conhecida por gás de baixo poder calorífico, gás pobre ou manufaturado. O processo é, também, considerado como sendo resultante de uma combustão parcial da biomassa, uma vez que o volume de ar, ou mais precisamente o oxigênio, utilizado é inferior aquele necessário para a queima completa da biomassa. Assim, nos processos de gaseificação a matéria orgânica é total ou parcialmente transformada em gases, cujos principais componentes são: CO (monóxido de carbono), CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), H<sub>2</sub> (hidrogênio) e, dependendo das condições de operação, CH<sub>4</sub> (metano) e hidrocarbonetos leves, ou seja, gases combustíveis (REED e DAS, 1988).

### 2.2. Breve Histórico da Gaseificação

Em Londres, foi originada a gaseificação de combustíveis sólidos, em uma fábrica de carvão, no século XVIII (REED, 1981), o intuito era de realizar a iluminação pública. O hidrogênio, o metano e o monóxido de carbono, eram os principais gases produzidos e é partir daí que se inicia o desenvolvimento da técnica de gaseificação para a produção de gases combustíveis.

Na Alemanha surgiu o primeiro gaseificador no ano de 1839 pelo químico Karl Gustav Bischof. A companhia Siemens, fez modificações no projeto em 1857 e este foi utilizado por toda Europa nos 100 anos seguintes. Descoberto em 1859 o primeiro poço de petróleo nos Estados Unidos, pelo norte-americano coronel Edwin Laurentine Drake. A partir daí começa-se a produzir querosene, derivado do petróleo, e que por longos anos foi utilizado para a iluminação pública, diminuindo assim o emprego dos gaseificadores para este fim. Foi em 1861 na Alemanha onde surgiu o primeiro gaseificador de porte industrial, construído pelos irmãos Siemens. Em 1880 foi desenvolvido na Inglaterra um projeto para a remoção do alcatrão e cinzas geradas pelo gás e outros projetos para a limpeza e resfriamento do gás. Neste mesmo período, o petróleo surge como opção de combustível industrial, o qual contribuiu para o desinteresse nos gaseificadores. Em 1930 o surgimento das linhas de distribuição de gás natural e a larga utilização dos combustíveis derivados de petróleo, fez com que as plantas que produziam gás a partir dos gaseificadores nos países industrializados, fossem desativadas. Com isso, o preço dos derivados de petróleo era demasiadamente atrativo. A escassez de combustíveis e conseqüentemente a busca por novas alternativas energéticas teve seu início na Segunda Guerra Mundial, em 1939, resultando no ressurgimento das atividades de desenvolvimento e implantação de gaseificadores (WILTGEN FILHO, 1981). É durante esse período que foram desenvolvidas técnicas de conversão de motores de ignição, para operarem com gás combustível produzidos em pequenos gaseificadores denominados de gasogênios.

Segundo LORA et al (2004), a técnica mais adequada, para produzir energia elétrica a partir de biomassa, usando gaseificadores, é através da utilização de motores de combustão interna. Sugere, ainda, que os gaseificadores sejam do tipo concorrente, por gerar gás com menor teor de alcatrão. Lora e Andrade (2004) também, verificaram que a biomassa no Brasil possui um potencial térmico de geração de eletricidade de 27 GW. Apontam, ainda, que dentre as tecnologias para a conversão da energia contida na biomassa em eletricidade a gaseificação é a mais promissora.

### 2.3.Princípios do Processo de Gaseificação

Há muitas formas de conversão de biomassa em energia. A forma mais eficiente de tornar a energia química da biomassa disponível, no entanto, é através da produção de gases, quer seja através de processos bioquímicos (fermentativos), ou de processos termoquímicos (gaseificação).

A gaseificação basicamente envolve, quatro processos:

- Secagem da biomassa
- Pirólise (desvolatilização ou decomposição térmica)
- A combustão parcial
- A gaseificação

No processo de gaseificação ocorre uma oxidação parcial da biomassa do bagaço da cana-de-açúcar, produzindo como o principal produto o gás de síntese ( $H_2 + O_2$ ).

A principal diferença entre um processo de combustão típico e o de gaseificação é justamente os produtos que se originam a partir da gaseificação. Enquanto a gaseificação é realizada com carência de oxigênio, a combustão, para ser completa, é realizada com excesso de ar e, portanto, excesso de gás oxigênio. O gás de síntese gerado, sob as condições de pressão e temperaturas adequadas, bem como a utilização do catalisador apropriado, conduz a reação para a produção de etanol de segunda geração e de álcoois superiores. Uma composição típica do gás de síntese, é composta por CO e  $H_2$  (SÁNCHEZ, 2010).

Por outro lado, um reator de gaseificação é facilmente construído e gera um gás pobre com baixo teor de alcatrão em sua composição (GROENEVELD E SWAAIJ, 1980; SIVAKUMAR et al, 2013). A pirólise para a liberação dos produtos voláteis é o primeiro estágio da produção do gás através da biomassa (DI BLASI, 2009). O segundo estágio é a conversão do carvão residual, que apresenta uma reação muito mais lenta do que a sua precedente e isso, influencia na eficiência global de gaseificação (SIVAKUMAR et al, 2013). Para facilitar a compreensão de todo esse fenômeno, é necessário lembrar que:

1. Combustíveis sólidos são meios porosos que contêm umidade;
2. A combustão se inicia quando a chama dentro do reator eleva a temperatura da partícula de fluido, para a temperatura de reação;
3. A umidade e outros compostos voláteis evaporam das partículas, e quando todo o vapor se evapora, acontece o final do processo de secagem, causando um encolhimento dos poros do combustível, dando origem às seguintes consequências:

a) a uma certa razão de aquecimento, a elevação da pressão dentro dos poros pode causar colapso das partículas- (CETIN et al, 2004).

b) apesar da etapa de secagem ser influenciada pela umidade e conteúdo de cinzas, depende de algumas propriedades físicas, tais como: tamanho das partículas de combustível, difusividade térmica, coeficiente de transferência de calor, capacidade térmica e condutividade térmica. Sendo a condutividade térmica responsável pela evaporação no interior do combustível.

c) A etapa de pirólise está relacionada com os processos térmicos, físicos e químicos.

Considerando a complexidade desse fenômeno, uma melhor descrição da pirólise pode ser dada em termos da penetração do calor no material, com uma elevação de temperatura na superfície do sólido. No momento que a biomassa se torna mais quente, o calor vai se propagando, além do ponto de ignição e para o exterior da biomassa também. Por outro lado, a decomposição pirolítica supera o material volátil que sustentam a combustão (LEWELLEN et al, 1977).

