



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Câmpus Experimental de Itapeva

VICTOR MELLES

**TORREFAÇÃO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA FINS
ENERGÉTICOS**

Itapeva - SP
2018

VICTOR MELLES

**TORREFAÇÃO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA FINS
ENERGÉTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Câmpus Experimental de Itapeva, como requisito para a conclusão do curso de Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Manuel Romero Luna

Itapeva - SP
2018

M525t Melles, Victor
Torrefação do bagaço de cana-de-açúcar para fins energéticos / Victor Melles. -- Itapeva, 2018
49 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Produção) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus Experimental de Itapeva, Itapeva
Orientador: Carlos Manuel Romero Luna

1. Torrefação. 2. Bagaço de cana-de-açúcar. 3. Poder calorífico. 4. Energia. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Câmpus Experimental de Itapeva. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



VICTOR MELLES

**TORREFAÇÃO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA FINS
ENERGÉTICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção, da Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Carlos Manuel Romero Luna
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

2º Examinador: Prof.^a Dr.^a Juliana Esteves Fernandes Cieslinski
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

3º Examinador: Prof. Dr. José Cláudio Caraschi
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

Itapeva, 30 de novembro de 2018.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

Schopenhauer

RESUMO

O bagaço é um resíduo do processamento industrial da cana-de-açúcar que constitui uma importante fonte de recurso para cogeração de energia no setor sucroalcooleiro, porém o bagaço apresenta propriedades como um alto teor de umidade e baixa densidade energética, resultando em uma baixa eficiência energética da biomassa e perdas por deterioração. Uma das alternativas para melhorar estas propriedades é a aplicação do processo de torrefação, que consiste em um pré-tratamento térmico de biomassa em que a biomassa *in natura* é aquecida em uma atmosfera inerte a temperaturas de 200 a 300 ° C. O processo de torrefação permite a conversão de biomassa *in natura* em combustível sólido adequado para combustão e gaseificação. A biomassa torrificada tem melhores propriedades, tais como maior densidade de energia, menor natureza higroscópica, menor relação de átomos de O/C e H/C e maior facilidade para armazenamento e transporte. Neste trabalho, propoe-se realizar estudos térmicos para avaliar a aplicabilidade do processo de torrefação no bagaço de cana-de-açúcar residual em uma indústria sucroalcooleira. Os experimentos foram realizados a 200 e 300 °C durante 30 e 60 minutos. Para verificar o efeito do processo de torrefação nas características térmicas do bagaço foi determinado a análise imediata e o poder calorífico superior (PCS), que permitem avaliar o ganho energético no bagaço torificado, e os resultados dos ensaios de termogravimetria que determinam as taxas de reação, conversão e os coeficientes de taxa de reação. O BCA torificado apresentou um aumento no PCS, redução do teor de umidade e redução de volume de material em todos o casos.

Palavras-chave: Bagaço. Cana-de-Açúcar. Torrefação. Análise termogravimétrica. Poder calorífico superior.

ABSTRACT

Bagasse and straw are residues from the industrial processing of sugarcane that constitute an important source for cogeneration of energy in the sugar-alcohol sector, but the bagasse presents properties as a high moisture content, low density and low energy density, resulting in a low energy efficiency of the biomass and loss of materials due to deterioration. One of the alternatives for improving these properties is the application of the torrefaction process, which consists of a thermal pretreatment of biomass in that the raw biomass is heated in an inert atmosphere at temperatures of 200 to 300 ° C. The torrefaction process allows the conversion of raw biomass into solid fuel suitable for combustion and gasification. Torrefied biomass has better properties, such as higher energy density, lower hydrophilic nature, lower ratio of O / C and H / C atoms, and greater ease of storage and transport. In this work, it is proposed to conduct thermal studies to evaluate the applicability of the torrefaction process in the residual sugarcane bagasse in a sugar-alcohol industry. The experiments were run at 200 and 300 °C for 30 and 60 minutes. In order to verify the effect of the roasting process on the thermal characteristics of the bagasse, the results of the higher heating value (HHV) were analyzed, which allow to evaluate the energetic gain in the torrefied bagasse, and the results of the thermogravimetric tests that determine the conversion rates and the reaction rate coefficients. The torrefied BCA showed an increase in HHV, reduction of moisture content and reduction of material volume in all cases.

Keywords: Bagasse. Sugarcane. Torrefaction. Thermal analysis. Higher heating value.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cadeia produtiva sucroalcooleira	14
Figura 2 - Ciclo do carbono	16
Figura 3 - Estrutura molecular dos constituintes do BCA	18
Figura 4 - Derivados da cana-de-açúcar	20
Figura 5 - Estrutura da cana-de-açúcar.....	21
Figura 6 - Mapa da produção de cana-de-açúcar no Brasil.....	22
Figura 7 - Esquema de variação de propriedade da biomassa.....	24
Figura 8 - Bagaço de cana-de-açúcar <i>in natura</i> (50% de umidade).....	27
Figura 9a - Moinho de rotor vertical.....	28
Figura 9b - Agitador eletromagnético de peneiras	28
Figura 10 - pHmetro Hanna.....	29
Figura 11 - Calorímetro IKA C5003	30
Figura 12a - Cadinhos de aço inox.....	30
Figura 12b - Vaso pressurizado.....	30
Figura 13 - Termobalança SDT Q600TA instruments.....	31
Figura 14 - Bancada para os ensaios de torrefação	33
Figura 15a - Bagaço de cana-de-açúcar <i>in natura</i>	34
Figura 15b - Bagaço de cana-de-açúcar moído	34
Figura 16 - Curvas TG/DTG do BCA <i>in natura</i>	36
Figura 17a - Razão de aquecimento dos experimentos realizados as 200 °C	37
Figura 17b - Razão de aquecimento dos experimentos realizados as 300 °C	37
Figura 18 - Rendimentos dos experimentos de torrefação	39
Figura 19 - Amostras de BCA torreficado	41
Figura 20 - Análise imediata do BCA.....	42
Figura 21 - Fração de material volátil e carbono fixo	43
Figura 22a - Curvas DTG do BCA torreficado a 200°C.....	44
Figura 22b - Curvas DTG do BCA torreficado a 300°C.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de Torrefação.....	25
Tabela 2 - Condições dos experimentos de torrefação.....	33
Tabela 3 - Análise composicional do BCA	34
Tabela 4 – Análise imediata do BCA	35
Tabela 5 – Análise dos experimentos de torrefação	38
Tabela 6 - Rendimento da torrefação de BCA	39
Tabela 7 – Análise imediata do BCA torreficado	42
Tabela 8 – pH dos materiais torreficados.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS

BCA	Bagaço de cana-de-açúcar
PCS	Poder calorífico superior
TGA	Análise termogravimétrica
TG	Termogravimétrico
DTG	Diferencial termogravimétrico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Considerações iniciais	10
1.2 Justificativas	12
1.3 Objetivos	13
1.3.1 Objetivo geral	13
1.3.2 Objetivos específicos	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Indústria Sucroalcooleira	14
2.2 Biomassa	15
2.2.1 Constituintes da biomassa	17
2.3 Cana-de-açúcar	19
2.4 Processo de torrefação	23
2.4.1 Torrefação de biomassa	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 Bagaço de cana-de-açúcar	27
3.2 Técnicas de caracterização físico-química	28
3.2.1 Análise composicional	28
3.2.2 Análise imediata	28
3.2.3 Determinação do pH	29
3.2.4 Poder calorífico	29
3.2.5 Análise térmica	31
3.3 Bancada experimental	32
3.4 Planejamento experimental	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 Caracterização físico-química do BCA	34
4.2 Torrefação do BCA	37
4.3 Rendimentos da torrefação do BCA	38
4.4 Análise térmica do BCA	44
5 CONCLUSÃO	46
6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	47
7 REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

Durante muito tempo, os recursos fósseis e hídricos foram os grandes propulsores da civilização e da economia. O Brasil também se apoiou nessas fontes energéticas para o desenvolvimento de atividades industriais, agrícolas, de serviços e da própria sociedade. A descoberta de novas fontes energéticas, que venham substituir as fontes tradicionalmente utilizadas, como os recursos fósseis e hidráulicos, tem se tornado uma necessidade crescente a nível mundial e nacional. Vários fatores são conducentes desse processo, podendo-se citar fatores ambientais, econômicos e políticos (MARCONATO e SANTINI, 2008).

A dependência de combustíveis fósseis como a principal fonte de energia tem sido uma questão de interesse de muitas nações. O uso indiscriminado destes combustíveis está intimamente ligado a alterações climáticas e às catástrofes naturais, como resultado do aquecimento global. Com a finalidade de reduzir os danos causados ao meio ambiente, fontes alternativas de energia, como energia solar, eólica, hidráulica, geotérmica, maremotriz e a biomassa, também denominadas fontes de energia renováveis, devem ser exploradas (DA SILVA, 2018).

Segundo dados do IEA (Agência Internacional de Energia) em 2015, 79% da demanda mundial de energia primária foram supridas por combustíveis fósseis, enquanto as energias renováveis (biomassa, solar, eólica e geotérmica) representam apenas 12% e a hidroeletricidade 2,1%.

A biomassa é uma das fontes de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Tanto no mercado internacional quanto no interno, ela é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis. Dela é possível obter energia elétrica e biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol, cujo consumo é crescente em substituição a derivados de petróleo como o óleo diesel e a gasolina (ANEEL, 2008).

Durante o processo de queima da biomassa gera-se gás carbônico que é absorvido pelas plantas, no processo de fotossíntese, tornando este ciclo sustentável (ANEEL, 2007). Desta forma, entende-se que esta energia é uma alternativa que implica na redução dos gases de efeito estufa.

A cana-de-açúcar é um recurso com grande potencial, dentre as fontes de biomassa, para geração de eletricidade existente no país, por meio da utilização do bagaço e da palha (ANEEL, 2008). O Brasil é hoje o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, reconhecido com um dos líderes na produção de cana-de-açúcar e responsável por 1/3 de toda a produção mundial. Por ser uma biomassa sazonal, o excedente de bagaço é normalmente estocado nos pátios das usinas em forma de pilhas. Nestas condições, a deterioração da camada externa protege as camadas internas, gerando perdas de até 15% em massa de bagaço (LIMA, 2018).

O BCA apresenta propriedades como um alto teor de umidade e baixa densidade energética. Para o aumento da eficiência energética da biomassa e para evitar perda de materiais por deterioração, o BCA pode ser submetido a pré-tratamentos como a torrefação, este refere-se a um pré-tratamento o qual consiste no aquecimento em uma atmosfera inerte a temperaturas de 200 a 300 °C, com o objetivo de melhorar as propriedades do BCA como combustível (CHEN, PENG e BI, 2015).

O princípio fundamental da torrefação é a degradação preferencial e seletiva da fração de baixa caloria presente na biomassa, constituída por alguns compostos extrativos, e pelos polissacarídeos, principalmente do grupo das hemiceluloses (DA SILVA, 2018).

Neste estudo será aplicado o processo de torrefação no bagaço da cana-de-açúcar com o objetivo de verificar o aumento das propriedades energéticas e então será analisado qual a forma de realizar o processo que apresente o maior custo-benefício para a aplicação em indústrias, as variáveis que afetam este processo são a temperatura e o tempo.

