

## TECNOLOGIAS DE PRÉ-TRATAMENTO PARA PIROLÍSE RÁPIDA DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

NEYDA OM TAPANES<sup>1</sup> PEDRO BEATON SOLER<sup>2</sup>, ANA ISABEL DE CARVALHO SANTANA<sup>1</sup>, RODOLFO SALAZAR PEREZ<sup>2</sup>, NATHALIA CERQUEIRA DA SILVA<sup>2</sup>, ALINE ARAÚJO DOS SANTOS<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Fundação Centro Universitário Estadual da Zona Oeste

<sup>2</sup> Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia dos Materiais, UEZO, RJ, Brasil

### RESUMO

O bagaço de cana-de-açúcar (BCA) é a biomassa lignocelulósica mais abundante no Brasil e se prevê um aumento da produção nos próximos anos, sendo uma promissora fonte na geração de energia elétrica e matéria prima para químicos e outros produtos de maior valor agregado. No entanto, o BCA possui algumas propriedades indesejáveis que limitam a sua conversão termoquímica eficiente, fazendo necessário a realização de pré-tratamentos antes da reação de conversão em produtos de maior valor energético e comercial. Neste artigo se apresenta uma revisão bibliográfica sobre as propriedades físicas e químicas do BCA, assim como as técnicas utilizadas no pré-tratamento do bagaço e sua influência na obtenção de bio-óleo mediante a pirólise rápida. Os processos de secagem até uma umidade final menor do que 10%, a classificação pneumática em duas frações, a torrefação para melhorar suas propriedades mecânicas e energéticas, aumentando sua friabilidade, a pulverização para obter partículas com diâmetros menores do que 1mm, e a lixiviação para diminuir a quantidade de cinzas e aumentar o teor de celulose foram analisados como etapas de pré-tratamento do BCA com o objetivo de incrementar os rendimentos de bio-óleo durante a pirólise rápida.

Palavras-chave: bagaço de cana-de-açúcar; pré-tratamento; pirólise rápida.

### ABSTRACT

Sugarcane bagasse (BCA) is the most abundant lignocellulosic biomass in Brazil and it is expected to increase production in the coming years, being a promising source in the generation of electricity and raw material for chemicals and other higher value products aggregate. However, BCA has some undesirable properties that limit its efficient thermochemical conversion, necessitating the realization of pretreatments before the conversion reaction in higher energy and commercial products. This article presents a literature review on the physical and chemical properties of BCA, as well as the techniques used in the pre-treatment of bagasse and its influence on obtaining bio-oil through fast pyrolysis. The processes of drying to a humidity lower than 10%, pneumatic classification in two fractions, roasting to improve its mechanical and energy properties, increasing its friability, the pulverization to obtain particles with diameters smaller than 1mm and the leaching to decrease the amount of ash and increasing the cellulose content were analyzed as BCA pretreatment steps with the aim of increasing the yields of bio-oil during rapid pyrolysis.

Keywords: sugarcane bagasse; pre-treatment; fast pyrolysis.

### INTRODUÇÃO

De acordo com o Relatório Estado do Clima 2017 [AMS, 2018], divulgado o 1 de agosto de 2018 pela Sociedade Meteorológica Americana, a concentração de dióxido de carbono na superfície da Terra manteve a média

de 405 ppm, atingindo o recorde de 410 ppm em maio de 2017. De acordo com as estatísticas da Organização Meteorológica Mundial, e considerando que na última década o ritmo de crescimento tem sido de 2,5 ppm por ano, esse valor poderá ultrapassar o patamar de 600 ppm 2100 (WMO, 2017). Em setembro de 2016, o Brasil ratificou o

Acordo de Paris e assumiu cortar as emissões de gases de efeito de estufa (GEE) em 37% até 2025 e em 43% até 2030, tendo como base o ano de 2005. Os objetivos de redução de emissões propostos pelo Brasil foram revelados dois meses antes da Conferência do Clima de Paris (COP 21). Para lograr essa meta o país terá que aumentar a participação de fontes renováveis (solar, eólica, biomassa, etc.) na matriz energética (MMA, 2018).

Neste contexto a produção e uso de biomassas deve-se destacar dentre as alternativas, considerando que não produz nenhuma quanti-

dade líquida de CO<sub>2</sub> na atmosfera, o que coloca esta matéria prima como uma promissora fonte de energia e químicos diversos.

O BCA é a biomassa lignocelulósica mais abundante do Brasil, sendo um subproduto obtido após a extração do suco da cana de açúcar, por cada tonelada de cana se produz 270 kg de BCA (UNICADATA, 2018).

A Figura 1 mostra a produção de bagaço de cana no período 2008-2018. Observa-se na Figura 1 que na safra 2017-2018 foram produzidas 173,088 milhões de toneladas de BCA, este valor representa 3,6% a menos que a produzida em 2016. Os especialistas revelaram que a leve queda na produção foi devida à diminuição da área de colheita de cana de açúcar, reflexo de problemas climáticos (SF Agro 2018).

Em 2016, quando foi reportado o máximo de produção de bagaço do período, foi realizado um estudo de projeção pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2016; MME, 2016). No estudo foi estimado que o consumo de energia no Brasil para o ano 2050 deveria aumentar mais de duas vezes, ou seja, a produção de cana-de-açúcar deverá alcançar cerca de 1.050 milhões de toneladas (TOLMASQUIN, 2016). Esta estimativa equivale à produção de 283,5 milhões de toneladas de BCA com 50% de umidade. O BCA é comumente queimado em caldeiras de baixa eficiência a fim de atender às demandas de energia da própria usina de açúcar. Considerando que uma usina utiliza nas caldeiras cerca de 70% do BCA produzido, os 30%

(85,05 milhões de toneladas será BCA excedente que pode ser usado para outros fins: bioeletricidade, bio-óleo, químicos, ração animal e outros (BRIDGWATER 2012; ANUKAM, 2016).

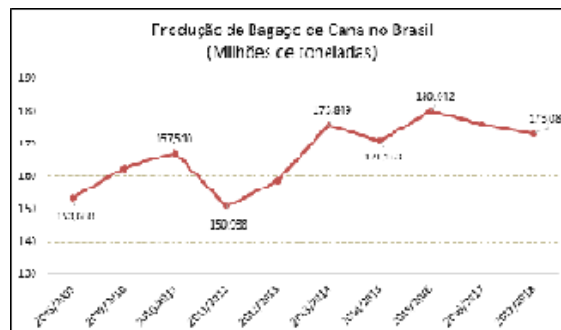


Figura1. Produção brasileira de Bagaço de cana-de-açúcar (BCA) (adaptado da UNICADATA, 2018).

A biomassa pode ser transformada em combustíveis de maior valor energético por diferentes rotas (térmica, biológica e mecânica) (BRIDGWATER 2012). Dentre as rotas térmicas destaca-se a pirólise, definida como a decomposição térmica na ausência de oxigênio (MANYA, 2008). Os produtos da pirólise são bio-óleo, gás e carvão, e a quantidade de cada um depende das características da biomassa (densidade, umidade quantidades de compostos voláteis, carbono fixado, cinzas, tamanho de partícula) e das variáveis do processo (taxa de aquecimento, temperatura, pressão, tempo de residência dos produtos) (BRIDGWATER 2012).

A pirólise térmica pode ser classificada em rápida, intermediária e lenta, em função das condições experimentais adotadas. Cada tecnologia prioriza determinado produto e exhibe vantagens e limitações. A pirólise rápida, objeto desta revisão, caracteriza-se por uma taxa de aquecimento lenta e um longo tempo de residência, produzindo maior quantidade de bio-óleo (BASU 2010); enquanto a pirólise lenta produz maiores quantidades de carvão (CARRIER, 2011). Na pirólise rápida são necessários taxa de aquecimento acima de 100°C/min, altos valores do coeficiente de transferência de calor entre a fase gasosa e a superfície da partícula, baixo diâmetro de partícula, um bom controle da temperatura do processo e rápido arrefeci-

intermediária é empregada para produzir quantidades equivalentes de líquidos e sólidos, utilizando-se parâmetros operacionais intermediários entre a pirólise lenta e rápida (CAI, 2017).

O bio-óleo produto de pirólise e constituído por aproximadamente 200 tipos de compostos orgânicos (ASADULLAH, 2007) pode ser usado para a combustão em fornos, motores e turbinas para geração de energia, e como matéria-prima para a indústria química e farmacêutica (ASADULLAH, 2007; CARRIER, 2011). Porém o bio-óleo obtido a partir da pirólise de biomassa tem características indesejáveis, tais como altos teores de oxigenados, elevada acidez, instabilidade, umidade, alta viscosidade e baixo valor calórico, sendo requerido um tratamento para seu uso (GOLLAKOTA, 2016).

Vários estudos têm sido desenvolvidos sobre a pirólise de bagaço, principalmente em escala de laboratório e para diferentes condições e tipos de reatores (RODRIGUEZ, 1987; GARCIA, 2002; TSAI, 2006; ASADULLAH, 2007; PENEDO, 2008; ISLAM, 2010; ISLAM, 2010<sup>a</sup>; GONZALES, 2010; CARRIER, 2011; MONTTOYA, 2015; SOHAIB, 2017; TREEDET e SUNTIVARAKORN, 2017), por isso nem sempre é possível comparar os rendimentos (quantidade e qualidade) dos produtos obtidos. Segundo SOHAIB et al, 2017, a pirólise do BCA é uma alternativa promissora para a produção de bio-óleo e valiosos químicos.

O BCA tem características indesejáveis para a sua eficiente, manipulação e conversão energética, como alto teor de umidade (PURANIK, 2009), higroscópico (BISINELLA, 2015), baixa densidade (RASUL, 1999), alta capacidade de vazão, alto grau de polimorfismo e polidispersão (PATEL, 2011), estrutura porosa e fibrosa (BISINELLA, 2015), alta tenacidade (difíceis de moer) (REN, 2017), baixo poder calorífico (ANUKAM, 2016), alto teor de substâncias voláteis e alta capacidade de reação (VARMA, 2016). Todas estas características tornam difícil o processo de pirólise, como por exemplo, torna complexo o processo de alimentação e controle dos parâmetros operacionais no reator, diminui a capacidade do equipamento

dificulta a aerodinâmica dos processos e principalmente produz bio-óleos de alta acidez, alta umidade e baixo poder calorífico, encarecendo a logística.

As propriedades físicas e químicas do BCA podem variar de acordo com as condições de cultivo da cana (características dos solos, topografia, maturidade e variedade da cana, método e época do ano da coleta, fatores do plantio, da drenagem, da irrigação e da fertilização) e do processo de extração da sacarose na usina (grau de preparação da cana, intensidade de moagem) (WHITE, 2011; WRIGHT, 2016).

A produção de BCA é sazonal e seu armazenamento sem tratamento prévio causa impacto sobre o meio ambiente: combustão espontânea, doenças respiratórias, poluição da água e do ar. Os microrganismos presentes no BCA provocam a degradação do material e podem interferir na obtenção de produtos de interesse comercial (WRIGHT, 2016).

O conhecimento das propriedades do BCA é essencial para o desenho e exploração de tecnologias e processos de pré-tratamento para a sua eficiente conversão energética sem danos para o ambiente. Entretanto, qualquer que seja a rota de transformação termoquímica (combustão, gaseificação ou pirólise) será necessário realizar o pré-tratamento do BCA objetivando a padronização de suas propriedades. Tradicionalmente o pré-tratamento consiste no ajuste da granulometria e da umidade da biomassa, o qual não altera a sua estrutura química. A torrefação consiste em uma tecnologia de pré-tratamento a baixas temperaturas que permite obter resultados promissores na melhoria das características da biomassa, como maior poder calorífico, hidrofobicidade e fiabilidade friabilidade (CHEW, 2011).

No entanto, novos métodos de pré-tratamento e de fracionamento utilizando catalisadores adequados estão criando oportunidades na conversão de biomassa. A utilização de um catalisador adequado em condições reacionais controladas como temperatura, pressão, agitação e tempo de reação pode promover a transformação seletiva da biomassa lignocelulósica

em biocombustíveis e produtos químicos de interesse industrial. (STÖCKER, 2008; RINALDI, 2009; BULUSHEVA, 2011; CHERUBINI, 2011; OSORIO 2017).

Esta revisão tem como objetivos descrever os métodos de pré- tratamento do BCA para a pirólise rápida, e mostrar a influência de diferentes parâmetros operacionais sobre a pirólise rápida, objetivando a obtenção de maior qualidade e quantidade do bio-óleo.