#### **2.4.Razões para a escolha da gaseificação**

- Maior gama de produtos, além da alta eficiência energética.
- O gás pode processar os 100% de todo o bagaço e palha da usina.
- Tem potencial para larga escala industrial.

#### **2.5.O Bagaço de Cana como Resíduo da Indústria Sucroalcooleira**

A biomassa do bagaço da cana-de-açúcar vem sendo utilizado no Brasil em uma larga escala para geração de vapor, eletricidade e geração de calor entre suas principais aplicações, sendo um subproduto da extração do caldo nas usinas de produção de álcool e açúcar. Tendo em vista, a elevada produção deste produto e sua implantação de novas usinas, observa-se um aumento considerável da demanda do mercado brasileiro e mundial por este produto. Assim, a biomassa da cana-de-açúcar torne-se o principal resíduo agrícola do país, especialmente quando se refere a utilização de biomassa para geração de energia (BACCI e SANTOS, 2008) e da quantidade produzida da cana-de-açúcar aproximadamente 30% do peso viram resíduos chamado bagaço (SILVA, GOMES E ALSINA, 2007). Considerando a safra de cana-de-açúcar no período de 2018/2019 no Brasil, foram moídas mais de 620 milhões de toneladas, estimando o grande potencial da

utilização desta biomassa, sabendo que certas quantidades são utilizadas para a produção de álcool e açúcar na cogeração de vapor e energia elétrica (UNICA, 2019). Fazendo uma comparação do conteúdo energético de uma tonelada de cana-de-açúcar 1.718.000 kcal, com potencial energético de um barril de petróleo que é de 1.386.000 kcal, o que é que vale energeticamente uma tonelada de cana-de-açúcar a 1,24 barris de petróleo bruto. Considerando a safra de produção de 2018 até o presente momento, corresponde a 620 milhões de toneladas, estipula-se que equivalentes energéticos corresponde a 768,8 milhões de barris de petróleo (NOVACANA, 2019).

Devido a sua grande quantidade disponível no Brasil, sendo um dos maiores produtores mundiais da cana-de-açúcar, o processo de *pelletização* surge como alternativa para a devida destinação deste subproduto, tendo a capacidade de compactar a biomassa residual da cana-de-açúcar com propriedades mais atraente e vantagens no requisito do poder calorífico, transportes e destinação de resíduos industriais (WOLF, VIDLUND e ANDERSON, 2006; CARONE, PANTALEO e PELLERANO, 2011; STAHL e BERGHEL, 2011).

O bagaço de cana, in natura, resultante do processo de moagem, apresenta aproximadamente 50% de umidade e massa específica de 120 kg/m<sup>3</sup>. O PCI bagaço nessas condições é da ordem de 3.100 a 4.400 kcal/kg (Petrobrás,1982).

## **2.6.Pellets**

O processo de produção de *pellets* é chamado de *pelletização*, uma das alternativas tecnológicas para o melhor aproveitamento dos resíduos de biomassa da cana-de-açúcar, consistindo num processo de trituração e compactação que utiliza pressões elevadas para transformar os resíduos em compactos denominados de *pellets*, os quais possuem um maior poder calorífico, massa específica e menor umidade, resultando em um melhor potencial de geração de calor (energia) em relação aos resíduos in natura (ALVES JUNIOR e GUIMARÃES, 2003).

Uma grande vantagem da *pelletização* é a permanência das características e propriedades do produto após longos períodos, uma vez que o bagaço é *pelletizado*. Os pellets fornecem um maior controle na queima e calor gerado por unidade de tempo nas caldeiras, quando usados como combustíveis.

A massa específica da biomassa deve ser levada em consideração quando o objetivo é aumentar os resultados de um processo de gaseificação. Na verdade, é notório

que o aumento da massa específica de um material influencia na sua cinética química, e também nas correlações de transporte de calor e massa, como uma ferramenta necessária para auxiliar na etapa da pirólise (JAMES et al, 2016; SHIN et al, 2000; HERMÁNDEZ et al, 2010). Huff, (2012), demonstrou a importância do tamanho, forma geométrica, massa específica, umidade e temperatura do reator.

## **2.7.Glicerina**

O biodiesel é uma fonte de energia limpa, renovável e vem sendo cada vez mais aplicado como fonte energética, devido ao aumento da sua produção, vai ocorrer um exagero de glicerina no mercado mundial, considerando que ela representa cerca de 10% do resíduo formado na reação de transesterificação do biocombustível. A transesterificação é um dos processos para a produção do biodiesel, que é baseado em uma reação química que, resumidamente, é a uma reação de um óleo vegetal com um álcool simples, que geralmente é um metanol ou etanol. Essa reação é catalisada por um ácido ou uma base, podendo ser utilizado o hidróxido de sódio ou hidróxido de potássio (NaOH ou KOH). Contudo nessa reação, as principais moléculas dos óleos e gorduras, são os chamados triacilgliceróis, que se dividem em ácidos graxos e glicerina (LARSEN, 2009)

Em seguida na Tabela 1, vamos mostrar algumas propriedades físico química e dados de segurança da glicerina. Na Tabela 2, algumas informações de segurança da glicerina.

Tabela 1 - Propriedades físico química e dados de segurança da glicerina.

Produto: Glicerina	
Ph	Ca. 5 em 100 g/L 20°C
Ponto de fusão	18°C
Ponto/intervalo de ebulição	290°C em 1.013 hPa – Decomposição
Ponto de fulgor	199°C – Método: c.c
Taxa de evaporação	Dados não disponíveis
Inflamabilidade (sólido, gás)	Dados não disponíveis
Limite inferior de explosividade	2,6% (V)
Limite superior de explosividade	11,3% (V)
Pressão do vapor	< 0,001 hPa em 20 °C
Densidade relativa do vapor	3,18

Fonte: CROMOLINE (2019)

Tabela 2 - Informações de segurança da glicerina.

Produto: Glicerina	
Densidade	1,26 g/cm <sup>3</sup> em 20 °C
Densidade relativa	Dados não disponíveis
Solubilidade em água	em 20 °C – Solúvel
Coefficiente de partição (n-octanol/água)	log Pow: -1,76
Temperatura de autoignição	Dados não disponíveis
Temperatura de decomposição	> 290 °C
Viscosidade, dinâmica	1.412 mPa.s em 20 °C
Riscos de explosão	Não classificado como explosivo
Propriedades oxidantes	Não
Ponto de sublimação	Não aplicável
Temperatura de ignição	400 °C
Densidade aparente	Dados não disponíveis
Corrosão	Dados não disponíveis

Fonte: CROMOLINE (2019)

## 2.8.Poder Calorífico Superior e Poder Calorífico Inferior.

A quantidade de energia liberada por unidade de massa ou volume de combustível é denominada de poder calorífico e é uma característica de cada combustível. A partir desta definição, surgem duas outras definições: Poder Calorífico Superior e Poder Calorífico Inferior.