1.2 Justificativas

A partir de abril de 2002 o Governo Federal instituiu o Programa de Incentivo às fontes Alternativas de Energia Elétrica – PROINFA para aumentar a participação das fontes de energia renovável no Sistema Interligo Nacional – SIN (PROINFA 2014). Devido a este incentivo, o Brasil encontra-se em uma posição confortável e de referência no setor sucroenergético mundial (FAO 2015). Segundo a CONAB (2010) mais de 50% da produção desta colheita concentra-se no estado de São Paulo – SP.

De acordo com estimativas da UNICA (União da Indústria de Cana-de-Açúcar de São Paulo), em 2020 a eletricidade produzida pelo setor poderá representar 15% da matriz brasileira, com a produção de 14.400 MW médios (ou produção média de MWh ao longo de um ano), considerando-se tanto o potencial energético da palha e do bagaço quanto a estimativa de produção da cana, que deverá dobrar em relação a 2008, e atingir 1 bilhão de toneladas. Segundo o Plano Nacional de Energia 2030, o maior potencial de produção de eletricidade encontra-se na região Sudeste, particularmente no Estado de São Paulo, e é estimado em 609,4 milhões de giga joules (GJ) por ano (ANEEL, 2008).

Segundo Da Silva (2018), a biomassa torrificada é um combustível alternativo com qualidade satisfatória para a geração de energia elétrica por meio de sua queima nas usinas termelétricas. Comparando valores estimados de geração de energia elétrica de uma biomassa *in natura*, submetida a torrefação e os valores do petróleo, existe uma discrepância significativa entre a densidade energética do petróleo e a biomassa *in natura*, a torrefação reduziu essa diferença de 10 a 5 vezes.

Na literatura há poucos estudos a respeito da torrefação do BCA, desta forma, esta pesquisa surge para auxiliar as usinas sucroalcooleiras a respeito da viabilidade econômica da inserção de um pré-tratamento para o BCA antes da queima, comparando o aumento do poder calorífico do material e a redução de perdas devido a degradação do material com a energia consumida durante o pré-tratamento.

1.3. Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Estudar o processo de torrefação do BCA para verificar a alteração de suas propriedades como combustível.

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização físico-química do bagaço de cana-de-açúcar (BCA).
- Efetuar a montagem da bancada experimental.
- Realizar os ensaios experimentais de torrefação.
- Determinar as propriedades físico-química do BCA torreficado.

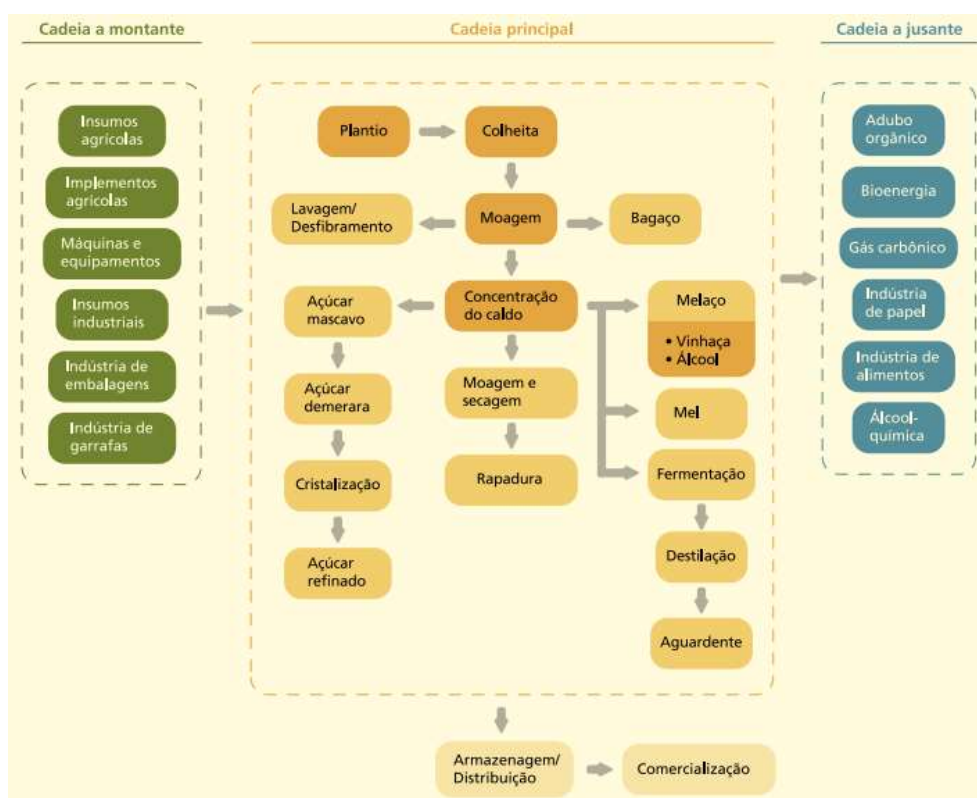
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico será apresentada uma revisão bibliográfica a respeito do cenário brasileiro das indústrias sucroalcooleiras, sobre o bagaço da cana de açúcar (BCA), sua caracterização e sobre o processo de torrefação.

2.1 Indústria Sucroalcooleira

A cadeia produtiva sucroalcooleira é bastante estruturada no Brasil, único país do mundo que domina todos os estágios da sua tecnologia de produção. Representa um conjunto amplo e articulado de atividades que vão desde a produção da cana-de-açúcar, até a colocação do açúcar e do álcool no mercado para consumo final, passando por todos os elos de processamento (Figura 1) (SEBRAE, 2008).

Figura 1 - Cadeia produtiva sucroalcooleira.



Fonte: (SEBRAE, 2008)

O agronegócio da cana-de-açúcar compõe-se de elos geradores de várias oportunidades de negócios: produção da cana-de-açúcar, processamento de produtos derivados, serviços de pesquisa, capacitação, assistência técnica e creditícia, transporte, comercialização, exportação, serviços portuários, entre outras (SEBRAE, 2008).

O setor da indústria sucroalcooleira constitui um dos principais segmentos da economia brasileira, com importância tanto no abastecimento interno quanto para a exportação. Com a definição de processos cada vez mais direcionados para a obtenção de maior volume de açúcar e álcool, a indústria começou a descartar, consequentemente, maiores quantidades de resíduos agroindustriais, os quais passaram a ser conhecidos como subprodutos, sendo um dos principais problemas enfrentados pelas indústrias sucroalcooleiras devido ao grande volume gerado. Sabe-se, também, que se não forem devidamente aproveitados, esses subprodutos representam desperdícios para o setor produtivo e oferecem riscos para o ambiente e a sociedade (TORRES, N.H. et al., 2012).

No Brasil a indústria sucroalcooleira é tradicionalmente autossuficiente em termos energéticos. A queima do BCA, maior dejetado da agroindústria brasileira, permite que as usinas do setor supram suas necessidades de energia térmica, mecânica e elétrica (CASTRO, 2008). O agronegócio sucroalcooleiro fatura, direta e indiretamente, cerca de R\$ 40 bilhões por ano, o que corresponde a aproximadamente 2,35% do PIB nacional. É, também, um dos setores que mais empregam no país, com mais de 3,6 milhões de empregos diretos e indiretos, e reúne mais de 72.000 agricultores (DIEESE, 2007).

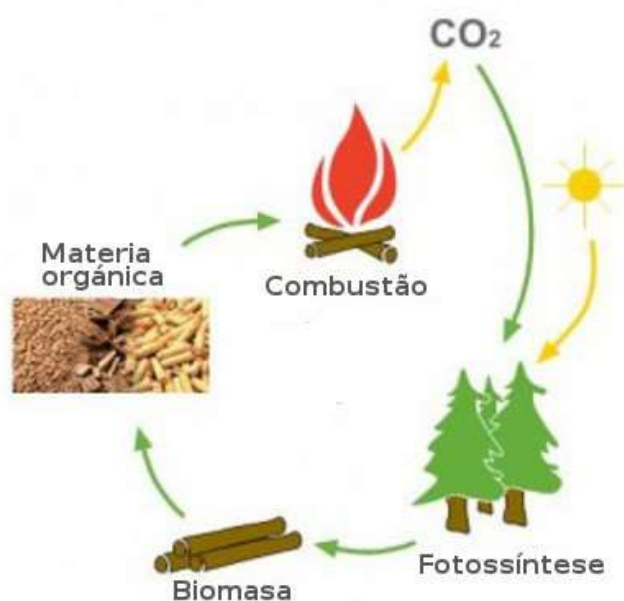
2.2 Biomassa

Atualmente, a maioria dos países do mundo está se concentrando em uma transição para a energia verde, investindo mais em energia renovável. Isso se deve ao fato de que a energia renovável representa uma boa diversificação das fontes de energia e também preserva o equilíbrio dos ecossistemas. Entre as diferentes fontes de energia, a biomassa é a fonte mais promissora para o uso crescente nos próximos anos (SALEH et al., 2013).

Biomassa pode ser definido como toda matéria orgânica não fossilizada e biodegradável proveniente de animais, plantas e microrganismos. As fontes de biomassa abrangem produtos, subprodutos e resíduos de madeira e agricultura, bem como as frações não fossilizadas e biodegradáveis dos resíduos sólidos industriais e municipais, como animais, processamento de alimentos, plantas aquáticas e algas. Além destes resíduos, os gases e líquidos recuperados a partir da decomposição da matéria orgânica podem ser considerados outro tipo de biomassa (DEMIRBAS, 2009).

A biomassa pode ser considerada como um dos recursos de energia solar. As plantas crescem absorvendo o dióxido de carbono da atmosfera, assim como a água e os nutrientes dos solos, convertendo-os em carboidratos através da fotossíntese. Todo o carbono contido na biomassa é obtido a partir do dióxido de carbono. Em outras palavras, o carbono é ciclado na atmosfera quando a biomassa é consumida como combustível. Portanto, a biomassa é referida como um combustível neutro em carbono quando é queimado. Devido à ampla distribuição de biomassa na superfície da Terra, a bioenergia tem um grande potencial como fonte de baixo carbono para a produção de energia em larga escala (CHEN, PENG e BI, 2015). O ciclo do carbono é ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Ciclo do Carbono.



Fonte: (BIOMASSA, 2015)

Dentre os diversos meios de se produzir energia sustentavelmente, a biomassa se destaca como uma fonte de alta volatilidade e reatividade, alta produtividade, renovável e fácil de armazenar e transportar. Todavia, nota-se uma inferioridade no conteúdo energético da biomassa quando comparado com combustíveis fósseis sólidos, devido a menor quantidade de carbono e elevada quantidade de oxigênio, implicando em um baixo poder calorífico (DEMIRBAS, 2009).

O uso da biomassa é uma das melhores soluções renováveis para a substituição de recursos fósseis em muitas aplicações como a produção de calor, energia e combustíveis de transporte, produção de produtos químicos e biomateriais (BRIDGWATER, 2003). As principais vantagens do uso de biomassa como fonte de energia são os desenvolvimentos que prometem a aplicação de biomassa com menor custo e maior eficiência de conversão. A produção de biomassa pode gerar empregos, contribuir para a recuperação de áreas degradadas e aumentar biodiversidade, dependendo da cultura e da maneira como é cultivada (MCKENDRY, 2002).