## 2. PROPRIEDADES FÍSICAS DO BCA

### 2.1. Tamanho de partícula

Numerosos estudos têm sido publicados sobre as características granulométricas das partículas de BCA (PONCE, 1983; NEBRA, 1988; RASUL, 1999; DRIEMEIR, 2011; GOMEZ, 2012; JORDAN, 2016). A composição granulométrica do BCA (Figura 2) depende da variedade da cana, do pré-tratamento e de moagem da mesma (POLANCO, 2013) e afeta a fluidez, a transferência de calor e de massa, a velocidade das reações e a porosidade (ZHANG, 2012). Observa-se na Figura 2 que a maior parte das partículas se encontra na fração com diâmetro entre 0,5 e 1 mm. Quando o pré-tratamento é mais intenso com o propósito de obter uma maior extração da sacarose se obtém mais partículas menores que passam a formar parte da chamada fração fina (BEATÓN, 1991).

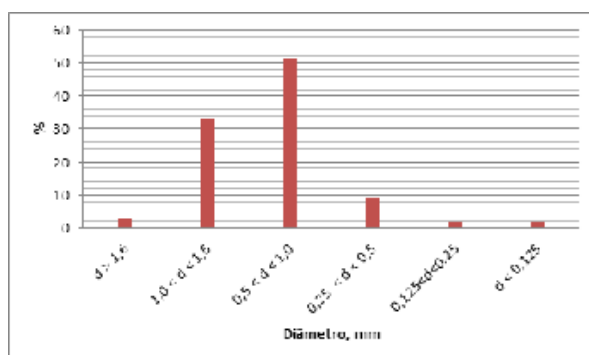


Figura 2 . Distribuição do tamanho de grãos no BCA (adaptado de FILIPPISA, 2004)

O BCA consiste em um material heterogêneo composto pelas frações fibra (55% - 60%), medula (30% - 35%), finos e impurezas (10% - 15%) (ABRIL, 2000). A forma das

partículas de BCA pode variar numa ampla faixa: desde as partículas da medula semelhante a uma esfera (relação comprimento/largura próximo à unidade) até as partículas de fibra e crosta com formas cilíndrica e de paralelepípedo, respectivamente (relação comprimento/largura muito maior que a unidade). O antes exposto faz do BCA um material difícil de manipular e de ser usado em diferentes equipamentos (alimentadores, transporte, secadores, reatores de leito fluidizado, etc.).

A forma e o tamanho das partículas influenciam o rendimento da pirólise. Partículas grandes favorecem a ocorrência de reações secundárias devido à resistência da saída dos voláteis (baixas taxas de aquecimento da partícula devido à baixa condutividade térmica do BCA) e dificultam a formação do bio-óleo (ISLAM, 2010; BASU, 2010).

Altas velocidades de aquecimento em partículas pequenas favorecem o rendimento de bio-óleo do bagaço durante a pirólise (MONTTOYA, 2015). Por outro lado, partículas de pequeno diâmetro são facilmente arrastadas para fora dos limites da zona de reação nos reatores, afetando o rendimento de bio-óleo, o que constitui uma dificuldade para o dimensionamento aerodinâmico dos equipamentos.

Vários critérios podem ser adotados para definir o diâmetro da partícula e consequentemente as distintas propriedades (aerodinâmicas, físicas e termo- físicas) que se determinam a partir desse critério. Para partículas esféricas, o diâmetro médio de tamizado ( $d_p$ ) é calculado a partir do valor da abertura da peneira por onde a partícula passa ( $d_1$ ) e o valor da abertura por onde a partícula fica retida ( $d_2$ ). Para formas diferentes da esférica é necessário o uso do critério de diâmetro equivalente ( $d_e$ ) (Tabela 1).

NEBRA et al., 1988, calcularam o

diâmetro do cilindro equivalente ( $d_e$ ) a partir de duas dimensões geométricas, largura (a) e profundidade (b) da partícula, sem considerar o comprimento, o que constitui uma



insuficiência para partículas com relação comprimento/largura muito maior que a unidade (Ex. fibra e crosta). PONCE et al., 1983, realizaram um detalhado estudo sobre as propriedades geométricas e a densidade de partículas de bagaço de diferentes frações granulométricas. RASUL et al., 1999, utilizaram o critério de diâmetro hidrodinâmico equivalente ( $d_{hed,mm}$ ), ou seja, o diâmetro da esfera (fictício) com igual comportamento hidrodinâmico que a partícula de BCA. BEATON et al., 1999, obtiveram uma equação experimental para o cálculo do diâmetro aerodinâmico da esfera equivalente ( $d^a$ ) a partir destas dimensões da partícula ( $A, B, C$ ) (Tabela 1).

## 2.2. Densidade.

### 2.2.1. Densidade aparente.

Densidade aparente é a relação entre a massa e o volume total das partículas, e considera o volume dos poros e das partículas. A densidade aparente depende do tamanho, da forma, da umidade e das características superficiais das partículas (CAI, 2017). O BCA é um material de baixa densidade (120 a 200 kg/m<sup>3</sup>), o que encarece a manipulação e o transporte, afetando a sua estocagem (NYERS, 2016). Nos reatores para a conversão termoquímica, a baixa densidade aparente afeta o tempo de residência e eficiência de conversão (ZHANG, 2012). Sistemas de entrada de BCA por gravidade são afetados pela baixa densidade aparente (ANUKAM, 2016).

### 2.2.2. Densidade da partícula.

A densidade da partícula é a relação entre a massa e o volume da partícula. Para os cálculos de engenharia e modelagem matemática dos diferentes processos (secagem, transporte, combustão, pirólise, gaseificação, etc.) é necessário conhecer a relação da densidade com o (diâmetro) da partícula. A forma irregular das partículas de BCA dificulta o cálculo de seu volume. Neste sentido, diferentes autores têm

selecionado modelos de figuras regulares para representá-las: cilindro (NEBRA, 1988), paralelepípedo (BEATON, 1999). Outros autores utilizam o diâmetro médio do material peneirado ( $d_p$ ) (PONCE, 1983; ZANATTA, 2016).

Segundo GARCIA et al., 2002, a densidade das frações de partículas grossas de BCA (550 kg/m<sup>3</sup>) pode ser até cerca de 2,5 vezes maior do que a densidade das frações de partículas finas (220 kg/m<sup>3</sup>), dificultando os processos de conversão termoquímica, devido ao fato de que as partículas de menor densidade abandonam com maior facilidade os limites do reator. RASUL et al., 1999, determinaram o valor médio da densidade da partícula ( $\rho_{bag}$ ) por uma relação que considera as densidades e quantidades (frações) de cada um dos possíveis componen-

tes: medula ( $\rho_p X_p$ ), fibra ( $\rho_f X_f$ ) e crosta ( $\rho_r X_r$ ). PACHECO, 1984, concluiu que a densidade da partícula de BCA varia com o diâmetro ( $d_p^*$ , m) e com o comprimento (L, m) da partícula. A Tabela 1 mostra várias equações para o cálculo da densidade da partícula de BCA obtidas experimentalmente por diferentes autores.

Tabela 1. Diâmetro e densidade das partículas de BCA

Diâmetro (mm)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Referência
$d_p = \frac{d_1 + d_2}{2}$ $d_1, d_2$ - diâmetros das superfícies, mm	$\rho_p = 145,5d_p^{0,447}$ $d_p$ - diâmetro da partícula, mm	WALSH et al. 2000
$d_p = \left( \frac{A^2 + B^2 + C^2}{3} \right)^{0,5}$ $A$ - comprimento da partícula, mm $B, C$ - largura e profundidade da partícula, mm	$\rho_p = \frac{1}{\frac{X_p}{\rho_p} + \frac{X_f}{\rho_f} + \frac{X_r}{\rho_r}}$ $\rho_p, \rho_f, \rho_r$ - densidades da medula, fibra e crosta, kg/m <sup>3</sup> $X_p, X_f, X_r$ - frações de medula, fibra e crosta $d_p = 1,3d_1 + d_2 + d_3$	WALSH et al. 1988
$d_p = \frac{d_1 + d_2}{2}$ $d_1, d_2$ - largura e profundidade da partícula, mm	$\rho_p = 0,46 - 0,01$ $\rho_p = 0,36d_p^{-0,114}$ $d_p$ - comprimento da partícula, m $d_1$ - diâmetro da partícula, m $\rho_p = 2,00d_p^{0,22}$ para $d_p \leq 4,03$ $\rho_p = 100d_p^{0,13}$ para $d_p > 4,03$ $d_p$ - largura e comprimento da partícula, mm $d_1$ - diâmetro da partícula, mm	PACHECO 1984
$d_p = \frac{d_1 + d_2}{2}$ $d_1, d_2$ - largura e profundidade da partícula, m	$\rho_p = \frac{0,477}{d_p^{0,13}}$ $d_p$ - largura e profundidade da partícula, m	BEATON et al. 1999

a: largura da partícula calculada pela fórmula  $a = 0,83d_p^{0,8}$ , mm para  $a/d_p \geq 4,83$  e  $a = 1,02d_p^{0,83}$ , mm para  $a/d_p \leq 3,29$ . Em Ponce et al. 1983.

c: comprimento da partícula calculado pela fórmula  $c = 1,59d_p + 11,37$ , mm para  $c/d_p \geq 4,83$  e  $c = 3,16d_p^{0,7}$ , mm para  $c/d_p \leq 3,29$ . Em Ponce et al. 1983

A, B, C: altura, largura e profundidade da partícula, m.

### 2.3. Fluidez e velocidade terminal

Fluidez é a propriedade que caracteriza a capacidade da biomassa de ser transportada de um ponto a outro (CAI, 2017). Um parâmetro utilizado para caracterizar a fluidez do BCA é o ângulo de repouso, definido como o maior ângulo (em relação à horizontal) para que uma certa quantidade de BCA se mantenha estável e sem deslizar descendentemente pelo plano inclinado. OLIVA et al., 1981, obtiveram a dependência do ângulo do repouso ( $\alpha$ , graus) do BCA em função da umidade (W, %) pela equação 1:

$$\alpha = 0,389 W + 29,9 \quad (1)$$

Para valores de umidade de 50% – 10%, o ângulo de repouso do BCA apresenta valores na faixa de 48,45° - 33,79°, classificando o material com grau de fluidez entre médio e difícil, segundo WOODCOOK e MASON, 1987, e por CAI et al, 2017.

NA baixa densidade do BCA favorece seu transporte em meio gasoso (pneumático). Um parâmetro importante para o transporte pneumático do BCA é a velocidade terminal, definida como a velocidade da partícula quando a somatória das forças que agem sobre ela é igual a zero. RASUL et al. (1999) determinaram experimentalmente a velocidade terminal ( $U_t$ ) de partículas da fibra e da crosta de BCA. NEBRA et al., 1988, propuseram uma equação experimental para a velocidade terminal de partículas de fibra de BCA, utilizando o critério de diâmetro (do cilindro) equivalente hidrodinâmico. PACHECO, 1984, determinou a dependência da velocidade terminal para partículas de BCA em função da umidade (W) e do diâmetro médio do material peneirado ( $d_f$ ). A Tabela 2 mostra as equações experimentais utilizadas para calcular a velocidade terminal e o coeficiente de resistência de partículas de BCA obtidas por vários autores.