O poder Calorífico de um combustível é a quantidade de energia, na forma de calor, liberada durante sua combustão completa, por unidade de massa, ou de volume. Caso esta quantidade de energia inclua o calor liberado pela condensação da água formada durante a combustão, o poder calorífico é chamado de Superior (PCS). Assim, o Poder Calorífico Inferior (PCI) é a energia efetivamente disponível, por unidade de massa, ou de volume após serem deduzidas as perdas com a evaporação da água. (SEGUNDO, 2014).

A diferença entre PCS e PCI é a energia requerida para evaporar a umidade presente no combustível. Esses cálculos utilizam o PCI, pois o calor latente referente à evaporação da umidade do combustível, não é aproveitável nos processos térmicos (LOTRA e VENTURINI, 2012).

### **2.9. Poder Calorífico Inferior do Gás, Determinado a partir de sua Composição**

Pode-se calcular o poder calorífico do gás combustível,  $PCI_{gáscomp.}$ , em kcal/Nm<sup>3</sup>, produzido no gaseificador através da fórmula empírica de Dulong (Equação 1), em função do percentual de cada composto presente no gás (ITEGAN, 2011).

Equação 1 - (Poder calorífico do gás a partir da sua composição.)

$$PCI_{gáscomp.} = 3050. (\%CO) + 2580. (\%H_2) + 8500. (\%CH_4) + 13500. (\%C_2H_2) + 14050. (\%C_2H_4)$$

Onde:

%CO é o teor em percentual de monóxido de carbono no gás;

%H<sub>2</sub> é o teor em percentual de hidrogênio no gás;

%CH<sub>4</sub> é o teor em percentual de metano no gás;

%C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> é o teor em percentual de etino no gás;

%C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> é o teor em percentual de eteno no gás;

Ainda para a avaliação da simulação de um eventual sistema de gaseificação serão aqui definidos alguns índices para a comparação da energia térmica oriunda apenas da caldeira e potência produzida a partir da gaseificação do bagaço de cana de açúcar (UCHOA *et al*, 2006).

### **2.10. Análise Termogravimétrica (TG/DTA e DSC)**

A análise termogravimétrica (TG/DTA) é uma técnica de caracterização na qual a variação da massa de uma determinada amostra é acompanhada em função da temperatura à qual está submetida, em condição de atmosfera controlada.

A calorimetria exploratória diferencial (DSC) pode ser definida como técnica na qual mede-se a diferença de energia (entalpias) fornecida à substância e a um material referência, em função da temperatura enquanto a substância e o material de referência são submetidos a uma programação controlada de temperatura.

## **3. MATERIAIS E METÓDOS**

A metodologia presente neste trabalho partiu de uma ampla pesquisa, em projetos realizados anteriormente, artigos científicos e biblioteca virtual.

A parte experimental deste trabalho foi dividida em 2 etapas.

1ª etapa: produção e caracterização do bagaço e *pellets*.

Esta etapa foi executada no Laboratório de Tecnologia Sucroalcooleira, Campus I, Unidade Mangabeira, que dispunha de todos os equipamentos, instrumentos e ferramentas necessárias no desenvolvimento de todas as atividades de pesquisa relacionado a produção e caracterização do bagaço e dos *pellets*.

### **3.1.Preparação da Biomassa**

Após a realização da coleta da biomassa do bagaço de cana de açúcar, fizemos a pesagem, como mostra a Figura 1, e logo em seguida, o mesmo foi colocado em uma estufa para ser secado a uma temperatura de 105°C por um período de 24 horas para redução do seu teor de umidade.

Figura 1 - Biomassa após recebimento.



Fonte: Fotos do autor (2019)

Depois de passar pela estufa, foi feito novamente a pesagem para poder obter o teor de umidade, em seguida utilizou-se o moinho de facas mostrado na Figura 2, onde foi feito a moagem do bagaço já seco e pesado uma outra vez, para adquirir padronização das partículas e facilitar sua utilização na produção dos pellets.

Figura 2 - Moinho de facas utilizado para padronização das partículas.



Fonte: Fotos do autor (2019)

Utilizamos 200g de bagaço triturado, onde em seguida passamos em uma peneira de base vibratória como mostra a Figura 3, onde foi feito a separação granulométrica. As peneiras utilizadas foram a de 12 (1,68 cm), 16 (1,18 cm), 20 (0,85 cm), 30 (0,60 cm), 40

(0,43 cm), 50 (0,30 cm) 70 (0,21 cm) e o fundo. Foi usado o bagaço que ficou retido na peneira 30 (0,60 cm) de granulometria no processo.

Figura 3 - Peneiras de base vibratória fazendo a separação granulométrica.



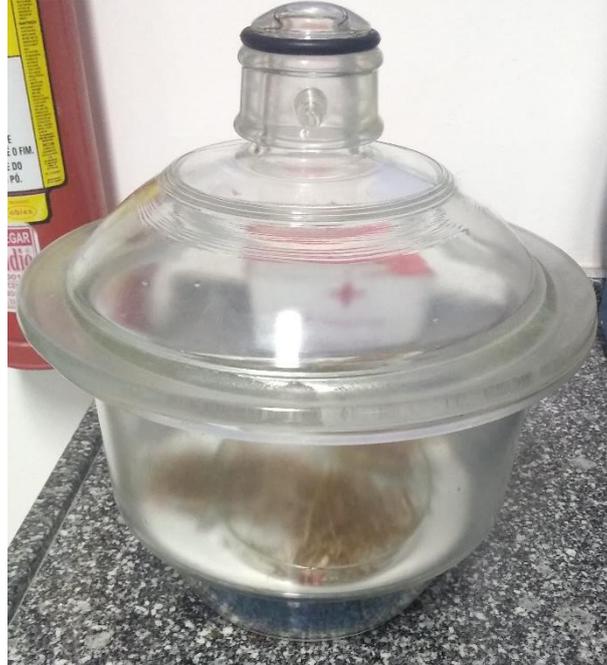
Fonte: Fotos do autor (2019)

## 3.2. Caracterização da Biomassa

### 3.2.1. Umidade

Para calcular a umidade foi feita uma triplicata, onde as 3 amostras com média de 2,02g e foram levadas para a estufa a 105°C por um período de 24hrs para a redução do seu teor de umidade, depois desse período foram retiradas e levadas ao dessecador por 30 min para diminuição da umidade contida nas amostradas como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Dessecador diminuindo a umidade das amostras.