2.2.1 Constituintes da biomassa

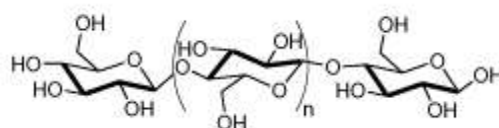
Os constituintes da biomassa incluem a celulose, hemicelulose, lignina, extrativos orgânicos e minerais inorgânicos, sendo os três primeiros constituintes os principais componentes da biomassa (CHEN, PENG e BI, 2015). Segundo Saleh et al. (2013) a composição desses constituintes na biomassa varia com a espécie, idade, localização do crescimento e condições de crescimento.

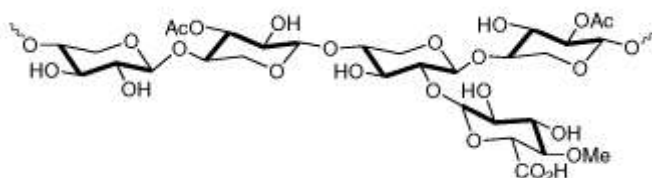
Dentre os principais componentes que compreendem o material vegetal a celulose é o principal componente da parede celular dos vegetais e compostos orgânicos (CORTEZ *et al*, 2008). A degradação da celulose se inicia entre as temperaturas de 240 - 350 ° C. A celulose é um polímero de alta massa molecular que compõe as fibras na biomassa, este carboidrato complexo consiste em cadeias não ramificadas de unidades de glicose ligadas (DAYTON, 1999). A celulose tem uma forte tendência a formar pontes de hidrogênio intra e inter-moleculares pelos grupos hidroxila, que endurecem a cadeia linear e promovem a agregação em uma estrutura cristalina, acumulando fibras de celulose de alta resistência mecânica (RENNENBERG, 1990).

As hemiceluloses são compostos orgânicos com baixo valor calórico, alta razão atômica O / C e alta disponibilidade de grupos hidroxila quando comparados à fração remanescente da biomassa composta por celulose e ligninas. A eliminação preferencial das hemiceluloses aumenta a proporção de compostos com maior teor de carbono e energia na biomassa torrificada, além de reduzir sua reatividade, o que resulta em maior estabilidade térmica e menor capacidade de adsorção de água (DERMIBAS, 2008). Ao contrário da celulose, a hemicelulose é um copolímero composto de diferentes quantidades de várias moléculas de sacarídeos. O conteúdo e a estrutura da hemicelulose em várias plantas são diferentes. As hemiceluloses mais abundantes são xilano e glucomanano. A degradação térmica da hemicelulose ocorre na faixa de 130 - 260 ° C durante a pirólise lenta, com a maioria da perda de peso ocorrendo acima de 180 ° C, dependendo de sua composição química. A hemicelulose geralmente se decompõe como voláteis leves, produzindo menos alcatrões e carbonatos comparados à celulose (SALEH et al, 2013).

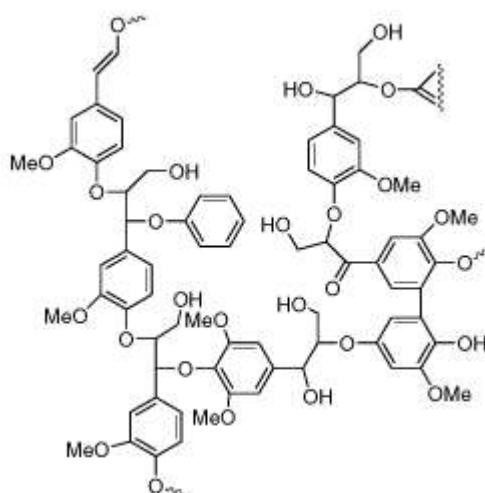
As ligninas são polímeros de compostos aromáticos, isto é, apresentam anéis em sua estrutura que ficam associadas à celulose na parede celular. Tem como principal função propiciar resistência estrutural, estimular a vedação do sistema de transporte de água que conecta as raízes com as folhas e a proteção da mesma contra a degradação externa (DEMIRBAS, 2008). A lignina é uma substância tridimensional, altamente ramificada e polifenólica, é caracterizada pela decomposição gradual para a temperatura variando de 160 a 900 ° C (CHEN, PENG e BI, 2015). A Figura 3 apresenta a estrutura molecular da celulose, hemicelulose e lignina.

Figura 3 - Estrutura molecular da: a) celulose; b) hemicelulose; c) celulose.





b)



c)

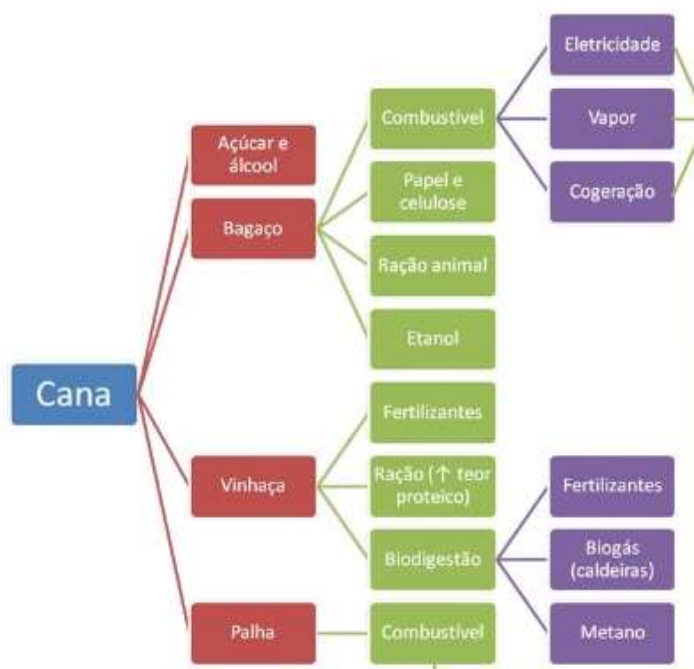
Fonte: (FERREIRA; ROCHA; SILVA, 2009).

2.3 Cana-de-açúcar

Proveniente do sudeste asiático, a cana-de-açúcar (*Saccharum L.*) é cultivada em uma vasta área territorial, revelando maiores rendimentos em climas tropicais. Pertencente à família das gramíneas (*Poaceae*), ela tem sua estrutura formada por raízes, folhas, colmos, e casualmente, flores. As condições ideais para seu desenvolvimento são divididas em duas fases: a primeira apresenta-se quente e úmida a fim de proporcionar a germinação, perfilhamento e desenvolvimento vegetativo. A segunda fase é fria e seca, para promover maturação e, assim, o acúmulo de sacarose (FERREIRA, 2009). A melhor época para o plantio da cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil é entre janeiro e março, enquanto que na região Norte-Nordeste é entre maio e julho (MAPA, 2007).

Com a cana-de-açúcar há a produção de açúcar, álcoois combustíveis e industriais, aguardente, cera, além de ser consumida *in natura*. O bagaço da cana-de-açúcar é fonte para produção de energia e papel. A ponta da cana pode também ser utilizada como alimentação animal. Desta forma, a cana-de-açúcar é uma das mais importantes culturas brasileiras, conforme Lucchesi (1995) apud Arruda Pinto (2002). A Figura 4 ilustra a variedade de produtos derivados da cana-de-açúcar.

Figura 4 – Derivados da cana-de-açúcar.



Fonte: FGV Agro energia

Estruturalmente a cana pode ser considerada um compósito de fibrilas de celulose (32-44%), mantidas coesas por uma matriz formada de hemicelulose (27-32%) e lignina (19-24%) (SILVA et al. 2009; SAIDUR et al. 2011). De forma geral, a planta é constituída de um sistema radicular, dos colmos, onde a sacarose é predominantemente estocada, e das folhas dispostas ao redor da cana, nos nódulos inter colmos e também na parte superior da planta onde se localiza a gema apical (palmito) (MANTELATTO, 2005). A Figura 5 apresenta a forma estrutural da cana-de-açúcar.

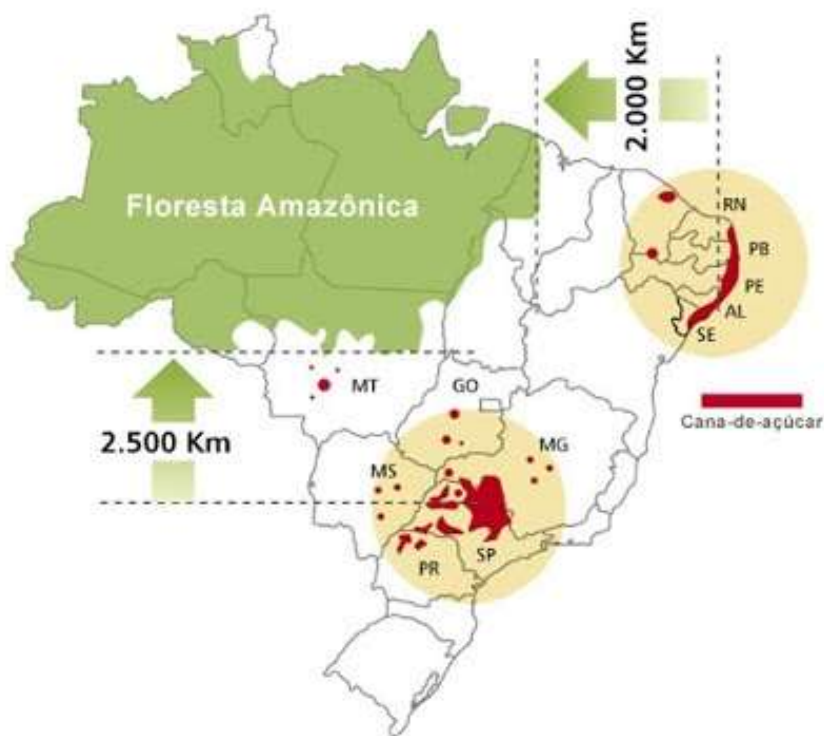
Figura 5 – Estrutura da cana-de-açúcar.



Fonte: (BAYER, 2018).

A produção de cana-de-açúcar se concentra nas regiões Centro-Sul e Nordeste do Brasil. A Figura 6 destaca em vermelho as áreas onde se concentram as plantações e usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade, segundo dados oficiais do IBGE, UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas – SP) e do CTC (Centro de Tecnologia Canavieira).

Figura 6 – Mapa da produção de cana-de-açúcar no Brasil.



Fonte: Adaptado de (MAPA... 2018).

Segundo Castro e Dantas (2008) a energia da cana tem relevante participação na matriz energética brasileira devido ao consumo de álcool combustível em larga escala desde o fim dos anos 70. Contudo, o potencial energético da cana é muito superior a energia contida no álcool combustível. Uma tonelada de cana de açúcar contém energia primária equivalente a energia presente em 1,2 barris de petróleo. Deste potencial energético, a sacarose a partir da qual se produz o álcool possui apenas 1/3 da energia da cana, os outros 2/3 estão contidos no bagaço e na palha. Logo, nota-se o imenso potencial para a geração de eletricidade a partir da biomassa da cana de açúcar.