Tabela 2. Velocidade terminal e coeficiente de resistência das partículas de BCA

Coeficiente de resistência	Velocidade terminal (m/s)	Autor
$\lambda_{0,0} = (8d_p)^{-0,7}$ $\lambda_{0,0} = \frac{C_{D,0} \rho_a d_p}{4g}$ $200 \leq \rho_a \leq 1000$ $C_{D,0}$ = coeficiente de resistência $\rho_a$ = densidade do ar (kg/m³) $d_p$ = diâmetro das partículas (m) $\lambda_{0,0}$ = coeficiente de resistência $10 \leq \lambda_{0,0} \leq 2000$	$U_t = 2,94 \sqrt{\lambda_{0,0} g}$ $U_{t,0,0}$ = velocidade terminal para $\lambda_{0,0} = 0$  $U_t = 7,41 \sqrt{\lambda_{0,0} g}$ $U_{t,0,0}$ = velocidade terminal para $\lambda_{0,0} = 0$ $10 \leq \lambda_{0,0} \leq 2000$  $U_t = 1,219 \sqrt{\lambda_{0,0} g}$ $U_{t,0,0}$ = velocidade terminal para $\lambda_{0,0} = 0$ $10 \leq \lambda_{0,0} \leq 2000$ $U_{t,0,0}$ = velocidade terminal para $\lambda_{0,0} = 0$ $10 \leq \lambda_{0,0} \leq 2000$	PACHECO 1984  NEBRA et al. 1988  PACHECO 1984
$\lambda_{0,0} = 1,07 (d_p)^{-0,7}$ $10 \leq \lambda_{0,0} \leq 2000$	$U_t = 1,07 (d_p)^{-0,7} \sqrt{g}$ $U_{t,0,0}$ = velocidade terminal para $\lambda_{0,0} = 0$ $10 \leq \lambda_{0,0} \leq 2000$ $U_{t,0,0}$ = velocidade terminal para $\lambda_{0,0} = 0$ $10 \leq \lambda_{0,0} \leq 2000$ $U_{t,0,0}$ = velocidade terminal para $\lambda_{0,0} = 0$ $10 \leq \lambda_{0,0} \leq 2000$ $U_{t,0,0}$ = velocidade terminal para $\lambda_{0,0} = 0$ $10 \leq \lambda_{0,0} \leq 2000$	NEBRA et al. 1988  ABALLA et al. 1999
$\lambda_{0,0} = 1,07 (d_p)^{-0,7}$ $10 \leq \lambda_{0,0} \leq 2000$	$U_t = 1,07 (d_p)^{-0,7} \sqrt{g}$ $U_{t,0,0}$ = velocidade terminal para $\lambda_{0,0} = 0$ $10 \leq \lambda_{0,0} \leq 2000$ $U_{t,0,0}$ = velocidade terminal para $\lambda_{0,0} = 0$ $10 \leq \lambda_{0,0} \leq 2000$ $U_{t,0,0}$ = velocidade terminal para $\lambda_{0,0} = 0$ $10 \leq \lambda_{0,0} \leq 2000$	RASUL et al. 1999

### 2.4. Propriedades térmicas

As propriedades térmicas têm grande importância para os processos de transferência de calor durante a conversão energética da biomassa. Segundo ISLAM et al., 2010, e BRIDGWATER, 2012, a condutividade térmica da biomassa é muito baixa e varia segundo a orientação das fibras, longitudinalmente à fibra pode chegar a 0,1 W/m²°C e transversalmente até 0,05 W/m²°C. Outro fator que influencia o processo de condução do calor é o tamanho da partícula, onde partículas menores transmitem de forma mais rápida o calor. Outros fatores que influenciam a condutividade térmica da biomassa são a umidade, porosidade, densidade e temperatura (CAI, 2017).

Alguns autores têm investigado as propriedades termofísicas do BCA (MARTÍNEZ, 1981; MARTÍNEZ, 1982; GAREA, 1991. MARTÍNEZ (1981) determinou experimentalmente a condutividade térmica do BCA para valores constantes de umidade (7,1%) e de densidade (80 kg/m³), sendo obtidas condutividades de 0,0261 e 0,0896 W/m²K para temperaturas de 317°K e 351°K, respectivamente. Também foi avaliada a difusividade térmica do BCA, registrando valores entre 1,6 x 10⁻⁷ e 2,3 x 10⁻⁷ m²/s para faixas de temperaturas de 333°K a 363°K, umidade de

50,1% e densidade de 146 kg/m<sup>3</sup> (MARTÍNEZ, 1982).

Segundo BEATÓN, 1989, para valores de temperatura entre 320°k e 360°k e densidade de partícula de 200 kg/m³, a difusividade térmica (A), a condutividade térmica ( $\lambda$ ) e o calor específico (C) do BCA variam nos seguintes intervalos:  $A = 2,2355 \times 10^{-7} - 2,5037 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$ ,  $\lambda = 0,05923 \times 10^{-3} - 0,06819 \times 10^{-3} \text{ kw/m}^\circ\text{k}$ ,  $C = 1,3247 - 1,3617 \text{ kj/kg}^\circ\text{k}$ . GAREA et al (1991) determinaram experimentalmente a condutividade e difusividade térmica da fração medular do BCA para valores de umidade entre 19,36% e 47% e temperatura entre 303 °k e 363 °k encontrando valores de  $A = 1,492 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg} - 2,739 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{seg}$  e  $\lambda = 0,073 \text{ W/m}^\circ\text{k} - 1,426 \text{ W/m}^\circ\text{k}$ . Os valores de condutividade térmica do BCA são característicos de materiais mau condutores do calor, dificultando o aquecimento rápido e homogêneo das partículas ao entrar nos reatores de pirólise.

### 3. PROPRIEDADES QUÍMICAS DO BCA

### 3.1. Análises imediata e final

As propriedades que caracterizam o BCA podem ser obtidas de forma imediata ou final. A análise imediata considera o teor de umidade (W), matéria volátil (VM), carbono fixo (CF) e cinzas (A), enquanto as análises finais consideram os teores de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre. A Tabela 3 apresenta os dados de análises imediatas e finais de BCA de autores de diferentes países, observando-se amplas faixas de valores (VM: 68%-85,05%, CF: 0,71%-30,7%, A: 1,26%-9,6%). Estas variações podem ser atribuídas a diferentes fatores, e devem ser considerados durante o dimensionamento dos equipamentos de tratamento e conversão energética. A Figura 3 expõe a variação do VM, CF e A para diferentes frações de BCA. Observa-se que para frações de tamanho entre  $0,45\text{ mm} < d < 0,85\text{ mm}$  o conteúdo de cinzas aumenta drasticamente, enquanto o conteúdo de voláteis diminui de igual forma (GARCÍA et al. 2002). Considerando estes resultados, a classificação por frações granulométricas deve ser uma etapa importante do

processo de pré-tratamento do BCA para a obtenção de bio-óleo por pirólise rápida. As frações menores e com alto conteúdo de cinzas podem ser utilizadas como combustíveis, e as frações maiores com elevado conteúdo de voláteis podem ser utilizadas para a produção de bio-óleo.

Os conteúdos de C e O do BCA são muito superiores às de H e N (Tabela 3). No entanto o BCA, similarmente a outras biomassa, possui menor conteúdo de carbono se comparado aos combustíveis fósseis, o que constitui uma característica importante nas biomassa porque permite uma significativa diminuição de emissões de CO<sub>2</sub> durante a conversão energética (CHEW, 2011). O elevado conteúdo de oxigênio facilita os processos oxidativos de transformação energética do BCA podendo diminuir o poder energético.

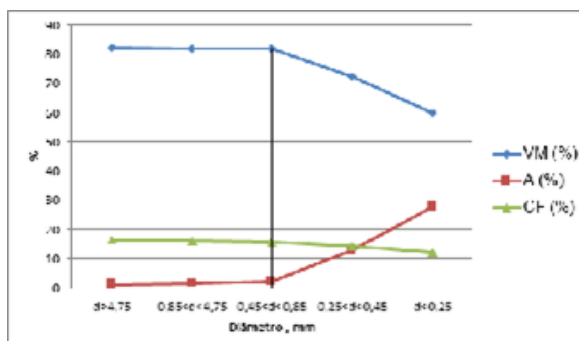


Figura 3. Análises imediatas das frações de bagaço (p/p. % bagaço base anidra) VM- Matéria volátil, A- Cinzas, CF - Carbono fixo, d- diâmetro (mm) (adaptado de GARCIA et al. 2002).

Tabela 3. Análises imediatas e finais do bagaço de cana-de-açúcar.

[illegible]

### 3.1.1. Umidade

A umidade do BCA varia numa faixa de

49 – 51% (TRIANA, 1990) e tem grande influência no poder calórico, densidade e porosidade do mesmo (MENDES et al. 2014), sendo um agente indesejável para os processos de conversão termoquímica deste material, já que reduz a eficiência de conversão (ZHANG, 2012). A umidade favorece a fermentação e biodegradação, o que dificulta o tratamento físico, transporte e estocagem do BCA (PERAZZINI, 2016). A biodegradação química do BCA pode provocar a combustão espontânea do material (VALIX et al. 2017). A pirólise do BCA com elevada umidade produz grande conteúdo de água no bio-óleo, diminuindo seu poder calorífico, sendo desejável umidade menor do que 10% na matéria prima (ASADULLAH, 2007; CHEN, 2015). Conforme SHRIVASTAV et al., 2013, uma redução de 1% da umidade no BCA aumentou seu poder calorífico em 196 KJ / kg. Um aumento de 1% no teor de umidade resulta diminuição de C e O no BCA de 0,43% e 0,49%, respectivamente (PANCHAL, 2016). A redução da umidade é possível com a secagem da biomassa (BRIDGWATER 2012).

### 3.1.2. Matéria volátil

A matéria volátil (VM) é formada por vapores e gases não condensáveis produzidos durante a decomposição térmica do BCA. O resíduo sólido resultante da emissão de VM é formado por carbono e cinzas. Como observado na Tabela 3, o conteúdo de CF do BCA é muito menor do que o conteúdo de VM. Segundo ISLAM et al., 2010a, o alto conteúdo de voláteis favorece a formação de bio-óleo durante a pirólise.

MANALS-CUTIÑO et al., 2015, estudaram a dependência do conteúdo de substâncias voláteis, carbono fixo, cinzas e umidade para diferentes diâmetros de partículas de bagaço de cana. Os resultados revelaram que o conteúdo de substâncias voláteis apresenta o valor máximo (86%) para o diâmetro médio de partícula de 3,38mm. Para diâmetros maiores e menores do que 3,38mm o conteúdo de voláteis diminui, atingindo o valor de 79,4% para o diâmetro médio de 0,25 mm. Além disso, o conteúdo de

cinzas nas partículas de bagaço aumentou de 2,6% até 6,6% para os diâmetros de 1,205 mm a 0,25 mm, respectivamente. Não foram encontradas dependências entre o conteúdo de umidade e carbono fixo com o diâmetro das partículas.

O aumento do conteúdo de voláteis com o diâmetro das partículas pode favorecer o rendimento de bio-óleo durante a pirólise. Por outro lado, o incremento do conteúdo de cinzas com a diminuição do diâmetro pode favorecer a formação de char (resíduos carbonosos da pirólise) (ISLAM, 2010). A seleção de frações de maior tamanho pode ser uma opção para incrementar o rendimento de bio-óleo durante a pirólise do BCA.

### 3.1.3. Cinzas

As cinzas são matérias estranhas incorporadas à cana-de-açúcar durante o processo de coleta. A quantidade e composição química das cinzas no BCA varia em amplas faixas (Tabela 4) e depende do método de coleta (mecanizado ou manual), tipo de solo e da época do ano (período de chuvas ou de seca). As cinzas são indesejáveis durante o aproveitamento energético do BCA pois podem provocar deposição da superfície metálica afetando o processo de transferência de calor, assim como a erosão do metal de dispositivos móveis provocando danos ao equipamento tecnológico. Fazem parte da composição química das cinzas do BCA diferentes compostos que podem ser usados como matérias primas para diversos destinos. FRIAS et al. (2011) investigaram a composição química de cinzas de BCA obtidas no laboratório (LBA), no forno da caldeira (BBA) e de cinzas pulverizadas (FBA). Os resultados mostraram que as diferenças obtidas na composição química podem estar relacionadas com os valores de temperatura, e outras condições do processo de combustão do BCA. O conteúdo de não queimados (LOI) nas cinzas coletadas dos filtros separadores atingiu o valor de 18% (Tabela 4) (FRIAS, 2011).

Segundo ISLAM et al., 2010a, baixos conteúdos de cinzas e carbono fixo favorecerá a formação de bio-óleo durante a pirólise do



BCA. O teor mineral das cinzas pode ter um efeito catalisador das reações de formação de gás e char durante a pirólise (BRIDGWATER, 2012; MONTOYA, 2015). O teor de potássio e sódio das cinzas podem causar o craqueamento secundário dos vapores formados durante a pirólise, reduzindo o rendimento de bio-óleo (BRIDGWATER 2012).

Tabela 4. Composição química das cinzas do BCA (% m/m)

Aut.	CaO	FeO	CoO	MnO	SO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	NO <sub>2</sub>	Cl <sup>-</sup>	MgO	LOI	Referência
42-49	11,35	5,11	0,23	1,18	3,43	5,47	0,20	3,38	1,61	-	1,55	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
50-51	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
46-47	9,24	10,08	1,24	0,51	0,10	1,13	0,30	2,40	1,01	-	1,37	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
52-53	0,64	0,66	0,13	0,03	-	1,11	0,88	1,80	1,24	0,12	1,04	COLOMBO et al 2012 SEV Biogás, S. de R. L.
54-55	10,45	6,11	0,25	0,25	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
56-57	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
58-59	11,35	5,11	0,23	1,18	3,43	5,47	0,20	3,38	1,61	-	1,55	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
60-61	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
62-63	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
64-65	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
66-67	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
68-69	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
70-71	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
72-73	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
74-75	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
76-77	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
78-79	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
80-81	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
82-83	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
84-85	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
86-87	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
88-89	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
90-91	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
92-93	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
94-95	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
96-97	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
98-99	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
100-101	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.