Fonte: Fotos do autor (2019)

Após os 30min no dessecador foram pesadas as 3 amostras, onde obtivemos a quantidade de umidade no bagaço.

### 3.2.2. *Massa específica*

A massa específica do bagaço, conseguimos o volume da biomassa completando um Becker de 250ml com o mesmo, em seguida pesamos e utilizamos a Equação.2 onde obtivemos a massa específica.

Equação 2 - (Massa específica)

$$\rho = m/v$$

### 3.3. Produção dos pellets

Na produção dos *pellets*, foi utilizado uma prensa hidráulica (Figura 6), com o auxílio de um molde cilíndrico de 4,5cm de diâmetro interno e de 17cm altura. Foi utilizado para fazer a divisão dos briquetes dentro do cilindro, 8 ruelas de aço de 3,8cm de diâmetro e 0,3cm de espessura envolto de papel alumínio (Figura 5), com função de manter o calor dado pelo soprador de calor.

Figura 5 - Ruelas de aço envolto de papel alumínio.



Fonte: Fotos do autor (2019)

Utilizamos na produção dos *pellets*, o auxílio de um aglutinante, sendo assim adicionada no bagaço a glicerina, líquido residual da produção de biodiesel que foi utilizado para aumentar o potencial ligante entre as partículas, aumentando a sua estabilidade.

Para o bagaço ser aditivado com glicerina, fizemos vários testes com diferentes medidas de bagaços e glicerina, onde obtivemos um melhor resultado utilizando 60 g de bagaço e 24 ml de glicerina, sendo 2 ml de glicerina a cada 5 g de bagaço. Foi aplicada uma pressão de 2 a 10 kgf.cm<sup>-2</sup> durante 30 min, adicionamos aquecimento com um soprador de calor com faixa de trabalho de 300 a 500°C mostrado na Figura 6.

Figura 6 - A prensa hidráulica sendo aquecida com o soprador de calor.



Fonte: Fotos do autor (2019)

Depois de efetuar os procedimentos descritos anteriormente, os pellets (briquetes) de bagaço aditivado esfriaram durante 5 min. à temperatura ambiente, para assim, serem retirados da prensa hidráulica onde ficam com o aspecto mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Pellets da biomassa do bagaço da cana-de-açúcar.



Fonte: Fotos do autor (2019)

### **3.4.Caracterização dos pellets**

#### *3.4.1. Umidade*

Para calcular a umidade, os pellets com aglutinante foram triturados e três amostras de 5g foram dispostas em placas de petri e levadas para estufa por 2 horas a 105°C, ao término desse tempo as amostras foram levadas ao dessecador (Figura 8) por 10min para posterior pesagem. Este processo foi repetido três vezes, intercalados por 30min de estufa a 105°C. Ao término as amostras foram levadas ao dessecador por 10min e foi feita a pesagem até ser estabilizado o peso, tendo assim a diminuição da umidade contida nas amostradas.

Figura 8 - Pellets triturados submetidos a secagem.



Fonte: Fotos do autor (2019)

#### 3.4.2. *Massa específica*

A massa específica de cada *pellet* foi calculada medindo a massa sobre o volume que ele ocupa, pesamos o *pellet* e calculamos o seu volume (Equação 3) e depois utilizamos a Equação 2.

Equação 3 - (Volume)

$$V = \pi \times (R)^2 \times h$$

#### 3.4.3. *Diâmetro, comprimento e altura dos pellets*

O diâmetro dos *pellets* é imposto pela matriz de *pelletização*. As variações no comprimento e altura dos *pellets* podem ocorrer, por esse motivo foram efetuadas medições de comprimento, altura e do diâmetro de alguns *pellets*.

#### 3.4.4. Poder calorífico inferior do gás, determinado a partir de sua composição.

Calculou-se, o poder calorífico do gás combustível produzido no gaseificador, PCI<sub>gáscomp.</sub>, em kcal/Nm<sup>3</sup>, através da fórmula empírica de Dulong (Equação 1), em função do percentual de cada composto presente no gás.

2ª etapa: Análises de gases no gaseificador e a análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC) e a termogravimétrica (TGA)

A etapa final desse trabalho foi realizada no Laboratório de Inovações Tecnológicas onde se encontra o gaseificador para a realização de todas as análises correlacionadas, e no NPE – Lacom, para a análise de calorimetria exploratória diferencial (DSC) e a termogravimétrica (TGA) ambos laboratórios na UFPB, Campus I.

### 3.5.Sistema de Gaseificação

O gaseificador usado nesse trabalho (Figura 9) foi de 4 kW/t importado da Índia, do tipo concorrente (downdraft) (corrente descendente), com agente de gaseificação a ar, de topo aberto, acoplado com um grupo gerador, contendo um motor do tipo Ciclo Otto, foi alimentado com resíduos da biomassa (*Pellets*), de 1 kW de geração elétrica nominal. Por causa do seu porte pequeno, sua aplicação é para uso doméstico tendo a finalidade de geração de energia térmica ou geração de energia elétrica.

Figura 9 - Gaseificador acoplado com um grupo gerador, contendo um motor do tipo Ciclo Otto.



Fonte: Fotos do autor (2019)

### 3.6. Funcionamento do Sistema Gaseificador

É produzido o gás de síntese a partir de um tratamento termoquímico do *pellet* e componentes de gases no interior do reator. Através de um lavador de Venturi, o gás é succionado, o que estabelece uma queda de pressão no reator e assim pelos furos laterais há uma entrada de ar atmosférico. A partir do topo do reator, que se dá o consumo da biomassa, onde desce por ação da gravidade à medida que os *pellets* se reduzem ao gás e cinzas.

### 3.7. Banco de Lâmpadas e Analisador de Energia

Para a verificação da carga elétrica, foi acrescentado ao grupo gerador um banco com 6 lâmpadas de 280-300W com interruptores. Sendo esse banco de lâmpadas acoplado a um analisador de energia portátil HIO KI 31 97, equipamento de análise instantânea de corrente, frequência e voltagem como mostra a Figura 10.

### 3.8.Carga Aplicada ao Grupo Gerador

No funcionamento do motor com gás pobre, para ser adicionado carga, um banco de lâmpadas foi plugado ao painel do gerador. O banco de lâmpadas tinha o analisador de energia que estavam todos ligados por fios elétricos. Ao ser acionado o interruptor de cada lâmpada (280 – 300 W), o grupo gerador estava disponibilizando e o analisador estava fornecendo os valores de potência, voltagem, corrente elétrica e frequência elétrica.