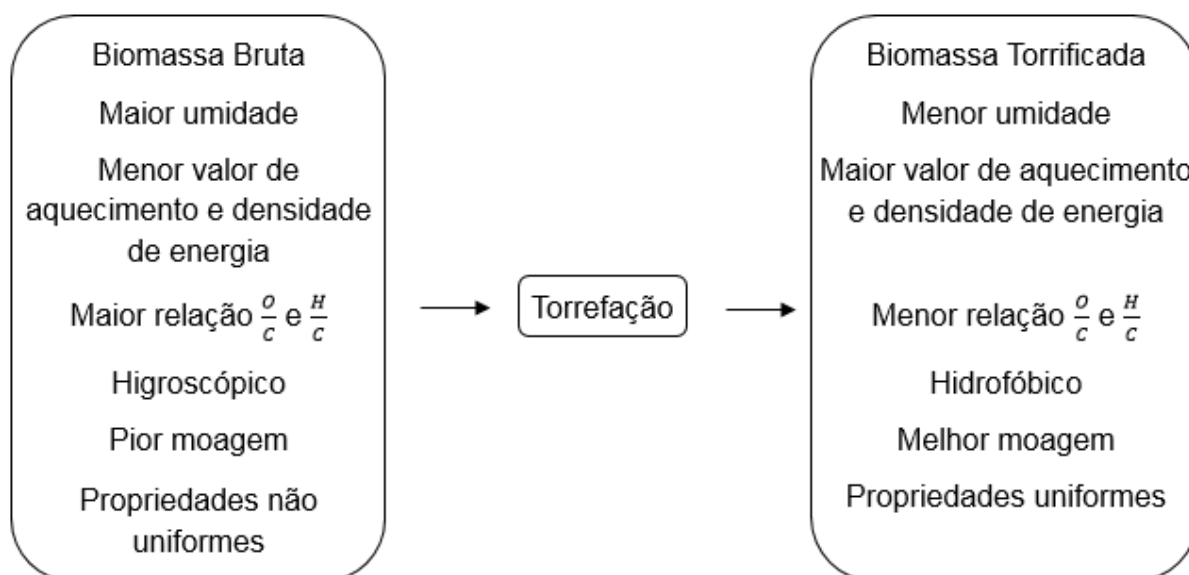
Devido às dificuldades de estocagem do bagaço e a pouca relevância do mercado de bagaço *in natura*, a tecnologia tradicionalmente empregada nas usinas foi de contrapressão capaz de gerar modestos 12 kWh por tonelada de cana processada, sendo assim suficientes para garantir a autossuficiência energética das usinas (CORRÊA NETO e RAMON, 2002). Entretanto, tecnologias mais eficientes são capazes de gerar um significativo excedente de energia elétrica que pode ser comercializado.

2.4 Processo de torrefação

Acredita-se que a torrefação seja o pré-tratamento mais promissor de biomassa para fins comerciais. Torrefação também é conhecido como pirólise de baixa taxa de aquecimento no qual a biomassa *in natura* é aquecida lentamente em uma atmosfera inerte a pressão atmosférica na faixa de temperatura de 200-300 °C (SUPRAMONO, 2015). Este processo resulta em melhorias na composição física, química e bioquímica da biomassa, tornando-a melhor para fins de combustão e gaseificação. Durante a torrefação, três produtos diferentes são produzidos: uma biomassa sólida marrom a preta, compostos orgânicos voláteis condensáveis compreendendo água, ácido acético, aldeídos, álcoois, e cetonas e gases não condensáveis como CO₂, CO e pequenas quantidades de metano (SALEH *et al.*, 2013).

A biomassa *in natura* é caracterizada por seu alto teor de umidade, baixo valor calórico, natureza higroscópica e maior volume ou baixa densidade aparente (SALEH *et al.*, 2013). O processo de torrefação permite a conversão de biomassa *in natura* em combustível sólido adequado para combustão e gaseificação. A biomassa torrificada tem melhores propriedades, tais como maior densidade de energia, tamanho de partícula mais consistente, menor natureza higroscópica, menor relação de átomos de O/C e H/C, maior moabilidade e maior facilidade para armazenamento e transporte (SUPRAMONO, 2015). A Figura 7 mostra um resumo das mudanças nas propriedades da biomassa antes e após o processo de torrefação.

Figura 7 – Esquema de variação de propriedade da biomassa.



Fonte: Adaptado de Chen, Peng e Bi, 2015.

Quando a biomassa é torrificada, o pré-tratamento pode ser ainda classificado em processos leves, moderados e severos de torrefação, correspondendo às temperaturas de aproximadamente 200-235, 235-275 e 275-300°C, respectivamente. Com a torrefação leve, a umidade e os voláteis de baixo peso molecular contidos na biomassa serão liberados. A hemicelulose é termicamente degradada em certa medida pela torrefação leve, enquanto a celulose e a lignina são apenas levemente ou pouco afetadas, portanto a perda de peso da biomassa é pequena e sua densidade energética ou valor calórico aumenta apenas ligeiramente (CHEN, PENG e BI, 2015).

Na torrefação moderada a decomposição e liberação volátil são intensificadas, sendo a hemicelulose substancialmente degradada e a celulose consumida em maior quantidade. No que diz respeito à torrefação severa, a hemicelulose está quase completamente consumida e a celulose é oxidada em grande medida. A lignina é o mais difícil de ser degradado termicamente; seu consumo dentro da faixa de temperatura da torrefação é, portanto, muito baixo. Em virtude da remoção substancial de hemicelulose e celulose da biomassa por torrefação severa, o peso e o rendimento de energia da biomassa são reduzidos significativamente e a densidade energética do combustível é intensificada em grande medida. Uma comparação entre torrefação leve, leve e severa é dada na Tabela 1. (CHEN, PENG e BI, 2015).

Tabela 1 - Classificação de torrefação.

Classificação	Leve	Moderada	Severa
Temperatura (°C)	200 – 235	235 - 275	275 – 300
Consumo			
Hemicelulose	Moderado	Moderado para Alto	Alto
Celulose	Baixo	Baixo para Moderado	Moderado para Alto
Lignina	Baixo	Baixo	Baixo

Fonte: Adaptado de Chen, Peng e Bi, 2015.

2.4.1 Torrefação de biomassa

A implementação do processo de torrefação do BCA nos sistemas de geração de energia elétrica do setor sucroalcooleiro brasileiro pode ocasionar em um aumento da eficiência desse sistema, assim como aumentar a participação da cana-de-açúcar na matriz energética. A literatura apresenta alguns estudos sobre torrefação de biomassa e especificamente sobre a cana-de-açúcar.

Irawan, Upe e Dwi (2017) realizaram um estudo a respeito da aplicação do processo de torrefação em cascas de coco, os resultados obtidos demonstraram um aumento no poder calorífico e a redução do volume de material. O tempo de espera da torrefação pode alterar a composição da matéria volátil. O menor tempo de espera da torrefação pode produzir um material de baixo poder calorífico, enquanto maiores tempos de espera da torrefação produzem um material com alto poder calorífico e com alta perda de massa.

Klafke (2018) avaliou a utilização da torrefação como pré-tratamento de resíduos gerados na produção de papel e celulose, os resultados obtidos foram materiais com menores teores de água em comparação aos não torreficados e menores razões de O/C. Assim, a biomassa torreficada pode ser armazenada por mais tempo, pois a redução no teor de água diminui a chance de ataques microbiológicos e a redução de hidroxilas disponíveis provenientes da hemiceluloses reduzem sua higroscopicidade.

No contexto de cana-de-açúcar, Patel et al. (2011) estudaram o desempenho do processo de torrefação de talos de algodão, prosopis e BCA. Os resultados

demonstraram que a torrefação realizada a 300°C e no intervalo de 1 hora aumento significativamente o poder calorífico das biomassas entre 27 e 41%. Joshi et al. (2015) investigaram a torrefação do BCA usando uma corrente de gás de arraste com um percentual de oxigênio simulando o uso de um gás de exaustão ou ar. Os resultados obtidos demonstraram que a oxigênio promove a formação de produto gasoso incrementando a concentração de dióxido de carbono (CO₂). Conag et al. (2017) investigaram o efeito da temperatura e do tempo da torrefação do BCA em atmosfera de minimamente oxidativa. Demonstraram que a temperatura e o tempo têm uma influência significativa no melhoramento das características combustíveis.

Supramono, Devina e Tristantini (2015) investigaram o efeito de diferentes taxas de aquecimento e tempos de espera (duração do aquecimento após a temperatura final) sobre as variáveis de rendimento em massa da fase sólida, conteúdo lignocelulósico, distribuição de partículas após a moagem, hidrofobicidade e dureza dos pellets de BCA torreficado. As conclusões foram que o aumento da taxa de aquecimento e tempo de espera da torrefação reduz ainda mais o rendimento em massa do BCA torreficado, o aumento da composição de lignina no bagaço de cana torreficado melhora a dureza do pellet e a degradação da hemicelulose no BCA torna o bagaço mais quebradiço e fácil de moer, esta degradação melhora a tendência hidrofóbica do BCA torreficado.

Granados et al. (2017) estudaram a redução da reatividade do BCA devido ao processo de torrefação, observou-se que a torrefação produz um enriquecimento de carbono, acompanhado por uma diminuição nas funcionalidades de hidrogênio e oxigênio no carvão, e aumentos no PCS em cerca de 30%. A redução da reatividade do BCA ocorre devido a eliminação de grande parte dos materiais voláteis, transformando o material em um bom combustível sólido, com propriedades similares a do carvão.

Apesar da quantidade significativa de trabalhos sobre processos sobre torrefação de biomassa (Granados et al. 2017), ainda são poucos os estudos referentes à torrefação do BCA para sistema de geração de energia.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão apresentados os materiais e métodos para a realização dos experimentos de torrefação e as técnicas utilizadas para análise das propriedades do BCA.

3.1 Bagaço de cana-de-açúcar

O BCA utilizado para pesquisa foi fornecido pela empresa sucroalcooleira Destilaria Itacema, localizada na cidade de Itaí, interior do estado de São Paulo. A amostra recebida apresentava cerca de 50% de umidade (Figura 8). Armazenou-se a mesma em um local seco e com sombra (Laboratório/Unesp). Parte dessa amostra foi levada até a estufa para serem devidamente secadas. A temperatura utilizada foi de 105° C, por um período de 24 horas.

Figura 8 – BCA *in natura* (50% de umidade).



Fonte: Autoria própria.

Posteriormente à secagem do material, o bagaço foi moído utilizando um moinho de rotor vertical com facas fixas do fabricante Marconi, modelo MA680, demonstrado na Figura 9a. Após a moagem do BCA, o material passou por um processo de peneiramento através de um agitador eletromagnético de peneiras (Figura 9b) com o intuito de separar os materiais com granulometria entre 250 e 500 μm .

Figura 9 – (a) Moinho de rotor vertical; (b) Agitador eletromagnético de peneiras



a)



b)

Fonte: Autoria própria.

3.2 Técnicas de caracterização físico-química

3.2.1 Análise composicional

O teor de extrativos foi determinado seguindo a norma NREL/TP-510-42618. Os teores de hemicelulose, celulose e lignina foram determinados seguindo a norma NREL/TP-510-42619.

3.2.2 Análise imediata

A análise imediata foi determinada através do método termogravimétrico aplicado a biomassas seguindo a metodologia proposta no trabalho de Garcia et al. (2013).

3.2.3 Determinação do pH

Para a determinação do pH do BCA torreficado obtido em cada ensaio foi utilizada a metodologia descrita por DOOLEY (2015). Foi utilizado 0.2 g de BCA misturado com 40 ml de água desionizada usando um agitador magnético por 30 minutos. Após a mistura, a suspensão foi deixada em repouso por 10 minutos. Depois o líquido foi filtrado e o pH foi determinado usando um pHmetro Hanna (Figura 10).