Baixos conteúdos de cinzas, temperaturas moderadas e baixos tempos de residência para os vapores formados permitem altos rendimentos de bio-óleo durante a pirólise rápida da biomassa (BRIDGWATER 2012). A presença de metais alcalinos (Na, K, Mg, Ca, etc) nas cinzas do BCA podem catalisar as reações de polimerização e consequentemente aumentar a viscosidade do bio-óleo produzido (DAS, 2004). A eliminação das cinzas incrementa o conteúdo de voláteis e a velocidade de sua emissão, o que melhora o rendimento de bio-óleo, além de reduzir o efeito catalítico sobre a formação de char e água a partir da decomposição da lignina (DAS, 2004). Elevados conteúdos de cinzas (> 0,5% p) provocam a desativação dos catalisadores durante a pirólise rápida catalítica (YILDIZ et al. 2016). Os efeitos negativos no rendimento de bio-óleo durante a pirólise rápida podem minimizar-se mediante a seleção das frações com menos conteúdo de cinzas ou mediante a remoção das cinzas do BCA.

### 3.2. Composição

O BCA ( $\text{CH}_x\text{O}_y$ ) é composto por celulose ( $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ )<sub>m</sub>, hemicelulose ( $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_4$ )<sub>n</sub> e lignina. A celulose é um polímero com grau de polimerização (m~10,000) presente na parede celular das plantas (BASU 2010), sua estrutura

cristalina de alta resistência proporciona o esqueleto da célula vegetal, e o peso molecular varia na faixa 150,000-350,000 (ABRIL, 2000). A hemicelulose é outro componente da parede celular das plantas, sua estrutura amorfa possui baixa resistência, seu peso molecular varia entre 10,000-20,000 (ABRIL, 2000) e o grau de polimerização n~100-200 (BASU 2010). A lignina é o composto que mantém unidas as fibras de celulosas e está integrada por um conjunto de polímeros amorfo de altos pesos moleculares (BASU 2010). As quantidades de celulose, hemicelulose e lignina no BCA variam segundo o tipo de cana-de-açúcar. A Tabela 5 mostra a composição do BCA segundo diferentes autores.

Tabela 5. Composição lignocelulósica do BCA (m/m %)

Aut.	CaO	FeO	CoO	MnO	SO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	NO <sub>2</sub>	Cl <sup>-</sup>	MgO	LOI	Referência
42-49	11,35	5,11	0,23	1,18	3,43	5,47	0,20	3,38	1,61	-	1,55	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
50-51	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
46-47	9,24	10,08	1,24	0,51	0,10	1,13	0,30	2,40	1,01	-	1,37	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
52-53	0,64	0,66	0,13	0,03	-	1,11	0,88	1,80	1,24	0,12	1,04	COLOMBO et al 2012 SEV Biogás, S. de R. L.
54-55	10,45	6,11	0,25	0,25	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
56-57	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
58-59	11,35	5,11	0,23	1,18	3,43	5,47	0,20	3,38	1,61	-	1,55	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
60-61	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
62-63	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
64-65	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
66-67	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
68-69	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
70-71	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
72-73	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
74-75	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
76-77	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
78-79	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
80-81	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
82-83	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
84-85	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
86-87	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
88-89	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
90-91	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
92-93	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
94-95	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
96-97	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
98-99	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.
100-101	12,44	6,54	0,24	0,41	2,80	5,93	2,80	2,61	0,98	-	1,36	FRANCO et al 2011 SEV Biogás, S. de R. L.

A composição química (peso seco %) varia em amplas faixas para a celulose (27% - 50%), hemicelulose (20% - 35%), lignina (10% - 25%) e cinzas (1% - 6%) (WHITE, 2011). O conteúdo de celulose, hemicelulose e lignina também varia para as frações de fibra (47,7%, 25,0%, 19,55%) e da medula (41,2%, 26,5%, 21,7%), respectivamente (ABRIL, 2000).

A celulose e hemicelulose são as principais fontes de formação de voláteis durante a pirólise da biomassa, enquanto a lignina é formadora de char (BASU 2010). O elevado conteúdo de celulose e hemicelulose no BCA indica o alto potencial para a produção de bio-óleo (MONTOYA et al. 2015). O uso das frações com maior conteúdo de celulose para a pirólise rápida pode incrementar os rendimentos de bio-óleo.

#### 4. FATORES QUE INFLUENCIAM A PIRÓLISE RÁPIDA DO BCA

##### 4.1. Tamanho de partícula

O tamanho, forma e estrutura da partícula influem no rendimento dos produtos da pirólise. As partículas menores favorecem o desprendimento de voláteis antes que ocorram reações secundárias, por conseguinte favorecem a formação de bio-óleo (BASU 2010).

RODRIGUEZ et al., 1987, para temperatura de pirólise constante (700°C) variou o tamanho das partículas (de 0,3 mm a 0,7 mm) de BCA e encontrou pouca influência do diâmetro da partícula de bagaço na quantidade dos produtos da pirólise (alcatrão, água, char, gás) provavelmente devido à natureza polimorfa (relação diâmetro/comprimento) e estrutural (fibra e medula) das amostras de BCA utilizadas. Partículas de fibra de igual diâmetro podem ter diferentes longitudes. Por outro lado, como se explicou anteriormente, a composição da fibra e da medula do bagaço podem ser diferentes, o que influi no rendimento dos produtos. Isto sugere a necessidade da adequada escolha das amostras de BCA para avaliar a relação entre o tamanho das partículas e o rendimento da pirólise. A separação estrutural (fibra e medula) do BCA pode ser um método para maximizar o rendimento de bio-óleo durante a pirólise rápida.

Segundo ISLAM et al, 2010 a, para uma temperatura de pirólise de 450°C, taxa de aquecimento 100°C/min e uma vazão de nitrogênio de 37l/min (L/min), o rendimento de bio-óleo aumentou de 32% até 48% quando o diâmetro das partículas de BCA aumentou de 0,150 mm até 0,600 mm. MANALS-CUTIÑO et al., 2015 observaram um aumento do conteúdo de substâncias voláteis com o incremento do diâmetro das partículas de BCA desde 0,250 mm até 3,380 mm.

Um posterior aumento do diâmetro das partículas até 1,180 mm provocou a redução do rendimento de bio-óleo para 46%, o que corroborou os resultados obtidos por ISLAM et al., 2010. Os autores explicam que este resultado pode estar relacionado às irregularidades no aquecimento provocado pelo aumento do

tamanho da partícula e a baixa condutividade térmica, sendo necessária uma avaliação simultânea dos 3 fatores de forma a determinar a possível sinergia entre estes efeitos.

##### 4.2. Temperatura

A temperatura da partícula está relacionada com as condições de troca de calor com o meio, afetando o rendimento e a composição dos produtos (BASU 2010). Para obter altos rendimentos de bio-óleo durante a pirólise rápida da biomassa é necessário controlar a temperatura do processo próxima aos 500°C, evitando temperaturas baixas que favoreçam a formação de char (BRIDGWATER 2012). Estas condições são relativamente fáceis de obter com partículas menores em condições de pirólise rápida em leito fluidizado (BRIDGWATER 2012).

RODRIGUEZ et al., 1987, estudaram a pirólise de BCA com partículas de diâmetro entre 0,4mm e 0,5mm, e utilizando temperaturas superiores a 500°C (600 - 800°C), obtendo rendimentos de gás de 32% a 58%, de tar de 20% a 5% e de char de 22% a 7%, respectivamente. Por outro lado, o uso destes valores de temperatura provocou o aumento do valor calórico superior dos gases desde 15833 Kj/m<sup>3</sup> até 16500 Kj/m<sup>3</sup>, influenciado principalmente por um aumento do teor H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> formado. O estudo também demonstrou que elevados gradientes térmicos dentro do reator podem afetar o rendimento de bio-óleo (RODRIGUEZ, 1987).

ASADULLAH et al., 2007, utilizaram um reator em batelada de leito fixo para avaliar a influência da temperatura nos rendimentos dos produtos da pirólise de partículas de BCA de diâmetro de 0,5 - 1,0 mm, usando vazão de nitrogênio de 200 ml/minuto (mL/min.), velocidade de aquecimento de 50°C/min e tempo de retenção de 1 hora. Os resultados mostraram que ao utilizar temperaturas entre 300°C e 500°C, o rendimento de óleo aumentou de 18,66% a 66,13%. Outra conclusão importante do estudo foi que um posterior aumento da temperatura até 600°C provocou a diminuição do rendimento de bio-óleo de até 59,52%.

ISLAM et al, 2010, realizaram testes de

pirólise de partículas de BCA de diâmetro entre 0,600 mm – 1,180 mm e tempo de residência dos vapores de 5 s utilizando um reator de leito fixo. Os resultados revelaram que o aumento da temperatura de 375°C até 475°C provocou o incremento da quantidade de bio-óleo de 42% até 56%, e que o posterior aumento da temperatura até 575°C reduziu o rendimento de bio-óleo até 48%, provavelmente pela decomposição dos vapores em gases. ISLAM et al., 2010<sup>a</sup>, obtiveram rendimento de bio-óleo (48%) para uma temperatura de 450°C com partículas de diâmetro 0,420 mm – 0,600 mm. Estas pesquisas demonstram que existe alta sensibilidade do rendimento de bio-óleo às variações da temperatura e o diâmetro de partículas.

HENKEL et al., 2016, estudaram a influência da temperatura na pirólise rápida de partículas do BCA (variedade de cana energética) com diâmetros entre 0,5 mm – 1,0 mm num reator de aquecimento por indução. Com o aumento da temperatura de 500°C para 550°C, o rendimento de bio-óleo aumentou de 47,9 % a 48,9%. Um posterior aumento da temperatura até 700°C provocou uma diminuição do rendimento de bio-óleo de 38,0%. MONTTOYA et al., 2015, investigaram a pirólise rápida de BCA num reator de leito fluidizado, avaliando a dependência do rendimento e da composição dos produtos em função de vários parâmetros (temperatura, taxa de alimentação da biomassa, vazão de nitrogênio e tamanho de partícula). O máximo rendimento de bio-óleo (72,94%) foi obtido para um diâmetro médio da partícula de 0,5125 mm e vazão de nitrogênio de 50 L/min e temperatura de 500°C. Um aumento da temperatura para 550°C provocou a diminuição do rendimento de bio-óleo para 62%, provavelmente causado pelas reações secundárias de decomposição de voláteis. Os autores concluíram que a temperatura do processo, o diâmetro de partícula e a taxa de alimentação do BCA definem a velocidade de aquecimento da partícula e o tempo de residência dos produtos. Estes dois últimos fatores são os mais importantes para a obtenção de altos rendimentos de bio-óleo (MONTTOYA, 2015).

TSAI et al., 2006, utilizando um reator de indução com leito fixo investigaram a influência da temperatura, da taxa de aquecimento e do tempo de residência médio sobre o rendimento dos produtos pirolíticos do BCA. Para diâmetros abaixo de 0,5mm, taxa de aquecimento de 200°C/min e tempo de residência médio de 1 min, os resultados revelaram que quando a temperatura aumentou de 400°C para 600°C o rendimento de bio-óleo apresentou um aumento de 11,1%, atingindo um valor máximo. Para temperaturas superiores ocorreu a redução do rendimento da reação. Os autores também avaliaram como o teor de umidade do BCA influenciou a reação. Para umidade inicial do BCA de 16,97%, o teor de água no bio-óleo aumentou em cerca de 33,3% e o poder calórico foi reduzido a 3,79 MJ/kg.

PENEDO et al., 2008, avaliaram a influência da temperatura, da velocidade de aquecimento, do tempo de reação e da densidade de briquetas do BCA numa instalação de pirólise a vácuo. Os resultados mostraram um rendimento máximo de bio-óleo (62,34%) para temperatura de 425°C, densidade da briqueta de BCA de 263,8 kg/m<sup>3</sup> e a velocidade de aquecimento de 12,40°C/min.