Figura 10 - Visor do analisador de energia.



Fonte: Fotos do autor (2019)

É exigido de cada lâmpada 280 – 300W do grupo gerador sempre na rotação de 1800 rpm e 220V com a frequência de 60 Hz.

Para cada carga adicionada ao grupo gerador, espera o acelerador de carburador não estar totalmente acionado. É preciso de um determinado tempo, para que a mistura gasosa enriqueça pela excitação do reator e o acelerador vai aos poucos fechando. O acelerador tem que está próximo do meio do seu curso, indicando que a mistura gasosa é suficiente para adicionar mais uma carga. Em contrapartida, o de estar totalmente acelerado, o motor desliga, pois já é previsto que ao adicionar carga há uma abertura da posição do acelerador na exigência de um maior fluxo de combustível.

### 3.9. Composição dos Gases Durante o Funcionamento do Gaseificador Grupo Gerador

Foi obtido a composição de gases de maior interesse para a potência (Tabela 3) através do analisador de gases. Dentre elas, a porcentagem volumétrica de: CO, CO<sup>2</sup> e O<sup>2</sup> na saída do gaseificador (%CO, %CO<sub>2</sub> e %O<sub>2</sub>), CO, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> na saída do escapamento do motor (%CO<sub>esc</sub>, %CO<sub>2esc</sub> e %O<sub>2esc</sub>), Tomamos também os valores de lambda na saída do gaseificador e do escapamento

Tabela 3 - Composições dos gases relacionado a potência obtida.

Potência (kWe)	%CO	%CO <sub>esc</sub> .	%CO <sub>2</sub>	%CO <sub>2esc</sub>	%O <sub>2</sub>	%O <sub>2esc</sub>	Lambda	Lambda esc.
0,28	19,59	0,86	10,10	18,00	0,59	3,76	0,67	1,12

Fonte: Autor (2019)

### 3.10. Testes com Gaseificador

Para aplicação no gaseificador foram confeccionados *pellets* de bagaço de cana de açúcar, dimensionando-se esse material no tamanho e forma desejados.

Os testes com o gaseificador foram conduzidos em cooperação com alunos de doutorado do Laboratório de Inovações. O objetivo foi realizar as análises das composições do gás pobre, consumo de biomassa e potência elétrica gerada.

O consumo de biomassa (Equação 4) foi feito com uso de um cronômetro e uma balança digital. A medição procedia da seguinte forma:

1. Encher de biomassa o reator;
2. Pesar uma quantidade, já prevista;
3. A uma dada potência (lâmpada) adicionada, espera 5 minutos consumindo biomassa;
4. Pesar o restante, e subtrair da massa que continha na etapa 2.

Equação 4 - (Consumo da biomassa)

$$C_{bio} = \frac{M_{ad}}{t}$$

Onde:

$C_{bio}$  = Consumo da biomassa (*Pellets*)

$M_{ad}$  = Massa adicionada

$t$  = Tempo em que a massa foi consumida no gaseificador (h).

A partir do processo foi obtido o consumo em referente a potência. Para a análise dos gases da gaseificação e da saída do escapamento foi utilizado o equipamento Discovery G4 da Alfatest, constituído de quatro componentes: central de análise eletrônica e sonda.

### 3.11. Análise Termogravimétrica (TG/DTA e DSC)

O equipamento empregado para realizar as análises termogravimétricas foi uma termobalança TGA/SDTA-EQ-028 (Shimadzu) com os cadinhos de alumínio, e os resultados foram obtidos na forma de um termograma. Para estudar a temperatura de calcinação dos precursores hidratados, a vazão do gás de tratamento ( $N_2$ ) foi mantida em 50 ml/min. A faixa de temperatura da análise se encontrou entre a temperatura ambiente e 900°C.

As análises de calorimetria diferencial de varredura (DSC) foram realizadas em um equipamento DSC-060 (Shimadzu). As áreas integradas das bandas foram obtidas utilizando o software *FIAK FIT*, com o auxílio de Gaussianas.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Mostraremos na presente sessão os resultados experimentais do poder calorífico e a obtenção de energia limpa realizados no gaseificador e através de análises com DSC, TGA e outras análises relacionadas a caracterização do bagaço e dos *pellets*.

#### 4.1.Preparação da Biomassa

Foram obtidos por prensagens, 7 *pellets* de média de 1,51cm por 4cm de diâmetro, utilizando 8 ruelas de aço de 3,8cm de diâmetro e 0,3cm de espessura envoltos de papel alumínio onde assim conseguiu-se retirar de dentro do cilindro da prensa com um tamanho adequado para ser usado no gaseificador.

#### 4.2.Caracterização do Bagaço

##### 4.2.1. Umidade

Ao chegar o bagaço foi feita a retirada de toda a umidade presente no mesmo, onde se encontrava com 83,63% de umidade no bagaço. Na Tabela 4 mostramos a perda de umidade no bagaço.

Utilizamos a Equação 5.

Equação 5 - (Umidade%)

$$U_{\%} = 100x \left( \frac{Pa}{Pms} \right) =$$

$U_{\%}$  = Umidade

$Pa$  = Peso da água

$Pms$  =Peso da massa seca

Tabela 4 - Perda de umidade.

Amostras	Quantidade de bagaço	Pós secagem	Perda (%)
1 <sup>a</sup>	2,02g	1,1g	54,45%
2 <sup>a</sup>	2,03g	1,08g	53,20%
3 <sup>a</sup>	2,02g	1,1g	54,45%
Média	2,02g	1,09g	54,03%

Fonte: Autor (2019)

##### 4.2.2. Massa Específica

A massa específica do bagaço utilizamos a Equação 3, conseguimos o volume da biomassa, completando um Becker de 250ml com a mesma, e em seguida pesamos e obtivemos o seu peso de 15,88g, tendo assim no final do cálculo o valor de 0,063g/cm<sup>3</sup> (63kg/m<sup>3</sup>) de massa específica da biomassa.

### 4.3.Caracterização dos Pellets

#### 4.3.1. Umidade

Obtivemos um teor de umidade de 15,13% um pouco acima do normal, devido ao armazenamento dos *pellets* inadequado, pois a umidade deveria estar entre 10 a 12% (RASGA, 2013).

#### 4.3.2. Massa específica

Obtivemos o volume de 18,97cm<sup>3</sup>, e o peso de 11,99g e assim utilizamos a Equação (3), conseguimos o resultado de 0,63g/cm<sup>3</sup> (630kg/m<sup>3</sup>) de massa específica.