Figura 10: pHmetro Hanna

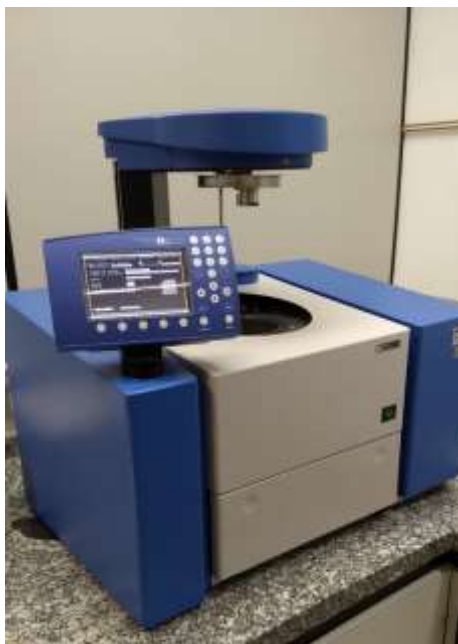


Fonte: Autoria própria.

3.2.4 Poder calorífico

O poder calorífico é a propriedade físico-química mais importante a considerar para a seleção de um processo termoquímico mais adequado para o aproveitamento da biomassa. Para determinar o poder calorífico utilizou-se um calorímetro IKA C5003 (Figura 11), que mede o poder calorífico superior (PCS) de amostras de líquido e de sólidos. A validação está de acordo com as normas DIN 51900, ASTM 240 D, ISO 1928, BSI. Utilizou-se o procedimento descrito no manual do equipamento para a execução das análises de PCS.

Figura 11: Calorímetro IKA C5003.



Fonte: Autoria própria.

Para a determinação do poder calorífico se utiliza uma massa de amostra de máximo de 0,5000 g, a qual é disposta em um cadinho de aço inox (Figura 12a). Depois, o cadinho com a amostra foi inserido em um vaso pressurizado (Figura 12b), onde o equipamento injeta uma fração de oxigênio puro a 28 bar para realizar a combustão completa do material.

Figura 12: (a) cadinhos de aço inox e (b) vaso pressurizado.



a)



b)

Fonte: Autoria própria.

3.2.5 Análise termogravimétrica

A TGA foi realizada em uma termobalança, caracterizada por ser um sistema simultâneo que determina TG/DTG (Figura 13). Este equipamento está disponível no Laboratório de Combustão e Captura de Carbono (LC3) da FEG/UNESP. O princípio básico da análise térmica é a medição instantânea de mudanças de massa como uma função da temperatura ou tempo numa atmosfera controlada (CAI et al., 2013). Através da análise térmica consegue-se determinar as taxas de reação, conversões e coeficientes de taxa de reação. Para a análise da decomposição térmica, os experimentos foram realizados considerando uma razão de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$ usando atmosferas de gás inerte compostas de nitrogênio e de ar sintético. A faixa de temperatura foi desde 25°C até 1100°C .

Figura 13: Termobalança SDT Q600TA instruments.



Fonte: Autoria própria.

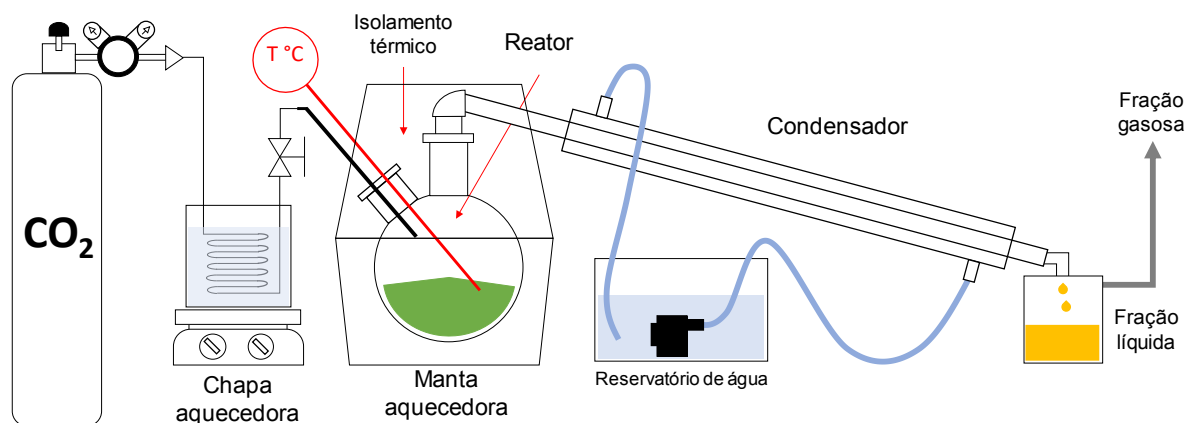
3.3 Bancada experimental

Para a realização dos experimentos de torrefação do BCA foi utilizado como reator um balão de fundo chato com duas bocas em borossilicato e volume de 1000 ml. Em uma das entradas foi adaptado uma rolha de borracha onde além de vedar a saída de gases, ocorre também a entrada do gás de arrasto, no caso o CO₂, e a colocação do termopar tipo “K” para a medição da temperatura da biomassa. O gás de arrasto é utilizado com o objetivo de promover a saída dos voláteis e tornar o ambiente inerte, antes do gás entrar no sistema é realizado o seu aquecimento através da passagem por uma bobina submersa em água fervendo.

Como fonte de aquecimento do BCA foi utilizada uma manta aquecedora com regulador de potência interno e temperatura máxima de trabalho de 300 °C, o controle da temperatura será realizado a partir da variação da potência da manta aquecedora de acordo com a temperatura apresentada pelo termopar, com o objetivo de manter valores próximos à temperatura desejada. Para auxiliar no controle da temperatura o balão será revestido por lã de vidro cobrindo toda sua superfície.

Na segunda entrada do balão é utilizado um cotovelo para conectar o balão ao condensador e com auxílio de uma bomba, o sistema é refrigerado com água, assim, os gases condensáveis foram retidos em um Erlenmeyer acoplado ao condensador e a fração de gás não condensável é liberada. A Figura 14 representa a banca experimental. Após o término do processo de torrefação o BCA torreficado é retirado do balão e armazenado em sacos plásticos com identificação para posteriores análises. Devido a apresentar pouca quantidade, e não ser o objetivo do estudo, a fração líquida foi descartada.

Figura 14 – Bancada para os ensaios de torrefação.



Fonte: Autoria própria.

A Equação 1 apresenta o balanço de massa do processo de torrefação, onde a quantidade de BCA torreficado e a fração líquido serão coletados, assim a fração de gás será determinada por diferença em comparação a massa de BCA inicial.

$$m_{BCA} = m_{BCA \text{ torreficado}} + m_{\text{fração líquida}} + m_{\text{fração gasosa}} \quad (1)$$

3.4 Planejamento experimental

O aquecimento do BCA será realizado através da manta aquecedora na potência 2 até atingir a temperatura máxima desejada, e assim, esta temperatura será mantida por um tempo pré-definido. As condições para os experimentos estão dispostas na Tabela 2. Os experimentos serão realizados em duplicata de forma a aumentar a confiabilidade dos resultados obtidos.

Tabela 2 – Condições dos experimentos de torrefação.

Experimentos	Temperatura (°C)	Tempo (min)
1	200	30
2	200	60
3	300	30
4	300	60

Fonte: Autoria própria.

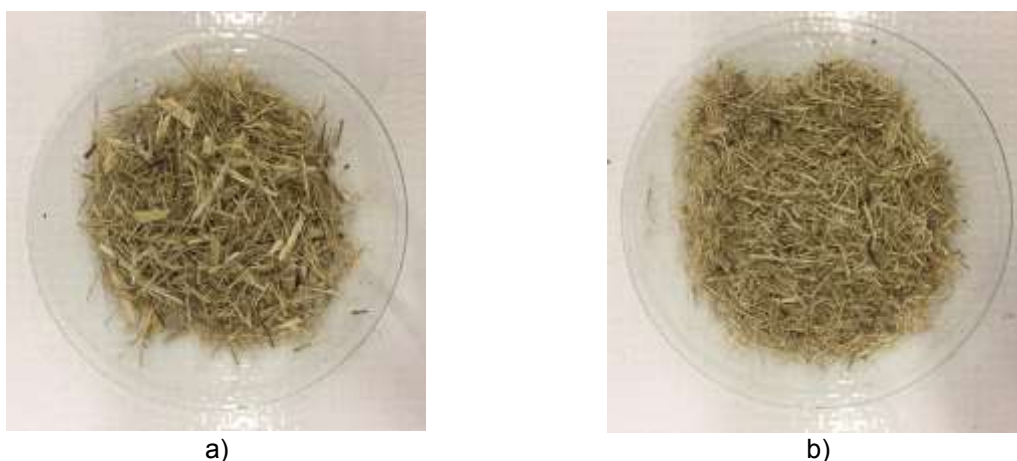
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização físico-química do BCA

As Figuras 15a e 15b representam o BCA *in natura* e após a moagem, respectivamente.

Devido ao tamanho e formato irregular do BCA, foi necessário executar um processo de moagem. Nos diferentes trabalhos consultados na literatura referente a torrefação, não há um tamanho de partícula padrão. Assim, por razões técnicas a granulometria adotada para os ensaios foi de 250 a 500 μm .

Figura 15 – Bagaço de cana-de-açúcar a) *in natura*; b) moído.



Fonte: Autoria Própria

Através da realização da análise composicional livre de extrativos do BCA *in natura* foi obtida a sua composição em relação aos seus componentes, dados dispostos na Tabela 3.

Tabela 3 – Análise composicional do BCA.

Componente	Porcentagem de massa (%)
Hemicelulose	29,74
Celulose	51,64
Lignina	20,67

Fonte: Autoria Própria.

A soma obtida entre as porcentagens foi de 102,05 %, esta variação pode ser decorrente de falhas no processo de análise e também devido a análise composicional nos fornecer a fração de holocelulose e celulose, sendo a holocelulose a soma da celulose e hemicelulose.

Uma amostra do BCA moído foi submetida a uma análise imediata para a determinação de seu teor de umidade, material volátil, carbono fixo e cinza, assim como a determinação de seu poder calorífico. Na Tabela 4 estão dispostos os dados obtidos por estas análises.

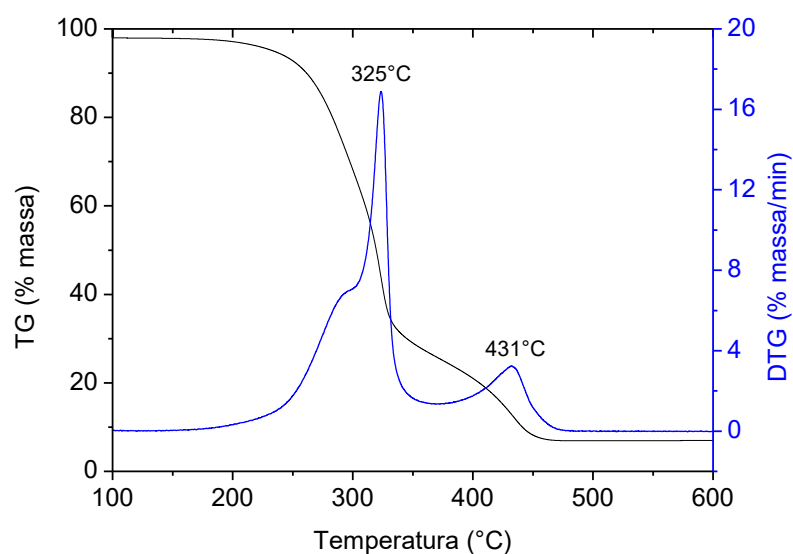
Tabela 4 – Análise imediata do BCA.