LÓPEZ et al., 2013, estudaram a pirólise lenta num termoreator cilíndrico de leito fixo utilizando uma balança analítica. A variação do diâmetro de partícula (dp) de BCA mostrou resultados significativos nas faixas de  $dp < 0,420$  mm,  $0,420$  mm  $< dp < 0,840$  mm e  $dp > 0,840$  mm. O estudo mostrou que ao utilizar partículas com diâmetros entre 0,420mm e 0,840mm ocorreu maior perda de peso (de-volatilização). Ao utilizar partículas maiores do que 0,840 mm ocorreu a diminuição dos coeficientes de transferência de calor e massa, e para partículas menores do que 0,420 mm foi observado um elevado conteúdo de material orgânico dificultando a emissão de voláteis. Os autores também determinaram que a maior emissão de voláteis ocorreu com taxa de aquecimento de 10°C/min e o maior rendimento de bio-óleo (57,4%) foi obtido na temperatura de 550°C, taxa de aquecimento de 10°C/min, tempo de residência de 60min e diâmetro de

partícula entre 0,420 e 0,840 mm. (LÓPEZ, 2013).

No estudo realizado por SOHAIB et al. 2017, o bagaço de cana-de-açúcar foi submetido à pirólise rápida em um reator em escala de bancada para investigar os efeitos das condições de pirólise na distribuição e propriedades do produto. O diagrama de Van Krevelen mostrou os menores valores de H/C e O/C para bio-char seguido por bio-óleo. A maior produção de bio-óleo de 60,4% foi alcançada a 500°C, enquanto o valor máximo de aquecimento de 24,7 MJ.Kg<sup>-1</sup> foi encontrado a 600°C. O aumento do tamanho do bagaço diminuiu a proporção de bio-óleo e o maior valor de aquecimento (MVA). Um aumento e uma diminuição na produção de bio-char foram observados com o aumento no tamanho do bagaço e temperatura de pirólise, respectivamente. MVA de bio-char foi registrado 27,8 MJ.Kg<sup>-1</sup> a 600°C, o qual diminuiu com o aumento da temperatura e do tamanho do bagaço. O aumento da temperatura e do tamanho do bagaço aumentaram a fase gasosa.

As pesquisas realizadas para avaliar a influência da temperatura de pirólise no rendimento de bio-óleo para o BCA têm sido realizadas em condições diferentes de composição, diâmetros de partículas, vazão de nitrogênio, taxa de aquecimento e tipo de reator, dificultando a comparação dos resultados. No entanto, pode observar-se a tendência de que com o aumento da temperatura se incrementa o rendimento de bio-óleo até um valor máximo. Igualmente em todos os estudos foi demonstrado que aumentos de temperaturas após atingido o valor máximo de rendimentos provocam a redução gradual do rendimento de bio-óleo. (ASADULLAH et al. 2007; ISLAM, 2010 e 2010 a; MONTOYA, 2015; HENKEL, 2016; DEWANGAN, 2016). Alguns autores mencionam que ocorre um intenso craqueamento do BCA, geralmente em torno de 500°C, e a temperaturas superiores se favorece a decomposição dos vapores e a ocorrência de reações secundárias de carbonização (ISLAM, 2010).

#### 4.3. Taxa de aquecimento

A taxa de aquecimento está vinculada ao tamanho da partícula e à temperatura de pirólise. Partículas de menor diâmetro de BCA a altas temperaturas possibilitam que a reação atinja elevadas taxa de aquecimento. Altas taxas de aquecimento da biomassa a temperaturas moderadas (400–600°C) favorece a emissão de voláteis e, portanto, o rendimento de bio-óleo (BASU 2010). Altas taxas de aquecimento e de transferência de calor da superfície até o interior da partícula requerem tamanhos menores de partículas devido à baixa condutividade térmica da biomassa (BRIDGWATER 2012). Trabalhos têm sido publicados para avaliar a influência da taxa de aquecimento no rendimento da pirólise de BCA (TSAI, 2006; LIN, 2012; LÓPEZ, 2013).

TSAI et al., 2006, avaliaram a influência da taxa de aquecimento no rendimento de bio-óleo da pirólise de BCA à temperatura de 500°C, tempo de residência médio de 1 min e tamanho de partícula abaixo de 0,50 mm. O rendimento de bio-óleo foi determinado para as seguintes taxas de aquecimento: 100, 300, 400 e 500°C/min, obtendo-se rendimentos de 5,71%, 13% (valor máximo), 8,57% e 12,85%, respectivamente.

Segundo VAN DE VELDEN et al., 2010, os máximos rendimentos de bio-óleo se obtêm para altas taxas de aquecimento, evitando elevados gradientes de temperaturas no entorno e dentro da partícula de biomassa. Partículas esféricas com diâmetros de 0,2 mm necessitam de aproximadamente 15% do tempo da reação na pirólise (2 – 2,5 s) para atingir um aquecimento homogêneo e igual à temperatura do meio (T<sub>m</sub>) (Figura 4) (VAN DE VELDEN, 2010). Um rápido aquecimento da partícula até a temperatura de reação exige de elevados coeficientes de transferência de calor por convecção (desde o meio até a superfície da partícula) e por condução do calor (até o centro da partícula).

VAN DE VELDEN et al., 2010, avaliaram o comportamento do número adimensional Biot para partículas esféricas de serragem de diâmetro 0,2 mm a temperatura de



500°C.

$$Bi = \frac{r/k_p}{1/h} \quad (2)$$

$r$ -raio da partícula, m

$k_p$ -condutividade térmica da partícula, W/m.

$k_p$ -condutividade térmica da partícula

$h$ - coeficiente de transferência de calor do meio

até a superfície da partícula, W/m<sup>2</sup>, °C

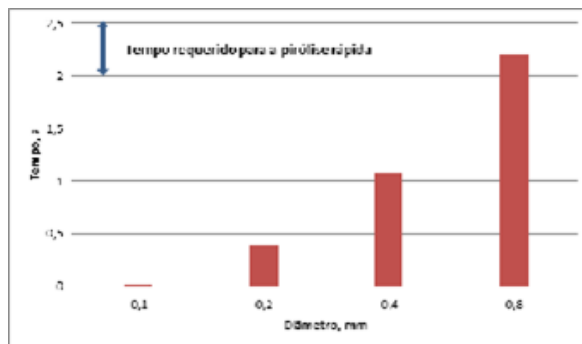


Figura 4. Tempo requerido para que a temperatura no centro ( $T_c$ ) das partículas esféricas de serragem de diferentes diâmetros atinja 99% da temperatura do meio ( $T_m=500^\circ\text{C}$ ) em são introduzidas (adaptado de VAN DE VELDEN et al., 2010).

A Figura 5 mostra a dependência do número de Biot ( $Bi$ ) com  $h$ . Como se observa o número de Biot é sempre menor do que 1, o que indica que a resistência  $1/h$  é sempre maior do que  $r/k_p$ , ou seja, o fluxo de calor do gás até a superfície da partícula é o fator determinante do processo. Para as condições de leito fluidizado com velocidade dos gases de 5 m/s, o coeficiente de transferência de calor  $h$  tem o valor  $h=620\text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{K}$  e o número de Biot de 0,41 (Figura 5). O anterior sugere que com o aumento da velocidade do fluxo (até 10 – 12 m/s) se pode incrementar  $h$  e diminuir a resistência  $1/h$ . Para valores de  $h=1500\text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{K}$ , o número de Biot possui o valor de 1 e as resistências  $1/h$  e  $r/k_p$  são iguais. Baseado nos resultados anteriores pode-se concluir que a pirólise de BCA em reatores com altas velocidades do meio gasoso pode favorecer o rápido aquecimento de partículas menores e melhorar os rendimentos de bio-óleo. Por outro lado, a baixa densidade de partículas menores

do BCA facilita seu movimento num fluxo gasoso, o que pode provocar sua saída da zona de reação antes de completar a pirólise. Este dilema poderia ter solução mediante uma adequada organização aerodinâmica do processo. Pesquisas nesta direção têm sido realizadas para a combustão do BCA e poderiam ser aplicadas a reatores de pirólise rápida para BCA (BEATON, 1999).

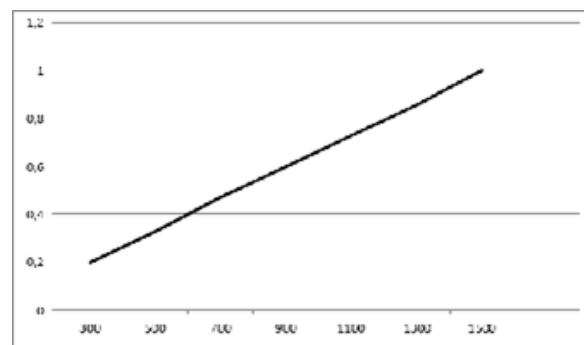


Figura 5. Dependência do número de Biot com o coeficiente de transferência do meio até a superfície da partícula de serragem em leito fluidizado ( $r=0,1\text{ mm}$ ,  $T=500^\circ\text{C}$ ,  $k_p=0,15\text{ W/m}\cdot^\circ\text{K}$ ) (adaptado de VAN DE VELDEN et al., 2010).

TREDET e SUNTIVARAKORN, 2017, apresentaram um estudo dos efeitos do comportamento hidrodinâmico de um leito na produção de bio-óleo em um reator circulante de leito fluidizado (CFBr) com um processo de pirólise rápida. A altura e o diâmetro do CFBr foram de 4,5 metros e 0,1 metros, respectivamente, enquanto partículas de areia de 250 microns foram usadas como leito no CFBr. A taxa de alimentação do bagaço de cana-de-açúcar neste experimento foi de 30 Kg/h. Uma pirólise rápida foi realizada na temperatura de reação de 440-520°C, 5-7 m/s de velocidade superficial, e estoque de 0,5 kg e 4,5 kg de leito. Os resultados indicaram que a taxa de recirculação sólida aumentou quando a velocidade superficial e o estoque do leito aumentaram. A taxa máxima de recirculação de sólidos foi obtida com 52,48 Kg/m² a 7 m/s de velocidade superficial e com 4,5 Kg de estoque de leito. Os maiores rendimentos de produção de bio-óleo foram criados na taxa máxima de recirculação de sólidos, para a qual o valor máximo de produção de bio-óleo

foi de 78,07% em uma temperatura de reação de 480°C. A partir da análise dos efeitos das taxas de recirculação de sólidos na produção de bio-óleo, verificou-se que a quantidade de produção de bio-óleo variou diretamente com a taxa de recirculação do sólido, pois durante o processo de pirólise, houve uma alta transferência de calor da areia da cama para a biomassa.

#### 4.4. Tempo de residência do vapor

O rendimento de bio-óleo depende do baixo tempo de residência dos vapores (menos de 2s) para minimizar a ocorrência de reações secundárias. Por outro lado, o rápido esfriamento dos vapores favorece a formação de bio-óleo (BRIDGWATER 2012).

ISLAM et al., 2010, estudaram a relação entre o tempo de residência do vapor e o rendimento de bio-óleo a 475°C de partículas de BCA de diâmetro entre 0,600 mm e 1,180 mm. Os resultados mostraram que o aumento do tempo de residência de 5s para 20s reduziu o rendimento de bio-óleo de 56% para 47,5%, provavelmente devido à decomposição dos vapores em gases (Figura 6) (ISLAM, 2010). Resultados similares foram obtidos por XU et al., 2011, que verificou que o aumento de 2s para 5s no tempo de residência, reduz a temperatura da pirólise de 400°C para 350°C sem afetar o rendimento da reação.

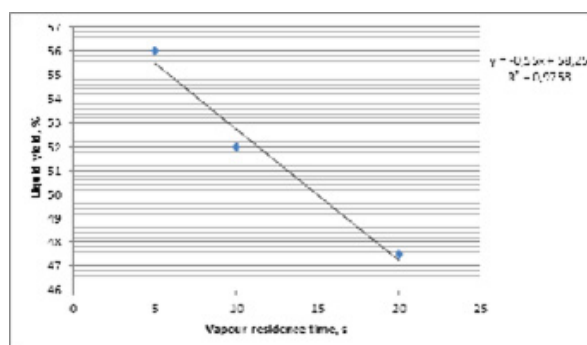


Figura 6. Rendimento de bio-óleo x tempo de residência do vapor na pirólise do BCA (adaptado de ISLAM et al., 2010)

## 5. PRÉ-TRATAMENTO DO BCA PARA A PIROLÍSE RÁPIDA

### 5.1. Secagem e classificação

zado na indústria açucareira. Vários trabalhos têm sido publicados sobre as variáveis da secagem de BCA (VIJAYARAJ, 2008; MAZUTTI, 2010; BOMBINO, 2013; GOMES, 2015), os tipos de secadores usados para o BCA (GOMES, 2004; MORGENROTH, 2005; ARNAO, 2006; FERNANDES, 2011; PERAZZINI, 2016) e o impacto da secagem na eficiência das caldeiras (SILVA AND CORREA, 2005; ARNAO, 2009; PURANIK, 2009; GILBERD AND SHEEHAN, 2013; SHRIVASTAV, 2013; MAY, 2014; BISINELLA, 2015; WRIGHT, 2016; PANCHAL, 2016; PRAVEEN, 2016).