#### 4.3.3. Diâmetro, comprimento e altura dos pellets

Obtivemos a média do comprimento de 16cm, diâmetro de 4cm e altura de 1,51cm.

#### 4.3.4. Poder calorífico inferior do gás, determinado a partir de sua composição.

Calculou-se o poder calorífico do gás combustível, PCI gás comprimido, em kcal/Nm<sup>3</sup>, produzido no gaseificador através Equação (1).

$$\text{PCI gás comprimido} = (3.050 \times 0,1959) + (38.630 \times 0,6972) = 27.530,331 \text{Kcal/Nm}^3$$

O valor do PCI gás comprimido sendo por kg de Pellets =15.767,658Kcal/kg.

Onde:

(0,6972) 69,72% é a porcentagem de hidrocarbonetos nos gases da queima dos pellets no gaseificador.

O poder calorífico do bagaço da cana-de-açúcar *in natura* que é de 2.130,51Kcal/kg e a lenha comercial que é de 3.100,22Kcal/kg (EPE, 2013) houve um aumento significativo quando comparado com o dos pellets que foi de 15.767,658Kcal/kg.

#### **4.4. Testes com Gaseificador**

Segundo DASAPPA (2003), o tamanho da biomassa influi no movimento do material e na qualidade do gás. O tamanho dos pellets deve ser de um sexto a um duodécimo do diâmetro do reator, preferencialmente uma mistura de tamanhos dentro dessa faixa. Acima do limite superior, há formação de gás de baixa qualidade devido à queda de eficiência da volatilização.

Testes anteriores (RUMÃO,2013) demonstraram que a melhor qualidade do gás (teor de CO) e bom fluxo da madeira (sem encalhamentos), foi a de formato cúbico com 20 mm de aresta o que corresponde a 1/7,5 do diâmetro do reator (150 mm), mas o teste foi feito com os pellets em forma cilíndrica, com comprimento de 160mm, diâmetro de 40mm e altura de 15,1mm.

Devido à pouca quantidade (3,392 kg) de pellets da biomassa da cana de açúcar, foi dado início a análise com pellets de madeira, onde foi iniciada a queima no gaseificador até ser estabilizado o motor, esperamos queimar todos os pellets de madeira, para dar início às análises com pellets da biomassa do bagaço. Devido a isso não foi possível obter o teor de cinzas.

Foi utilizado um software adequado que exibe os resultados na tela de um computador e através de uma bomba, o equipamento fez a sucção do gasoso para determinar o volume percentual de CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>

Na Tabela 5 se encontra alguns dados do reator e dos testes com o gaseificador.

Tabela 5 - Dados do reator e da gaseificação.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valores</b>
Diâmetro interno do reator	150 mm
Diâmetro externo do reator	220 mm
Tamanho e formato da biomassa	15,1 mm de altura e 40mm de diâmetro. Formato cilíndrico.
Umidade da biomassa	15,13 %
Volume do leito do reator	9,5 dm <sup>3</sup>
Suporte mássico de biomassa no reator	4,710 kg
Consumo de biomassa	1,746 kg/h
Teor de CO volumétrico, % CO	19,59 %

Fonte: Autor (2019)

Para a simulação da implantação desse sistema de gaseificação com Ciclo Otto, utilizou-se o princípio de conservação da energia aplicado às Primeira e Segunda Lei da Termodinâmica, aplicadas a sistemas abertos e considerando que o sistema ocorre em regime permanente. Além disso, algumas restrições foram impostas: (1) Os processos de compressão e expansão ocorrem de forma adiabática e (2) Os processos de troca de calor nos condensadores, trocadores de calor e na câmara de combustão, ocorrem de maneira isobárica.

Uma vez que se está com os pellets da biomassa do bagaço de cana-de-açúcar como combustível no gaseificador, foi utilizada em função do PCI do Pellets, ou seja, do Poder Calorífico Inferior do Pellets, que significa o calor transferido por 1 kg de Pellets.

#### **4.5.Composição do Gás Pobre Produzido**

Os gases pobres produzidos na admissão são os gases obtidos na saída do gaseificador, onde foi usado como combustível pelo o gerador elétrico.

Após a transformação dos gases oriundos da queima dos pellets em energia elétrica, obtivemos 280w de potência, sendo capaz de acender 1 lâmpada da mesma potência com facilidade.

Os gases que saem do gerador elétrico são os chamados de gases de escape, onde tivemos um aumento de 7,9 % de liberação de CO<sub>2</sub> comparado com a de admissão, como

sendo um dos componentes presentes nas emissões de gases do efeito estufa (GEE), o CO<sub>2</sub> é absorvido, em igual proporção à sua emissão, pelas plantas que dão origem ao combustível, o balanço das emissões de CO<sub>2</sub> consequente da combustão de biomassa é praticamente nulo. Podemos também analisar a diminuição do monóxido de carbono (CO) e dos hidrocarbonetos (HC) como mostra a Tabela 6 a seguir.

Tabela 6 - Gases da admissão e do escape.

Análises de Gases		
Gases	Admissão (%)	Escape (%)
CO	19,59%	0,86%
CO <sub>2</sub>	10,10%	18,00%
HC	69,72%	2,10%
O <sub>2</sub>	0,59%	3,76%
CO Corr.	19,59%	0,86%

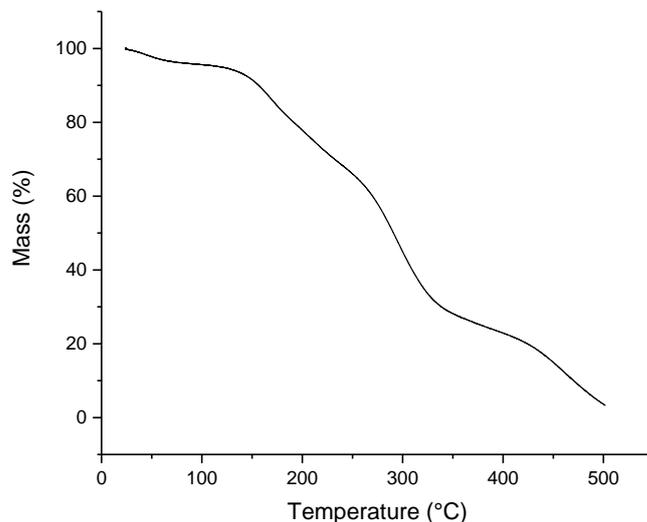
Fonte: Autor (2019)

#### 4.6. Análise Termogravimétrica (TG/DTA e DSC)

A decomposição do pellet de bagaço da cana-de-açúcar mostrou-se estável até cerca de 110°C como mostra na Figura 11., depois desse ponto, houve uma lenta degradação (21%), de massa perdida entre 100 e 200°C, correspondendo à perda de umidade.