Parâmetros	BCA <i>in natura</i>
% H₂O	1,98
% Material Volátil	76,24
% Carbono fixo	10,17
% Cinza	2,29
PCS (MJ/kg)	15,80
Fonte: Autoria própria.	

Pode-se observar na Tabela 4 a grande quantidade de material volátil em relação ao carbono fixo, este é o motivo da baixa densidade de energia e baixa eficiência energética do BCA *in natura*. Devido ao BCA ser uma material higroscópico apresentou-se um teor de umidade de 2% mesmo após a secagem do material. Isto ocorre devido ao material absorver facilmente a umidade do ambiente.

A Figura 16 representa as curvas termogravimétricas (TG) e diferencial termogravimétricas (DTG) do BCA *in natura*.

Figura 16. Curvas TG/DTG do BCA *in natura*.



Fonte: Autoria própria.

A curva termogravimétrica representa a variação do percentual de massa do BCA com o aumento da temperatura. Através da análise da Figura 16 pode-se observar que o percentual de redução de massa cresce acentuadamente após atingir 200 °C e estabiliza acima de 450 °C, apresentando uma degradação de aproximadamente 90% em massa nesta faixa de temperatura.

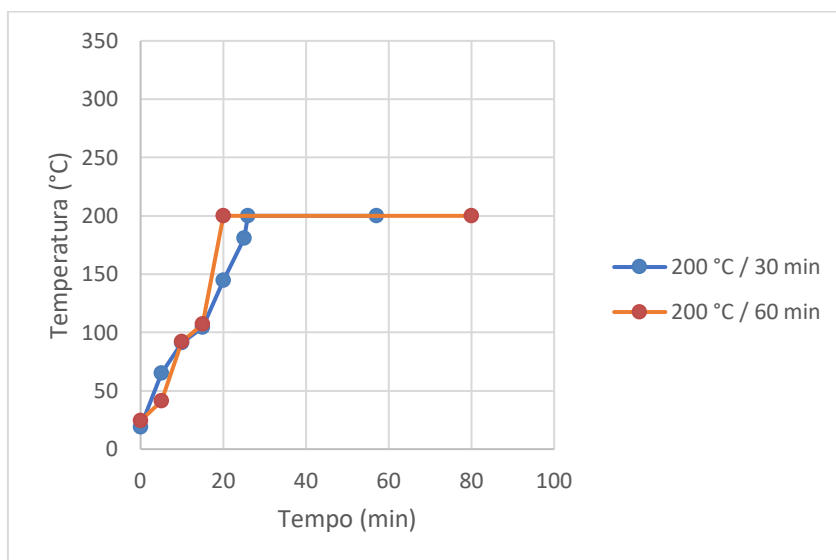
A curva DTG representa a variação de massa por minuto, pode-se observar que o BCA *in natura* apresentou dois picos de redução de massa, nas temperaturas 325 °C e 431 °C. Onde na temperatura de 325 °C ocorre principalmente a decomposição térmica da celulose, enquanto que a 431°C corresponde à lignina. A curva também apresenta um ombro o qual corresponde à decomposição da hemicelulose, o qual ocorre em torno de 280 °C.

Para verificar o efeito da temperatura e do tempo de residência sobre os componentes do BCA será utilizado a curva DTG do BCA *in natura* como referência.

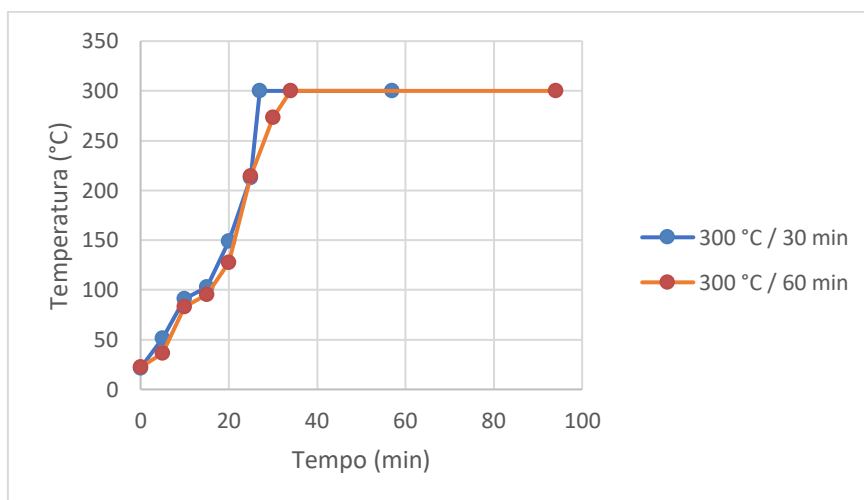
4.2 Torrefação do BCA

As Figuras 17a e 17b apresentam o comportamento da temperatura do BCA no processo em função do tempo para os experimentos a 200 °C e 300 °C, respectivamente.

Figura 17 – Razão de aquecimento dos experimentos realizados a: a) 200 °C; b) 300 °C.



a)



b)

Fonte: Autoria própria.

Através da análise das Figuras 17a e 17b é possível verificar que foi obtido uma taxa de aquecimento média de aproximadamente 8,55 °C/min, este valor foi determinado de forma experimental.

Pode-se observar nas Figuras 17a e 17b que a razão de aquecimento dos experimentos não é similar, porém estas pequenas alterações não afetam nos resultados do experimento. As alterações podem ser derivadas de diversos fatores como a temperatura inicial do material, a superfície de contato entre o termopar e o material e até a forma como o balão foi revestido pela lã de vidro, assim alterando o isolamento térmico do reator.

4.3 Rendimentos da torrefação do BCA

Após a realização dos experimentos de torrefacção foi realizada uma análise da quantidade de BCA torreficado obtido e as frações de líquido e gás, respectivamente. A Tabela 5 apresenta uma comparação entre a quantidade de BCA antes e após o processo de torrefação, através da Equação 1 foram determinadas as massas dos produtos da torrefação.

Tabela 5 – Análise dos experimentos de torrefação.

Experimento	Inicial		Final					
	Massa BCA (g)	Massa Balão (g)	Massa BCA (g)	Massa Balão (g)	Perdas (g)	Massa sólida (g)	Massa líquido (g)	Massa gás (g)
200 °C / 30 min	20,6167	315,4	8,2607	316,9	1,5	9,76	7,0	3,86
200 °C / 60 min	20,0000	313,5	8,8662	314,1	0,6	9,4662	8,4	2,13
300 °C / 30 min	20,5530	315,6	6,5726	316,8	1,2	7,7726	8,1	4,68
300 °C / 60 min	20,8667	313,5	6,4235	314,6	1,1	7,5235	8,2	5,14

Fonte: Autoria própria.

A variação entre a massa inicial e final do balão é devido a após o término do processo de torrefação, parte do BCA torreficado fica aderido ao balão, esta fração de BCA aderido ao balão é representado pela coluna “Perdas” e não pode ser aproveitado após a limpeza do balão.

Com os dados da Tabela 5 foi calculado o rendimento dos produtos para cada experimento de acordo com seus parâmetros utilizados, os resultados estão dispostos na Tabela 6.

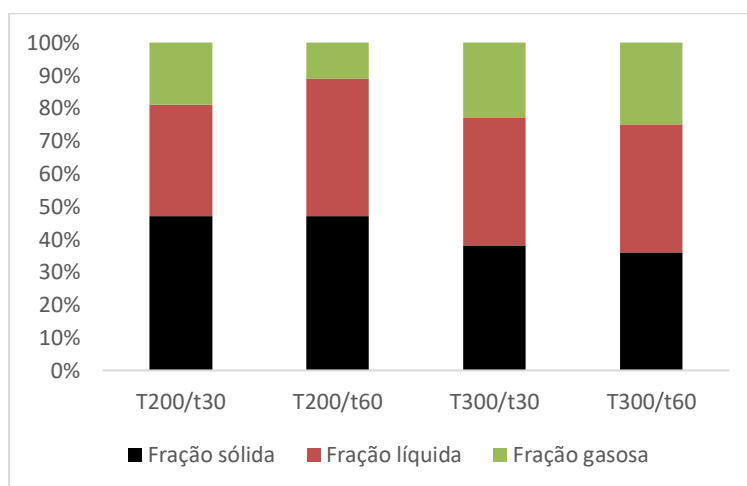
Tabela 6 – Rendimentos da torrefação do BCA.

Experimento	Rendimento		
	Sólido	Líquido	Gás
200 °C / 30 min	0,47	0,34	0,19
200 °C / 60 min	0,47	0,42	0,11
300 °C / 30 min	0,38	0,394	0,23
300 °C / 60 min	0,36	0,393	0,25

Fonte: Autoria própria.

Os dados da Tabela 6 foram dispostos em forma de gráfico (Figura 18) para uma melhor visualização da diferença entre os experimentos.

Figura 18 - Rendimentos da torrefação do BCA.



Fonte: Autoria própria.

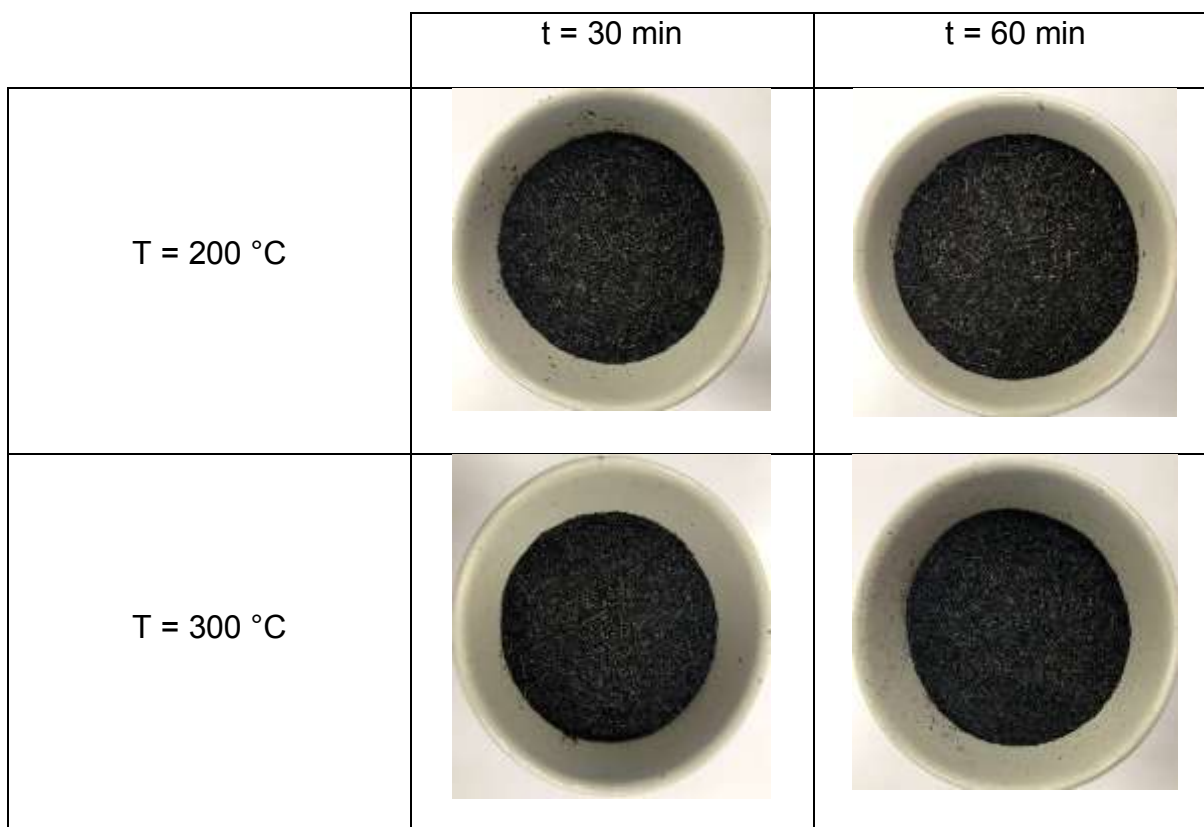
A torrefação a 300 °C provocou uma redução significativa do rendimento da fração sólida quando comparada com a obtida a 200 °C, um incremento do tempo de processo a 300 °C reduziu levemente o rendimento da fração sólida. A redução da fração sólida deve-se a uma decomposição térmica mais agressiva dos componentes do BCA, isto deu origem a um aumento da fração de líquido e gás.