MAZUTTI et al., 2010, estudaram a cinética da secagem de BCA fermentado e não fermentado, verificaram que o BCA fermentado seca mais rapidamente do que o não fermentado utilizando as mesmas condições de temperatura e vazão de ar. GOMES et al., 2015, aplicaram a modelagem matemática para descrever os resultados experimentais da secagem de BCA em leito fixo determinando as isotermas de dessorção do agente de secagem para diferentes condições de temperaturas (40, 50 e 60°C). VIJAYARAJ et al., 2008, desenvolveram um modelo matemático para descrever a secagem de uma camada de bagaço para diferentes condições do agente de secagem e do produto, obtendo uma boa correlação entre os valores calculados e experimentais.

Entre os equipamentos para secagem de BCA destacam-se os secadores pneumáticos devido ao seu baixo custo e pouco requerimento de espaço (GOMES, 2015). ARNAO et al., 2006, avaliaram as vantagens da secagem de BCA utilizando secadores pneumáticos (tipo flash).

O intenso contato entre o BCA e o agente de secagem (ar ou gases de combustão) permitiram obter elevados coeficientes de transferência de calor e massa e, consequentemente, altas velocidades de secagem. Outros tipos de secadores usados para o BCA são os de tambor rotatório, solar, leito fixo, leito fluidizado, ciclone e os híbridos (ARNAO, 2006; PANCHAL, 2016; PERAZZINI, 2016). O secador de tambor rotatório permite uma secagem ho-

mogênea de materiais de partículas de diferentes tamanhos e formas (PERAZZINI, 2016).

MORGENROTH et al., 2005, estudaram a secagem do BCA com vapor de água obtendo um aumento do poder calórico de 1,80 vezes. Neste caso, a secagem funcionou num sistema fechado, com recuperação do vapor de água gerada no secador, reduzindo a probabilidade de incêndio do secador e as emissões de contaminantes à atmosfera (MORGENROTH, 2005). Devido à dificuldade de fluidizar o BCA se propõem os secadores de leito fixo e tambor rotatórios.

FERNANDES et al., 2011, investigaram a influência da temperatura do agente de secagem (de 35°C até 275°C) e da vazão de bagaço (de  $0,1 \cdot 10^{-2}$  até  $2,9 \cdot 10^{-2}$  Kg/s) na redução da umidade num secador de tipo ciclônico com variação da geometria. BOMBINO et al., 2013, determinaram que os secadores ciclônicos podem ser compactos (50% menores do que os pneumáticos) devido aos elevados valores de velocidade do agente de secagem (38 m/s). GOMES et al., 2004, determinaram a existência de uma significativa influência da parte cônica dos secadores ciclônicos na diminuição da umidade e do tempo de residência das partículas de BCA.

PRAVEEN et al., 2016, avaliaram um secador de BCA de tipo indireto (uma superfície metálica separa o BCA e o agente de secagem), obtendo um incremento de 7% da eficiência da caldeira quando a umidade do BCA é reduzida de 50% a 45%. SHRIVASTAV ET AL. (2013) descreveram o incremento da eficiência da caldeira de 79% a 81% quando a umidade do BCA é reduzida de 50% a 46%. PANCHAL et al., 2016, recomendaram não usar BCA com umidade superior a 56% nas caldeiras de vapor. ARNAO et al., 2009, descreveram incrementos da eficiência da caldeira de 64% a 70% para diferentes combinações de equipamentos recuperadores de calor e secador de BCA. GILBERD AND SHEEHAN, 2013, expuseram que uma diminuição de 40% da umidade do BCA permite um aumento da eficiência da caldeira de 4% e uma economia de 16% de BCA.

A secagem do BCA antes da estocagem pode diminuir a deterioração das propriedades combustíveis (WRIGHT, 2016), evitando o crescimento de microrganismos e a biodegradação (BISINELLA, 2015). A secagem diminui o volume do BCA e inibe a ocorrência de reações provocadas pela presença de água. PURANIK et al., 2009, avaliaram o aumento do poder calórico do BCA para secadores com fonte de calor externa, interna e no vácuo, obtendo incrementos de 1,84 a 1,88 vezes.

A classificação BCA permite fazer um uso específico das diferentes frações em função de suas características e propriedades. Alguns trabalhos têm sido publicados sobre a classificação pneumática do BCA (Roca et al. 2013), (ALMEIDA, 2012). ROCA (2013) investigou a classificação pneumática do BCA (9,6 % de umidade) em três frações: fina (diâmetro médio de 0,398 mm), media (diâmetro médio de 1,7 mm) e grossa (diâmetro médio de 2,865 mm). No estudo foram obtidas as relações entre os indicadores de eficiência da classificação (NC), grau de separação (NS) e índice de pureza (PI) para diferentes velocidades de vazão ascendente de ar pela coluna separação. Os resultados mostraram que NC e NS aumentam com o incremento da vazão de ar, enquanto que PI aumenta até um máximo para vazões de ar de  $0,006 \text{ m}^3/\text{s}$  –  $0,008 \text{ m}^3/\text{s}$  e posteriormente diminui (ROCA, 2013). ALMEIDA, 2012, realizou a classificação pneumática em três frações do bagaço com umidade inicial de 6,5 %m/m e vazão de ar de  $0,0305 \text{ m}^3/\text{s}$  –  $0,0263 \text{ m}^3/\text{s}$ , os resultados revelaram que a vazão de ar é uma variável com influência significativa na classificação. A classificação definiu predominância das frações finas (19%-37% do total de bagaço classificado) e grossas (56%-76% do total de bagaço classificado), enquanto que as frações médias não ultrapassaram os 6,5% do total de bagaço classificado. Considerando que o objetivo da pirólise rápida é a separação em frações de finos e grossos, pode-se assumir como adequados os resultados obtidos por ALMEIDA, 2012.

## 5.2. Torrefação

A torrefação é utilizada para o pré-tratamento térmico da biomassa numa faixa de temperatura entre 200°C e 300°C, por um determinado tempo, em ausência de oxigênio e com o objetivo de aumentar o valor calórico e a densidade energética (menor relação O/C) (VAN DER STELT, 2011; ANUKAM, 2017). O controle da temperatura de torrefação pode ser afetado pela ocorrência de diferentes reações endotérmicas (pirólise da celulose) e exotérmicas (pirólise da hemicelulose e da lignina) (CHEN, 2015). A torrefação remove H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> da biomassa e as relações O/C e H/C decrescem (BASU, 2010). A decomposição térmica da hemicelulose junto à despolimerização da celulose e o abrandamento térmico da lignina durante a torrefação debilitam a parede das células da biomassa vegetal (DONG, 2015) fazendo a biomassa frágil ou quebradiça resultando em menor consumo de energia durante o processo de redução de tamanho (moagem) (BASU, 2010). O tratamento térmico destrói a estrutura fibrosa e a tenacidade da biomassa (VAN DER STELT, 2011). O consumo de energia para conseguir a biomassa torrada pode diminuir em até 80%-90% em comparação com a biomassa em estado natural. Após a torrefação, a biomassa tem características hidrofóbicas (facilitando a estocagem em locais úmidos) (VAN DER STELT, 2011; ANUKAM, 2017), o que está relacionado destruição parcial dos grupos hidroxila por desidratação, impedindo a formação de ligações de hidrogênio. Por outro lado, a condensação do alcatrão nos poros do material torrado impede a passagem do ar, e em consequência impede a condensação do vapor de água presente (CHEN, 2015). Resumindo, a torrefação permite que a biomassa se converta num combustível mais estável (REN, 2017) e de propriedades mais uniformes (CHEN, 2015).

A Tabela 6 mostra os resultados da torrefação do bagaço de cana obtidos por diferentes pesquisadores utilizando diferentes condições do processo. Com o aumento da temperatura e o tempo de torrefação se observa um aumento do carbono fixo (52,27%), diminuição do conteúdo

de voláteis (31,91%), diminuição do rendimento energético (67,29%) e mássico (41,50% pela perda de umidade e de voláteis leves) (REN, 2017) e o aumento do valor calórico (25,68 MJ/Kg). A perda de voláteis pode estar relacionada com a ação catalítica da parte mineral presente no bagaço (CHEW, 2011). Também foi observada a diminuição das relações O/C (de 0,8056 para 0,3461) e H/C (de 1,8164 para 0,4537) com o aumento dos parâmetros de torrefação. As equações de regressão obtidas são apresentadas nas Figuras 7, 8 e 9. Os valores do coeficiente de regressão (R<sup>2</sup>) e o coeficiente angular variam entre 0,99 - 0,74 e 2,4641-1,6307, respectivamente, o que indica um maior impacto da degradação térmica em H/C (DU, 2014). O aumento do valor calórico é consistente com a diminuição do teor de voláteis e as relações O/C e H/C (VALIX, 2017).

As Figuras 10, 11 e 12 mostram as relações entre o conteúdo de voláteis e carbono fixo para diferentes condições de torrefação do BCA. Na literatura não se reportam estudos sobre o impacto da torrefação nos rendimentos de bio-óleo durante a pirólise rápida do BCA. Pesquisas que relacionam máximos rendimentos de bio-óleo com os parâmetros de torrefação (temperatura e tempo de residência) deverão ser desenvolvidas com o propósito de otimizar a etapa do pré-tratamento.





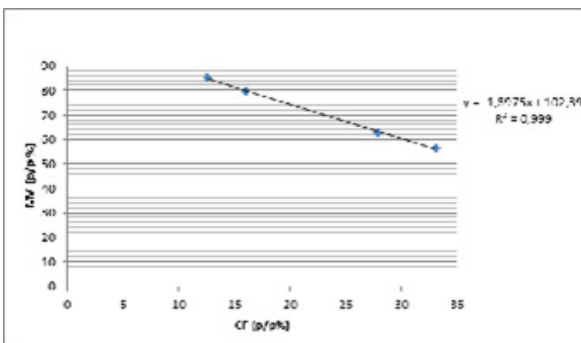


Figura 12. Matéria volátil versus parcela fixa de carbono para bagaço após torrefação: tempo de torrefação 2 horas (adaptado de VALIX et al. 2015).

### 5.3. Moagem

Como se explicou anteriormente, o tamanho da partícula tem influência no rendimento de bio-óleo durante a pirólise rápida, requerendo-se partículas com diâmetros menores do que 1 mm para obter bom rendimento da reação. O BCA é um material resistente à pulverização e com partículas de grande variedade de tamanho, forma e estrutura, sendo necessário o processo de moagem de forma a se obter um material com partículas homogêneas e de menores diâmetros. O crescente interesse pela co-incineração de biomassa tem provocado o desenvolvimento de várias pesquisas sobre a resistência de materiais lignocelulósicos ao processo de pulverização (ESTEBAN E CARRASCO, 2006; BITRA, 2009; MANI, 2004), e mais recentemente sobre o impacto da torrefação na moagem da biomassa (ARIAS, 2008; BRIDGEMAN, 2010; REPELLIN, 2010; PHANPHANICH AND MANI, 2011; ESSENDELFT, 2013; GIL, 2015; GONG, 2016).

ARIAS et al., 2008, estudaram o impacto da torrefação na moagem da madeira de eucaliptos torrada a em diferentes temperaturas (240, 260 e 280°C) e tempos de residência (0,25, 0,5, 1,2 e 3 horas) utilizando um moinho de corte. A distribuição granulométrica das partículas de madeira torrada e pulverizada foi realizada para avaliar a eficiência da cominuição do material. Em todos os casos foi observado uma diminuição do tamanho das partículas com o incremento dos parâmetros de torrefação, pois segundo ARIAS et al. (2008) a estrutura da ma-

deira torrada é menos fibrosa e mais uniforme (partículas com forma mais esféricas) do que em seu estado natural favorecendo a manipulação e o transporte. A Figura 13 mostra a influência dos parâmetros de torrefação (temperatura e tempo de residência) utilizando partículas com diâmetros entre 0,15 mm - 0,075 mm. No teste, realizado na temperatura de 250°C e 280°C, foi observado pouca influência da temperatura sobre o tempo de residência na faixa de 0,25 h até 2h. A Figura 14 apresenta uma análise similar para todas as partículas com diâmetros menores do que 0,425 mm. Os valores máximos do teor ou quantidade de partículas se atingem para os tempos de residência de 0,5h e 3 h para as temperaturas de 260°C e 280°C. Para a temperatura de 280°C a diferença entre ambos máximos é de apenas 2,3%. O teor de partículas com diâmetros menores do que 0,425 mm e entre 0,15 mm - 0,075 mm para a amostra no seu estado natural foram de 28,8 % e 4,7% respectivamente.