Em seguida, a partir dos 270°C, observa-se uma perda de massa mais significativa (57%), referente à perda de matéria orgânica presente na amostra, que vai se acentuando, principalmente entre 400 e 500°C. A perda de massa que ocorre a temperaturas mais altas, pode ser associada à eliminação de celulose e de hemicelulose. A partir dos 450°C, a massa perdida já está em torno dos 90%. Segundo Barnabé (2018), apresenta para esta região de temperatura a eliminação de compostos aromáticos, podendo ser relacionado à eliminação de lignina e a formação de carbono fixo. Ao final da análise, a massa restante era de 3,35% da original.

Figura 11 - Curva de TG do Pellet.

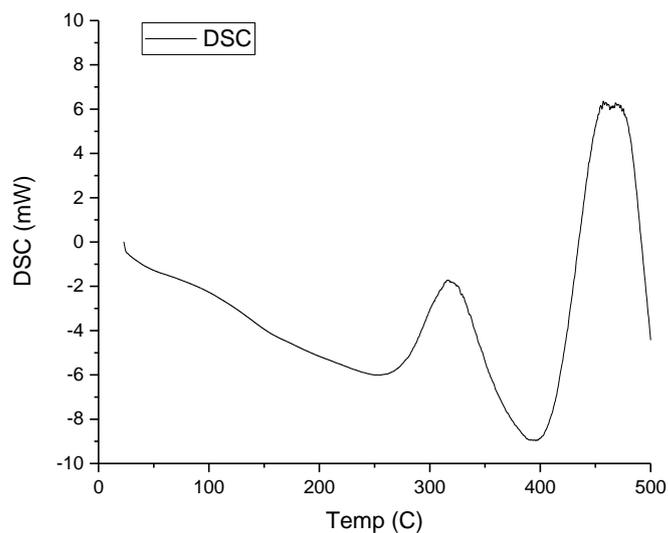


Fonte: Autor (2019)

Utilizou-se a técnica de DSC para medir o PCI, em Kcal/Kg, do combustível pellet de bagaço da cana-de-açúcar, afim de comparar com o obtido através da gaseificação. O PCI de um combustível é uma medida efetiva da energia liberada ou absorvida pelo processo, por isso, mais facilmente aplicado na prática.

A Figura 12 exibe o gráfico de DSC para mostrar onde pode-se verificar a presença de dois picos exotérmicos. O cálculo do PCI foi feito, integrando-se a área sobre os picos, com o auxílio do software *PIAK FIT*. A área equivalente à energia em mW, foi dividida pela razão de aquecimento e massa da amostra em (mg) obtendo-se o PCI em mW/mg. Posteriormente, os valores foram convertidos a Kcal/Kg para comparação da energia liberada pela biomassa, em forma de gás pobre. A Tabela 7, exibe os valores de temperatura, com respectivos PCI.

Figura 12 - Curva de DSC do Pellet.



Fonte: Autor (2019)

Tabela 7 - Valores de temperaturas com respectivos PCI.

Pico	Temperatura (°C)	PCI (Kcal/Kg)
1	326,88 °C	4.930,69 Kcal/Kg
2	464,66 °C	14.777,72 Kcal/Kg

Fonte: Autor (2019)

Nota-se que o valor de energia equivalente ao segundo pico, é muito semelhante ao obtido através da gaseificação, 15.000 Kcal/Kg, divergindo em 6,24%.

#### 4.7. Consumo da Biomassa

O cálculo do consumo de biomassa no gaseificador, foi feito através do preenchendo do reator com uma quantidade da biomassa, e de imediato acionava-se o cronômetro.

Ao final, os valores da massa consumida e do tempo foi registrado como mostra na Tabela 8 e através da Equação 4, foi calculado o consumo de 4,72kg/h.

Na Tabela 9 temos as análises de energia, onde mostra a potência, voltagem, amperagem e hertz gerados pelos gases oriundos da biomassa pellets.

Tabela 8 - Valores da massa consumida e do tempo.

Peso inicial (kg)	Peso final (kg)	Massa adicionada (kg)	Tempo (h)
3,392 kg	1,646 kg	1,746 kg	0,37 h

Fonte: Autor (2019)

Tabela 9 - Análises de energia.

Potência (W)	Voltagem (VOLT)	Amperagem (A)	Hertz (Hz)
280W	232.5 V	1.2 A	61.14 Hz

Fonte: Autor (2019)

## 5. CONCLUSÃO

Tendo em vista que a massa específica é um parâmetro de grande influência no PCI da biomassa, a primeira parte desse trabalho foi dedicado a adequação da confecção dos *pellets* de bagaço da cana-de-açúcar. De fato, com a compactação, houve um aumento de massa específica em 10 vezes, o que implicou diretamente no aumento do PCI daquela biomassa.

Outro importante parâmetro estudado foi a umidade *pellets*, apesar de todo o trabalho de desumidificação pré-teste, no momento do experimento os *pellets* continham 15,13% de umidade, o que interferiu negativamente no teste de gaseificação, apesar de tudo, obteve-se um PCI no valor de 15.767 Kcal/Kg, ou seja equivalente a cerca de 3,6 a 5,1 vezes maior que o PCI do bagaço in natura.

A técnica de DSC também foi empregada para avaliar o PCI da biomassa utilizado, sendo o resultado obtido de 14.777,72 Kcal/Kg, resultado muito semelhante ao da gaseificação, divergindo apenas em 6,24%.

Foi possível atingir ao menos 280W de potência a partir dos gases do gaseificador, uma vez que uma das lâmpadas acopladas ao sistema gerador foi acesa. Diante do exposto, conseguiu-se mostrar que é possível a obtenção de energia elétrica, em um gaseificador de pequeno porte, e utilizando-se pellets de bagaço da cana-de-açúcar como combustível.

## **6. SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS**

- Testar com diferentes tamanhos de pellets de bagaço de cana-de-açúcar, verificando a qualidade do gás pobre, limpeza e potência elétrica.
- Verificar o quanto a umidade nos pellets de bagaço da cana-de-açúcar repercute no seu poder calorífico.
- Alterar a capacidade do sistema de gaseificação para avaliação do potencial dos pellets como combustível.
- Variar a porcentagem de aglutinante, fazendo a comparação com o poder calorífico dos pellets.