Pode-se observar que a fração de líquido, considerando as 4 condições de processo, se mantém praticamente constante, o que revela que o tempo e temperatura não apresentaram grande influência nesse rendimento. A fração gasosa nas condições a 300 °C apresentaram um incremento quando comparado com a torrefação a 200 °C. Os valores da fração gasosa não apresentaram influência significativa em relação a alterações no tempo de processo.

Doat (1985) observa que o processo de torrefação apresenta um rendimento sólido médio de 75% em massa. Dessa forma podemos observar que nos experimentos realizados foi obtido uma degradação térmica do material mais agressiva, de forma que o maior rendimento sólido obtido foi de 47%.

A Figura 19 representa as amostras de BCA torreficado.

Figura 19 - Amostras de BCA torreficado.



Fonte: Autoria própria.

Através da análise da Figura 19 pode-se observar uma leve diferença na coloração do BCA torreficado entre os experimentos realizados a 200 °C e 300 °C, onde os materiais torreficados a 200 °C apresentam um tom cinza escuro com alguns pontos marrons e enquanto os materiais torreficados a 300 °C apresentam um tom preto, pode-se inferir que nesta condição o BCA torreficado apresenta semelhança com o biochar obtido através do processo de pirólise.

Adicionalmente, pode-se notar que o BCA torreficado a 200 °C apresentou um cheiro mais forte devido à presença de material volátil no material, dessa forma, o BCA torreficado a 300 °C apresentou um cheiro mais fraco devido a um maior desprendimento de material volátil.

Amostras de BCA torreficado foram submetidas a uma análise imediata para assim poder comparar com os resultados do BCA *in natura*, os dados obtidos estão representados na Tabela 7.

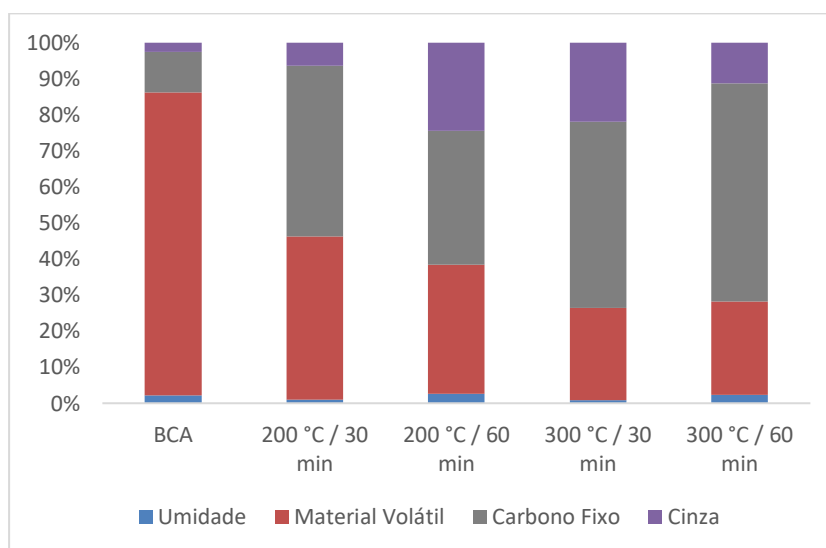
Tabela 7 – Análise imediata do BCA torreficado.

	BCA <i>in natura</i>	1	2	3	4
% H₂O	1,98	0,97	2,65	0,86	2,26
% Material Volátil	76,24	43,87	35,27	24,98	25,62
% Carbono fixo	10,17	45,72	36,62	50,38	59,69
% Cinza	2,29	6,22	24,15	21,41	11,05
PCS (MJ/kg)	15,80	25,01	24,20	27,28	28,60

Fonte: Autoria própria.

Os dados de teor de umidade, material volátil, carbono fixo e cinza das Tabelas 4 e 7 foram dispostos em um gráfico para comparação (Figura 20).

Figura 20 – Análise imediata do BCA torreficado.



Fonte: Autoria própria.

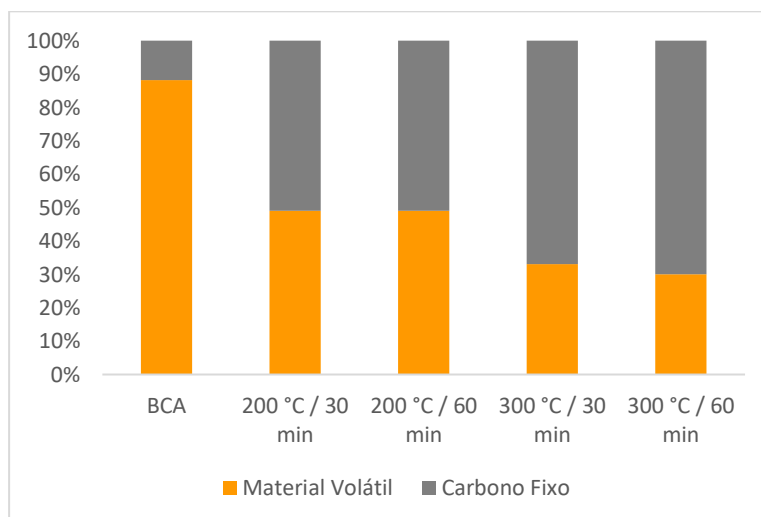
Da Figura 20 é possível verificar que o processo de torrefação ocasionou em uma grande redução no percentual de material volátil e aumento do carbono fixo. Em relação ao PCS foi obtido um aumento de mais de 50% em todos os casos, quando comparado ao PCS do BCA *in natura*, através da comparação entre os resultados pode-se verificar que os valores obtidos para o PCS nos experimentos realizados a 200 °C e a 300 °C foram próximos e que o tempo de permanência na isoterma também não apresentou um aumento considerável do PCS. Comparando com o resultado

obtido por Conag (2017) em um experimento de torrefação, o valor obtido para o PCS foi de 26 MJ/kg, dessa forma os experimentos realizados apresentaram similaridade com resultados da literatura.

Nos testes realizados durante 30 minutos foi possível observar uma grande redução do teor de umidade do BCA, desta forma minimizando os problemas de deterioração do material quando armazenado. Analisando apenas a fração de material volátil e carbono fixo no BCA, pode-se observar na Figura 20 a variação do percentual de massa obtido nos processos de torrefação.

Através da análise da Figura 21 e dos resultados dispostos na Tabela 7 em relação ao PCS, pode-se verificar uma influência direta da quantidade de carbono fixo no material em relação ao aumento do PCS. Isso ocorre devido ao material volátil corresponder a componentes orgânicos que apresentam uma quantidade significativa de oxigênio.

Figura 21 – Fração de material volátil e carbono fixo.



Fonte: Autoria própria.

A Tabela 8 representa o pH do BCA torreficado. É possível observar que o processo de torrefação resulta em um aumento no pH, e em ambos os casos o maior pH encontrado foi para os experimentos com $t = 30$ minutos. Os valores de pH demonstram uma característica ácida do BCA torreficado, o qual deve ser considerado quando o material seja queimado, já que pode promover corrosão no interior de uma

câmara de combustão de biomassa. O aumento no pH ocorre devido a evaporação de ácidos orgânicos durante o processo de torrefação.

Tabela 8. pH dos materiais torreficados.

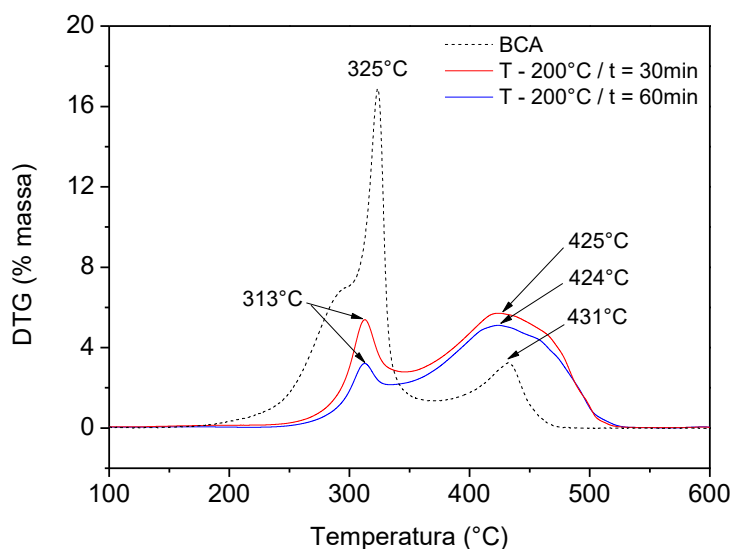
Experimento	pH
1	5,64
2	5,50
3	6,29
4	5,47

Fonte: Autoria própria.

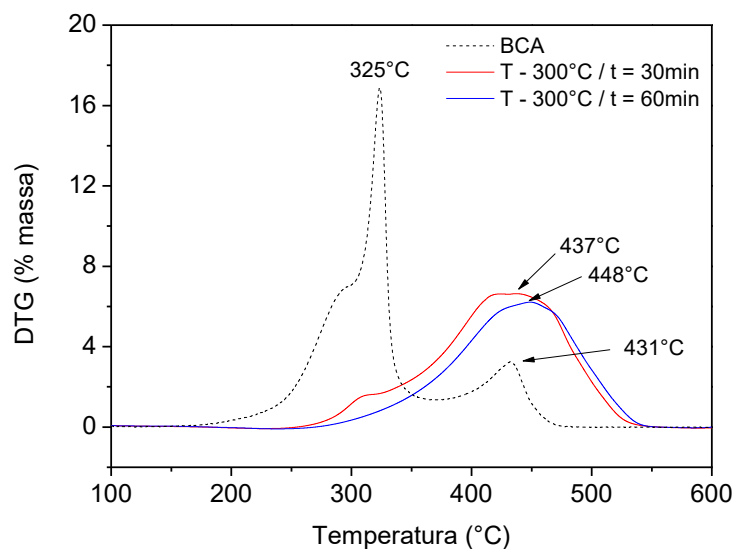
4.4 Análise térmica do BCA torreficado.