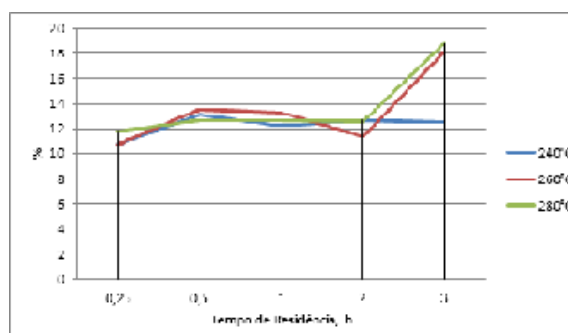


Figura 13. Quantidade de partículas (%) de diâmetro entre 0,15-0,075 mm para diferentes tempos de residência e temperatura de torrefação (adaptado de ARIAS, 2008).

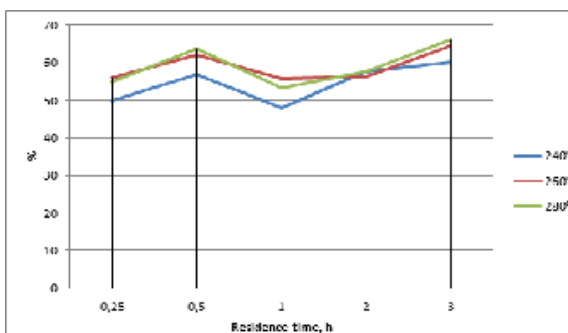


Figura 14. Quantidade de partículas (%) de diâmetro abaixo de 0,425 para diferentes tempos de residência e temperatura de torrefação (adaptado de ARIAS, 2008).

A dificuldade de fracionamento do BCA caracteriza a resistência à trituração, a estrutura fibrosa do BCA lhe confere uma elevada tenacidade e, como consequência, alta resistência à trituração. ASAGEKAR E JOSHI, 2014, investigaram as propriedades da fibra de diferentes variedades e graus de maturação da cana-açúcar. Os resultados obtidos mostraram que a resistência à tração e o alongamento são dependentes da qualidade da madeira. Fibras com cristalinidade alta e elevada tenacidade (12 g / tex - 18 g / tex) são rígidas.

Poucas pesquisas sobre a influência da torrefação sobre a eficiência de moagem da cana-de-açúcar estão disponíveis na literatura (DONG, 2015). DONG, 2015, utilizou o Índice de Moabilidade Hardgrove (Hardgrove Grindability Index, HGI) para avaliar o impacto da temperatura de torrefação (182, 206, 220, 248 e 273°C) na moagem do BCA. Os resultados revelaram um aumento do HGI para o BCA com o aumento de temperatura de torrefação. O HGI do BCA in natura é muito baixo (17) em comparação com o carvão, o que significa que o BCA requer maior energia para a trituração (DONG, 2015). Para temperaturas maiores do que 220°C o valor de HGI do BCA cresce rapidamente alcançando o valor de 73 para a temperatura de 273°C. Segundo DONG, 2015, a temperatura mínima efetiva de torrefação para o BCA é de 211°C para a que HGI tenha um valor de 40 (Figura 15). Na literatura não se reportam estudos sobre a influência da torrefação no consumo de energia para a pulverização do BCA. A redução do tamanho de partículas consiste em um processo com elevado gasto de energia. Estudos relacionados ao consumo de energia com a utilização de diferentes tipos de moinhos durante o fracionamento do BCA in natura para diferentes condições de torrefação e propriedades do material (granulometria inicial e final, teor de umidade, variedade da cana, etc.) podem ajudar a entender as vantagens e possíveis inconvenientes desta etapa do pré-tratamento do BCA para a pirólise rápida.

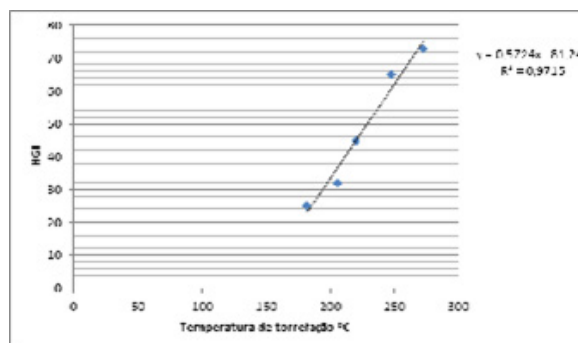


Figura 15. HGI versus temperatura torrefação do BCA (adaptado de DONG, 2015).

## 5.4. Lixiviação

O processo de lixiviação consiste em um mecanismo complexo em que a fase sólida (biomassa lignocelulósica) se relaciona com a fase líquida (solução de lixiviação). A biomassa apresenta na sua constituição elevadas quantidades de elementos que apresentam solubilidades diferentes. Portanto, a passagem de um determinado elemento para a solução de lixiviação depende, não só das quantidades presentes na biomassa, mas também principalmente da solubilidade de cada um.

O tratamento por lixiviação do BCA com soluções de ácido clorídrico (HCl) e ácido fluorídrico (HF) para remoção de extratos, hemicelulose e cinzas pode ser uma alternativa a se considerar durante o pré-tratamento do BCA com o objetivo de aumentar os rendimentos de bio-óleo durante a pirólise rápida.

DAS et al., 2004, investigaram a influência do conteúdo de cinzas do BCA nos rendimentos dos produtos da pirólise a vácuo (5Kp), com temperaturas de processo de 500°C e diâmetro de partículas iguais ou menores do que 0,250 mm. As amostras de BCA foram pré-tratadas (processo de lixiviação) com diferentes soluções aquosas (HCl, HF).

A remoção do conteúdo de cinzas, de extratos, hemicelulose, assim como o aumento relativo do teor de celulose no BCA provocou um aumento do conteúdo de bio-óleo nos produtos. A Figura 16 mostra os rendimentos de óleo, char e gás para bagaços em estado natural e tratado com solução de HF 3%. Os resultados mostraram que o rendimento de bio-óleo aumentou e

provocou a diminuição do conteúdo de cinzas do bagaço em 60 vezes (de 1,83% para 0,03%) (DAS et al., 2004).

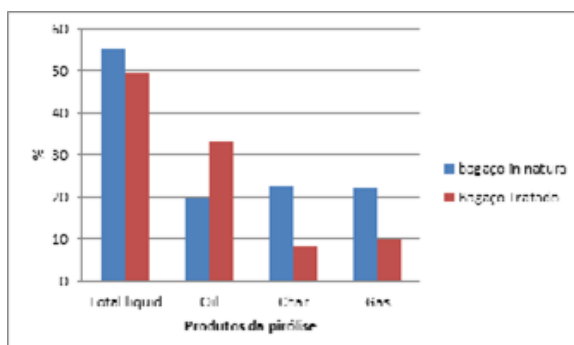


Figura 16. Rendimento da Pirólise do bagaço in natura e tratado (lixiviação ácida) bagaço de cana-de-açúcar (adaptado de Das et al. 2004).

MACHÍN et al. (2018) avaliaram o efeito da lixiviação ácida sobre as mudanças resultantes no comportamento de degradação térmica do bagaço de cana-de-açúcar. Uma comparação entre ácido cítrico e agentes de lixiviação bem conhecidos, incluindo ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), HCl e água, foi feita considerando seus efeitos nas propriedades químicas, estruturais e térmicas do bagaço. A desmineralização e a potencial hidrólise da biomassa foram avaliadas com base nas análises elementares e proximais, espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR-ATR) e análise termogravimétrica (TGA). Os resultados mostraram que para o ácido cítrico e as soluções de lixiviação de referência, a fração de massa das cinzas removidas se encontrava em uma faixa estreita (entre 38,9 e 54,1%), independentemente das condições de lixiviação (temperatura e tempo) testadas. A análise bifatorial não paramétrica dos resultados revelou que a natureza da solução de lixiviação e sua interação com o tempo de contato são de grande importância. No entanto, os resultados não mostraram influência significativa da temperatura e sua interação com o tempo de contato.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O BCA é a biomassa lignocelulósica mais abundante no Brasil e sua disponibilidade deve aumentar nos próximos anos devido ao aumento da produção cana-de-açúcar e seus derivados. O valor energético e comercial do BCA pode ser melhorado mediante a produção de bio-óleo por pirólise rápida. Não entanto, as propriedades e características do BCA dificultam sua conversão em produtos de maior interesse comercial, sendo necessárias as etapas de pré-tratamento.

As etapas de pré-tratamento, antes da pirólise rápida, se resumem no diagrama representado pela Figura 17.

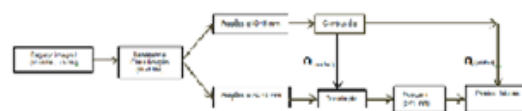


Figura 17. Etapas de pré-tratamento de bagaço de cana antes da pirólise rápida

Na etapa de secagem destaca-se a utilização de secadores pneumáticos com gases de combustão nas caldeiras que permite diminuir a umidade do BCA até valores recomendados (menores de 10%) facilitando a obtenção de bio-óleo com maior valor energético por pirólise rápida.

A classificação pneumática do BCA é realizada em duas frações: uma fração com diâmetros de partícula menores do que 0,45 mm e com alto conteúdo de cinzas, e outra com diâmetros de partícula maiores do que 0,45 mm e com alto conteúdo de celulose e voláteis, o que permite o aproveitamento de toda a biomassa. Ambas frações podem ser utilizadas na pirólise rápida, a primeira como combustível na geração de calor, e a segunda para a obtenção de altos rendimentos de bio-óleo. O tratamento do BCA por lixiviação diminui o conteúdo de cinzas, extratos e hemicelulose, aumentando o teor de celulose, favorecendo o rendimento de bio-óleo durante a pirólise rápida.

A torrefação das frações com diâmetros de partícula maiores do que 0,45 mm permite incrementar o valor calórico e a densidade



energética, melhorando as características hidrofóbicas, aumentando a friabilidade e diminuindo o consumo de energia durante o processo de moagem. A energia necessária para a torrefação pode ser utilizada a partir da combustão das frações com diâmetros de partícula menores do que 0,45 mm. Pesquisas devem ser realizadas para determinar os valores idôneos dos parâmetros da torrefação (temperatura e tempo de residência) para maximizar os rendimentos de bio-óleo.

A pulverização do BCA torrado permite obter uma maior quantidade de partículas com diâmetros menores do que 1 mm, possibilitando o aquecimento rápido e homogêneo das partículas no reator de pirólise rápida e favorecendo a formação de bio-óleo. Se sugere pulverizar o bagaço imediatamente após ser torrado, pois a temperatura ao final da torrefação (aproximadamente de 300oC) pode favorecer o processo de pulverização. Também devem ser desenvolvidos estudos que permitam avaliar o consumo de energia de diferentes tipos de moinhos durante a pulverização do BCA torrado, avaliando os parâmetros de temperatura e tempo de residência durante a torrefação e a granulometria.

Pode-se concluir que as propriedades do BCA dependem de vários fatores e variam com a procedência do BCA. Neste sentido é importante avaliar o pré-tratamento correto para cada projeto, a fim de obter resultados com altos rendimentos energéticos e mássicos que permitam a viabilidade econômica e tecnológica do processo.

**AGRADECIMENTOS:** À Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa de Estado de Rio de Janeiro (FAPERJ).

## REFERÊNCIAS.

ABRIL, A.; AGÜERO, C. 2000. Manual de los Derivados de la Caña de Azúcar. ICIDCA: La Habana, 2000; Parte 2, ep. 2.2, p 32.

ALMEIDA, E. 2012. Study of the pneumatic separation of sugarcane bagasse fraction and its influence on enzymatic hydrolysis. Master's Degree Dissertation presented to School of Chemical Engineering. Campinas. 2012: Disponível em <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000866267>> Acessado em junho 2017.

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY, AMS. STATE OF THE CLIMATE IN 2017. Special Supplement to the Bulletin of the American Meteorological Society Vol. 99, No. 8, August 2018. Disponível em <[https://www.ametsoc.net/sotc2017/StateoftheClimate2017\\_lowres.pdf](https://www.ametsoc.net/sotc2017/StateoftheClimate2017_lowres.pdf)> Acessado em agosto 2018.

ANDERSON, C. Aerodynamics of bagasse particles. Proceeding of Australian Society of Sugarcane Technologists, 235-239

ANUKAM, A.; MAMPHWELI, S.; REDDY, P.; MEYER, E.; OKOH, O. 2016. Pre-processing of sugarcane bagasse for gasification in a downdraft biomass gasifier system: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016, 66: 775-801.