## **7. REFERÊNCIAS**

ALVES JUNIOR, F. T.; GUIMARÃES, J. L. D. S.; SANTOS, G. A. D.; LEITE, A. M. F.; BARROS G. D. T. Utilização de biomassa para briquetagem como fonte de energia alternativa e a disponibilidade deste recurso na região do Cariri-CE. XXIII Encontro Nac. de Eng. de Produção - Ouro Preto-MG, 2003.

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.

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.

BRASIL. Balanço Energético Nacional - BNE. Disponível em <<http://www.epe.gov.br>> Acessado em: 22/09/2019.

BRASIL. União da Indústria de cana-de-açúcar – UNICA. São Paulo. Disponível em <<http://www.unicadata.com.br/histórico-de-produção>>. acessado em: 02/09/2019.

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.

CETIN, E., et al. “Influence of pyrolysis conditions on the structure and gasification reactivity of biomass chars. “Fuel 83.16 (2004): 2139-2159.

CORRÊA, J. 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.

CROMOLINE, 2019. [http://www.cromoline.com.br/Buscar\\_fispqs.asp](http://www.cromoline.com.br/Buscar_fispqs.asp) acessado em: 14/09/2019.

DA SILVA, J. W. F.; CARNEIRO R. A. F; LOPES J. M. Da Biomassa Residual Ao Briquete: Viabilidade Técnica Para Produção De Briquetes Na Microrregião De Dourados-Ms, 2017.

DASAPPA, S., MUKUNDA, H. S., PAUL, P. J. et al. Biomass to Energy: The Science and Technology of the IISc Bio-energy systems. 1ed. Índia. ABETS. 2003.

DE MELO, T. S. Estudo da palletização do bagaço da cana de açúcar para a otimização de custo e transporte. 2018. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Produção Sucroalcooleira) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

DI BLASI, C. “Combustion and gasification rates of lignocellulosic chars.” Progress in energy and combustion Science 35.2 (2009): 121-140.

ENERDATA, 2019. <https://yearbook.enerdata.net/total-energy/world-consumption-statistics.html>, acessado em: 03/09/2019.

GARCIA, R., 2002, “Combustíveis e Combustão Industrial”. Rio de Janeiro: Interciência.

GROENEVELD, MICHIEL J.; AND W. P. M. VAN SWAAIJ. “The design of co-current moving-bed gasifiers fueled by biomass.” ACS Symp. Ser.; (United States). Vol. 130. No. CONF-790917-P5. Twente Univ. of Tech., Enschede, Netherlands, 1980.

HERNÁNDEZ, J. J.; GUADALUPE, A.A.; AND ANTONIO, B. “Gasification of biomass wastes in na entrained flow gasifier: Effect of the particle size and the residence time.” Fuel Processing Technology 91.6 (2010): 681-692.

HUFF, E. R. Effect of Size, Shape, Density, Moisture and Furnace Wall Temperature on Burning Times of Wood Pieces. Overend, Ralph P., T. Milne, and L. Mudge, eds. Fundamentals of thermochemical biomass conversion. Springer Science & Business Media, p. 761,2012.

ITEGAN - INSTITUTO DE TECNOLOGIA GALILEO DA AMAZÔNIA.

Desenvolvimento de um software para a avaliação da eficiência da combustão em Usinas Termoelétricas operando com gás e alternando com diesel. Estudo de Caso realizado na UTE Manauara. Relatório Final. Manaus-AM, 2011.

JAGUARIBE, D.C.A., SEGUNDO, V. Principle of a thermal balance on a steam boiler of a sugar cane mill. 6 th EuChems Congress, Sevilha, 2016.

JAMES, R.; WENQIAO, Y.; AND MICHAEL, B. “The effect of biomass physical properties on top-lit updraft gasification of woodchips.” Energies 9.4 (2016): 283.

LARSEN, A. C. Co-digestão anaeróbia de glicerina bruta e efluente de fecularia. 2009. 55 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, Cascavel, 2009. Disponível em: . Acesso em: 14 abr. 2012.

LEWELLEN, P. C., W. A. PETERS; AND J. B. HOWARD. “Cellulose pyrolysis kinetics and char formation mechanism.” Symposium (International) on Combustion. Vol. 16. No. 1. Elsevier, 1977.

LORA, E.; MARTINEZ, J. D.; ROCHA, M. H. Gaseificação e pirólise para conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis. 2012.

LORA, E. E. S., ANDRADE, Geração de Energia e a Gaseificação de Biomassa. Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída (NEST), Biomassa Energia, pp 311-320. 2004.

NOVACANA 201 [https://www.novacana.com/estudos/a-cana-de-acucar-como-fonte-de-energia-eletrica-241013?fbclid=IwAR3bNxpREHxEluVXvJbjBb-FutUTP15PVdKGQIATyZGxDxWESa\\_GobFe0zQ](https://www.novacana.com/estudos/a-cana-de-acucar-como-fonte-de-energia-eletrica-241013?fbclid=IwAR3bNxpREHxEluVXvJbjBb-FutUTP15PVdKGQIATyZGxDxWESa_GobFe0zQ), acessado 05/09/2019.

PETROBRÁS. Dados técnicos da biomassa. Rio de Janeiro, Petrobrás Depto. Industrial. Divisão de Fontes Energéticas Alternativas, N.29, p. 65, 1982.

REED, T.B., DAS, A. Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems. Biomass Energy Foundation Press, USA, 1988.i.

REZAIYAN, J.; CHEREMISINOFF, N.P.; Gasification technology: a primer for engineers and scientists, CRC Press, 2005.

ROCHA, J. D. Briquetes e pellets de resíduos: tecnologia e potencial 9º Congresso Internacional de Bioenergia. Embrapa, São Paulo: 2014.

RUMÃO, A. S. Geração de potência e energia elétrica a partir da gaseificação de rejeitos de biomassa. 106 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, 2013.

SÁNCHEZ, C. G. Tecnologia da Gaseificação de Biomassa. São Paulo: Átomo, 2010.

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.

SIVAKUMAR, S.; N. RANJITHKUMAR; AND S. RAGUNATHAN. “Design and development of down draft wood gasifier.” International Journal of Mechanical Engineering 2.2 (2013): 1-10.

SHIN, D., AND SANGMIN, C. “The combustion of simulated waste particles in a fixed bed.” Combustion and flame 121. 1-2 (2000): 167-180.

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.

YOSHIKAWA, K., 2006, “R&D (Research and Development) on distributed power generation from solid fuels”. Elsevier/Energy, Science@Direct.

WILTGEN FILHO, L. Gaseificadores para carvão mineral. Energia, Fontes Alternativas, vol. III, p. 13-21, 1981.

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

## **8. ANEXO**

Gráfico da área integrada da análise de DSC.