Nas Figuras 22a e 22b estão representadas as curvas DTG para o BCA torreficado a 200°C e 300°C. Pode-se observar na Figura 23 que curva DTG do BCA torreficado a 200°C apresenta um comportamento similar ao BCA *in natura* apresentando o primeiro pico de perda de massa com 313 °C. Na temperatura de 250° C o percentual de perda de massa por minuto é praticamente zero, diferente do BCA *in natura*, isso ocorre devido a uma grande quantidade de materiais voláteis e hemicelulose já terem sido eliminados durante o processo de torrefação.

Figura 22. Curvas DTG do BCA torreficado a: a) 200°C; b) 300°C.



a)



b)

Fonte: Autoria própria.

O pico de perda de massa a 313 °C é um indicativo que ainda existe a presença de uma fração de celulose. No entanto, o BCA torreficado obtido a 300 °C apresenta uma redução no valor do DTG, isto significa que uma fração maior de celulose foi degradada termicamente.

Assim, um aumento do tempo de processo promove uma maior decomposição da celulose. Referente a fração de lignina no BCA torreficado, observa-se um aumento do DTG quando comparado ao do BCA. Os resultados demonstram que o BCA torreficado a 200 °C basicamente é composto de uma fração de lignina e uma fração mínima de celulose.

Em relação a Figura 22b, na curva DTG para o BCA torreficado a 300 °C observa-se um crescimento considerável apenas para temperaturas acima de 350 °C, isso ocorre devido a uma boa parte da celulose já ser degradada termicamente durante a torrefação, desta forma apresentando uma grande concentração de lignina, assim necessitando de temperaturas mais elevadas para a queima do material.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram realizados estudos técnicos a respeito da utilização do processo de torrefação em indústrias sucroalcooleiras como um pré-tratamento térmico antes da sua queima. O estudo foi desenvolvido através da realização da análise das propriedades do BCA *in natura* e após a torrefação.

Da análise energética, obteve-se que em todas as configurações propostas, existe um aumento no poder calorífico superior do BCA, ou seja, ocorreu um aumento na quantidade de energia por unidade de massa. Onde o PCS do material *in natura* era de 15,80 MJ/kg e após os experimentos de torrefação aumentaram para em média 24,60 MJ/kg para os experimentos realizados a 200 °C e 27,94 MJ/kg para os experimentos realizados a 300 °C.

Outros benefícios apresentados pelo processo de torrefação foram a redução de material sólido, devido a eliminação dos materiais voláteis, e a redução do teor de umidade do BCA, desta facilitando o armazenamento do material e minimizando as perdas de material por deterioração.

Através da análise dos resultados dos quatros experimentos realizados pode-se concluir que o efeito do aumento da temperatura e tempo no processo resulta em poucas alterações no aumento da densidade energética e PCS do BCA. No entanto, a temperatura apresentou um efeito significativo em relação aos rendimentos do processo. Os resultados apontam que para aumentar o rendimento da fração sólida, a temperatura do processo deve ser inferior a 200 °C.

Sendo assim a alternativa mais adequada para implantação é a realização do experimento a 200 °C durante 30 minutos, devido a utilizar menos energia para o tratamento do material e apresentar um maior rendimento de material sólido, enquanto a 300 °C apresenta um menor rendimento de material sólido devido a apresentar uma maior produção de fração líquida.

6 SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros considera-se a realização de:

- Analisar a composição da fração líquida e gasosa para seu uso como combustível para o próprio processo de torrefação.
- Análise energética e econômica do processo de torrefação.

7 REFERÊNCIAS

ALTERNATIVAS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL NO BRASIL: A OPÇÃO PELA BIOMASSA. Available from: https://www.researchgate.net/publication/241751628_ALTERNATIVAS_PARA_A_GERACAO_DE_ENERGIA_RENOVAVEL_NO_BRASIL_A_OPCAO_PELA_BIOMASSA [accessed Sep 27 2018].

AGITADOR Eletromagnético de Peneiras. Disponível em: <https://www.lojalab.com.br/produto_agitador-eletromagnetico-de-peneiras---granulometria_67>. Acesso em: 03 nov. 2018.

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2008. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/2008_AtlasEnergiaEletricaBrasil3ed/297ceb2e-16b7-514d-5f19-16cef60679fb>. Acesso em: 27 set. 2018.

ARANTES, D.C. **BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: ANÁLISE TÉRMICA E ENERGÉTICA DE BIOMASSA**, 2014. 99p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ARRUDA PINTO, RICARDO SOARES de. (2002). **Indicadores de desempenho de frota de empresas agroindustriais canavieiras brasileiras**. Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

BAYER CropScience lança seu primeiro fungicida para cana-de-açúcar. 2016. Disponível em: <<https://www.dinheirorural.com.br/noticia/agrotecnologia/bayer-cropscience-lanca-seu-primeiro-fungicida-para-cana-de-acucar>>. Acesso em: 03 nov. 2018.

BIOMASSA. 2015. Disponível em: <<https://quimicanocemo.wordpress.com/2015/09/18/biomassa-2/>>. Acesso em: 01 out. 2018.

Bridgwater, **Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass**, Chem. Eng. J. 91 (2003) 87–102.

Cadeia produtiva da indústria sucroalcooleira: Cenários econômicos e estudos setoriais. Recife: Sebrae, 2008.

CASTRO, Nivalde José de; Dantas, Guilherme de A. **A Bioeletricidade Sucroalcooleira e o Hiato entre Oferta Potencial e Oferta Efetiva**. IFE n. 2.213, Rio de Janeiro, 28 de fevereiro de 2008.

CASTRO, Nivalde José de; DANTAS, Guilherme de Azevedo. **Lições do PROINFA e do Leilão de Fontes Alternativas para a Inserção da Bioeletricidade Sucroalcooleira na Matriz Elétrica Brasileira.** UFRJ, 2008.

CHEN, Wei-hsin; PENG, Jianghong; BI, Xiaotao T.. **A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications.** 2015.

CORRÊA NETO, V; RAMON, D. **Análise de Opções Tecnológicas para Projetos de cogeração no Setor Sucroalcooleiro.** Setap. Brasília, 2002.

Dayton, D.C.; Belle-Oudry, D.; Nordin, A. **Effect of coal minerals on chlorine and alkali metals released during biomass/coal firing.** Energy Fuels 1999, 13, 1203–1211

Demirbas A. **Biorefineries: For Biomass Upgrading Facilities.** [s.1.] Springer Science & Business Media, 2009.

Demirbas A. **Heavy metal adsorption onto agro-based waste materials: A review.** Journal of Hazardous Materials, v. 157, n. 2-3, p. 220-229, 2008.

Demirbas A. **Pyrolysis of ground beech wood in irregular heating rate conditions.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 73, n. 1, p. 39-43, 2005.

DIEESE. **Desempenho do setor sucroalcooleiro brasileiro e os trabalhadores.** 2007. Disponível em: <https://www.dieese.org.br/estudosepesquisas/2007/estpesq30_setorSucroalcooleiro.pdf>. Acesso em: 01 out. 2018.

Doat, J. **Un nouveau produit énergétique pour les pays en développement.** Le bois torréfié. In: Revue bois et forets des tropiques, n. 208, 1985. p 57-67.

FERREIRA, L.F.R. **Biodegradação de vinhaça proveniente do processo industrial de cana-de-açúcar por fungos.** 2009. 135 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

FERREIRA, Vitor Francisco; ROCHA, David Rodrigues da; SILVA, Fernando de Carvalho da. **Potencialidades e oportunidades na química da sacarose e outros açúcares.** Departamento de Química Orgânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Niterói, 2009.

GARCÍA, Roberto; PIZARRO, Consuelo; LAVÍN, Antonio G.; BUENO, Julio L.. **Bioomass proximate analysis using thermogravimetry**. Department Of Chemical Engineering And Environmental Technology, University Of Oviedo, Oviedo, 2013.

GRANADOS, D.a.; RUIZ, R.a.; VEGA, L.y; CHEJNE, F.. **Study of reactivity reduction in sugarcane bagasse as consequence of a torrefaction process**. 2017. 10 f. Universidad Nacional de Colombia.

IRAWAN, Anton; .S, Latifah Upe; I.P, Meity Dwi. **Effect of Torrefaction Process on the Coconut Shell Energy Content for Solid Fuel**, 2017.

KLAFKE, André Figueiró. **Torrefação de Resíduos da Indústria de Papel e Celulose como Pré-tratamento para Produção de Bio-Óleo via Pirólise Rápida**. 2018. 50 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

LIMA, C. J. M. **ANÁLISE DE PROPRIEDADES TÉRMICAS DE BRIQUETES DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR**. 2018. 43 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2018.

LUCCHESI, A.A.- **Processos fisiológicos da cultura da cana-de-açúcar (Saccharum spp)**. Piracicaba. ESALQ/USP, 1995.

MANTELATTO, P. E. **Estudo do processo de cristalização de soluções impurase sacarose de cana-de-açúcar por resfriamento**. 272 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2005.

MAPA DA PRODUÇÃO. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/mapa-da-producao/>>. Acesso em: 03 nov. 2018.

MARCONATO, Mariane Silva; SANTINI, Giuliana Aparecida. **ALTERNATIVAS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL NO BRASIL: A OPÇÃO PELA BIOMASSA**. 2008. Disponível em: <<https://mac.arq.br/wp-content/uploads/2016/03/biomassa-brasil.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2018.

PATEL, B.; GAMI, B.; BHIMANI, H. **Improved fuel characteristics of cotton stalk, prosopis and sugarcane bagasse through torrefaction**. Energy for Sustainable Development, v. 15, n. 4, p. 372-375, 2011.

P. McKendry, Energy production from biomass (part 1): overview of biomass, Bioresour. Technol. 83 (2002) 37–46.

Rennenberg, H.; Brunold, C. H.; De Kok, L. J.; Stulen, I. **Sulfur nutrition and sulfur assimilation in higher plants**; SPB Academic Publishing: The Hague, 1990; pp 3–76.

Saidur R.; Abdelaziz E. A.; Demirbas A.; Hossain M. S.; Mekhilef S. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews. Elseviers**, v. 15, p. 2262-2289, 2011.

Silva G.; Nakamura N. M.; Iha K. Estudo cinético da decomposição térmica do pentaeretriol-tetranitrado (PENT). **Química Nova**, São Paulo, v. 31, n.8, p. 2060-2064, 2008.

SUPRAMONO, Dijan; DEVINA, Yosephine Merry; TRISTANTINI, Dewi. **EFFECT OF HEATING RATE OF TORREFACTION OF SUGARCANE BAGASSE ON ITS PHYSICAL CHARACTERISTICS**. Department Of Chemical Engineering, Faculty Of Engineering, Universitas Indonesia, 2015.

TORRES, Nádia Hortense; SARTORI, Sérgio Birello; AMÉRICO, Juliana Heloisa Pine; FERREIRA, Luiz Fernando Romanholo. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, Alta Floresta-MT, v.10, n.2, p.225-236, 2012.

ÚNICA (2004) – Acúcar e álcool do Brasil – Commodities da Energia e do Meio Ambiente. União da Agroindústria Canavieira de São Paulo, maio de 2004.