ANUKAM, A; MAMPHWELI, S; OKOH, O. AND REDDY, P. 2017. Influence of Torrefaction on the Conversion Efficiency of the Gasification Process of Sugarcane Bagasse. Bioengineering 4, n. 22: 1-23. doi:10.3390/bioengineering4010022

ARIAS, B.; PEVIDA, C.; FERMOSO, J.; PLAZA, M.G.; RUBIERA, F.; PIS, J.J. 2008. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. Fuel Processing Technology 89: 169-175.

- ARALDE, L.; TOSI, E.; TAPIZ, L.; PAZ DE VÁSQUEZ, D.; CARDENAS, J. 1991. Determinación de la velocidad de Transporte neumático de bagazo de caña de azúcar. *Revista Industrial e Agrícola de Tucumán* 68, n. 1-2: 235-239.
- ARNAO, J.; CORREA, J.; SILVA, M.; NEBRA, S. 2006. Bagasse of sugarcane drying- a review. *International Sugar Journal* 108, n. 1291: 381-386.
- ARNAO, J.; NEBRA, S. 2009. Bagasse Dryer Role in the Energy Recovery of Water Tube Boilers Drying Technology 27, n.4: 587-594. DOI:10.1080/07373930802716326.
- ASADULLAH, M.; RAHMAN, M.M.; ALI, M.M.; RAHMAN, M.S.; MOTIN, M.A.; SULTAN, M.B.; ALAM, M.R. 2007. Production of bio-oil from fixed bed pyrolysis of bagasse *Fuel* 86: 2514–2520.
- ASAGEKAR, S.; JOSHI, V. 2014. Characteristics of sugar fibres. *Indian Journal of Fibre & Textile Research* 39: 180-184.
- BAHURUDEEN, A.; VAISAKH, K.S.; SANTHANAM, M. 2015. Availability of sugarcane bagasse ash and potential for use as a supplementary cementitious material in concrete. *Indian Concrete Journal* 89, n.6.
- BASU, P. 2010. Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory. Elsevier: Burlington, USA, 2000: 27-96.
- BEATÓN, P. 1989. Fundamentación de las vías para el incremento de la eficiencia de las calderas de los centrales azucareros de la República de Cuba mediante a combustión del bagazo en estado de suspensión. Tesis presentada en opción al grado de doctor en Ciencias Técnicas, Leningrado.
- BEATÓN, P.; SILVA, E. 1991. Pruebas de Balance térmico en calderas para bagazo; ISPJAM: Santiago de Cuba, p 12.
- BEATÓN, P.; BRITO, A.; ABREU, A.; BENITEZ, R. 1999. Modification for suspension burning of bagasse *International Sugar Journal* 101, n. 1210:520- 522.
- BISINELLA, F.; RIBEIRO, C.; MÓDENES, A.; ESPINOZA, F.; BERGAMASCO, R.; CURVELO, N. 2015. Assessment of Drying Temperature of Sugarcane bagasse on Sorption of Reactive Blue 5G Dye. *Fibers and Polymers* 16, n.8: 1646-1656, DOI 10.1007/s12221-015-5087-2.
- BOMBINO, E.; ROCA, G.; MARÍN, J. 2013. Modelación del secado neumático vortiginoso do bagazo da caña de azúcar. *Ingeniería Mecánica* 16, n.3:194-201.
- BRIDGEMAN, T.; JONES, J.; WILLIAMS, A.; WALDRON, D. 2010. An investigation of the grindability of two torrefied energy crops. *Fuel* 89: 3911-3918.
- BRIDGWATER, A.V. 2012. Review of Fast pyrolysis of biomass and product upgrading, *Biomass and Bioenergy* n. 38: 68 -94.
- BITRA, V.; WOMAC, A.; CHEVANAN, N.; MIU, P.; IGATHINATHANE, C.; SOKHANSANJ, S.; SMITH, D. 2009. Direct mechanical energy measures of hammer mill comminution of switchgrass wheat straw, and corn stover and analysis of their particle size distribution. *Powder Technology* 193: 32-45.
- BULUSHEVA, D.; ROSSA, J. 2011. Catalysis for conversion of biomass to fuels via pyrolysis and gasification: A review. *Catalysis Today* 171: 1– 13.
- CAI, J.; HE, Y.; YU, X.; SCOTT, B.; YANG, Y.; ZHANG, X.; YU, Y.; LIU, R.; BRIDGWATER, 2017. A. Review of physicochemi-

- cal properties and analytical characterization of lignocellulosic biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76: 309-322.
- CARRIER, M.; HUGO, T.; GORGENS, J.; KNOETZE, H. 2011. Comparison of slow and vacuum pyrolysis of bagasse of sugarcane. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 90: 18-26.
- CARRIER, M.; HARDIE, G.A.; URAS, U.; GORGENS, J.; KNOETZE, J. 2012. Production of char from vacuum pyrolysis of South-African bagasse of sugarcane and its characterization as activated carbon and biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 96: 24-32
- CARRIER, M.; JOUBERT, J. E.; DANJE, S.; HUGO, T.; GORGENS, J.; KNOETZE, J. H. 2013. Impact of the Lignocellulosic Material on Fast pyrolysis Yields and Product Quality. *Bioresource Technology* 150: 129-138.
- CASTALDELLI, V.N.; MORAES, J.C.; AKASAKI, J.L.; MELGES, J.L.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M.V.; SORIANO, L.; PAYÁ, J.; TASHIMA, M.M. 2016. Study of the binary system fly ash/sugarcane bagasse ash (FA/BCAA) in  $\text{SiO}_2/\text{K}_2\text{O}$  alkali-activated binders. *Fuel* 174: 307-316.
- CHEN, W.H.; DU, S.W.; TSAI, C.H.; WANG, Z. Y. 2012. Torrefied biomasses in a drop tube furnace to evaluate their utility in blast furnaces. *Bioresource Technology* 111: 433-438
- CHEN, W.; PENG, J.; BI, X. 2015. A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 44: 847-866.
- CHERUBINI, F.; STROMMAN, A.H. 2011. Chemicals from lignocellulosic biomass: opportunities, perspectives, and potential of biorefinery systems. *Biofuels Bioproducts and Biorefining* 5: 548-561.
- DANIYANTO, SUTIDJAN, DEENDARLI-ANTO, BUDIMAN, A. 2015. Torrefaction of Indonesian sugar-cane bagasse to improve biosyngas quality for gasification process. *Energy Procedia* 68: 157 - 166.
- DAS, P.; GANESH, A.; WANGIKAR, P. 2004. Influence of pretreatment for deashing of sugarcane bagasse on pyrolysis products. *Biomass and Bioenergy* 27: 445-457.
- DEWANGAN, A.; PRADHAN, D.; SINGH, R. 2016. Co-pyrolysis of sugarcane bagasse and low-density polyethylene: Influence of plastic product yield *Fuel* 185: 508-516.
- DONG, L. 2005. Impact of torrefaction on grindability, hydrophobicity, hydrophobicity and fuel characteristics of biomass relevant to Hawaii. A thesis submitted to the graduated division of the University of Hawaii at Manoa in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in mechanical engineering, 116pp. Disponível em <https://scholarspace.manoa.hawaii.edu/bitstream/10125/42578/1/151211%20Dong%20Thesis%20FINAL.pdf>. Acessado em maio 2017
- DRIEMEIR, C.; OLIVEIRA, M.; MENDES, F.; GOMEZ, E. 2011. Characterization of sugarcane bagasse powders. *Powder Technology* 214:111-116.
- DU, S.; CHEN, W.; LUCAS, J. 2014. Pretreatment of biomass by torrefaction and carbonization for coal blend used in pulverized coal injection. *Bioresource Technology* 161: 333-339.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE. 2016. Demanda de Energia 2050, Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, janeiro 2016, 257. Disponível em <http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/DEA%2013-15%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf>> Acessado em Abril 2017.

- ESSENDELFT, D.; ZHOU, X.; KANG, B. 2013. Grindability determination of torrefied biomass materials using the Hybrid Work Index. *Fuel* 105: 103-111.
- ESTEBAN, L.; CARRASCO, J. 2006. Evaluation of different strategies for pulverization of forest biomass *Powder Technology* 166: 139-151.
- FERNANDES DE OLIVEIRA, L.; GOMES, J.; GASPAR, P.; VILELA, S.; ALVES, J.; FONSECA, B. 2011. Sugarcane bagasse Drying in a Cyclone: Influence of Device Geometry and Operational Parameters. *Drying Technology* 29, n.8: 946-952, DOI: 10.1080/07373937.2011.562062.
- FILIPPISA, P.; BORGIANNI, C.; PAOLUCCI, M.; POCHETTI, F. 2004. Gasification process of Cuban bagasse in a two-stage reactor. *Biomass and Bioenergy* 27: 247 – 252.
- FRÍAS, M.; VILLAR, E.; SAVASTANO, H. 2011. Brazilian bagasse of sugarcane ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. *Cement & Concrete Composites* 33: 490–496.
- GARCIA-PÉREZ, M.; CHAALA, A.; ROY, C. 2002. Vacuum pyrolysis of sugarcane bagasse. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 65: 111–136.
- GAREA, B.; CURBELO, A.; ARTÍLES, J.; CEDENHO, L. 1991. Determinación de la conductividad y la difusividad térmica del muello de la caña de azúcar. *Tecnología, Ciencia y Educación Ediciones Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos* 7, n. 1:20-24.
- GIL, M.V.; GARCIA, R.; PEVIDA, C.; RUBIERA, F. 2015. Grindability and combustion behavior of coal torrefied biomass blends. *Bioresource Technology* 191: 205-2012.
- GILBERD, J.; SHEEHAN, M. 2013. Modeling the effects of bagasse pre-drying in sugar mill boiler systems. *Proceedings of the Australian Society of Sugarcane Technology* 35: 1-7.
- GOLLA KOTA, A.R.; REDDY, M.; SUBRAMANYAM, M.D.; KISHORE, N. 2016. A review on the upgradation techniques of pyrolysis oil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58:1543–1568.
- GOMES, J.; REZENDE, D.; SIVA, M.; NEBRA, S. 2004. Cyclone as a bagasse of sugarcane dryer. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 12, n.6: 826-830.
- GOMES, J. M.; GOMES, J. L.; FONSECA, B.; BORÉM, F.; BORGES, S. 2015. Drying and isotherms of bagasse of sugarcane. *Revista Engenharia na Agricultura, Viçosa – MG* 23, n.1: 128-142.
- GOMEZ, E.; CORTEZ, L.; ALARCON, G.; ROCHA, G.; SILVA, V.; ALMEIDA, E. 2012. Some simplified properties of elephant grass and sugarcane trash particles. *Fuel Processing Technology* 104: 234–244.
- GONG, C.; HUANG, J.; FENG, C.; WANG, G.; TABIL, L.; WANG, D. 2016. Effects and mechanism of ball milling on torrefaction of pine sawdust. *Bioresource Technology* 214: 242-247.
- GONZALEZ, A.; PENEDO, M.; MAURIS, E.; FERNANDEZ-BERRIDI, M.J.; IRUSTA, L.; IRUIN, J. 2010. Pyrolysis analysis of different Cuban natural fibres by TGA and GC/FTIR. *Biomass and Bioenergy* 34: 1573 -1577
- HENKEL, C.; MULEY, P.D.; ABDOLLAHI, K.K.; MARCULESCU, C.; BOLDOR, D. 2016. Pyrolysis of energy cane bagasse and invasive Chinese tallow tree (*Triadica sebifera* L.) biomass in an inductively heated reactor, *Energy Conversion and Management* 109: 175–183.



- HUA, M.Y.; LI, B.X. 2016. Co-pyrolysis characteristics of the sugarcane bagasse and *Enteromorpha prolifera*. *Energy Conversion and Management* 120: 238–246.
- ISLAM, M.; PARVEEN, M.; HANIU, H. 2010. Properties of sugarcane waste-derived bio-oils obtained by fixed-bed fire-tube heating pyrolysis. *Bioresource Technology* 101: 4162–4168.
- ISLAM, R.M.; HANIU, H.; ISLAM, M.N.; UDDIN, S. 2010a. Thermochemical conversion of sugarcane bagasse into bio-crude oils by fluidized – bed pyrolysis technology. *Journal of Thermal Science and Technology* 5, n. 1: 11–23.
- JORDAN. Caracterização granulométrica de biomassa polidispersa pelo método de peneiramento mecânico. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n1p102-113/2016>
- KATYAL, S., THAMBIMUTHU, K. AND VALIX, M. 2003. Carbonization of Bagasse in a Fixed Bed Reactor: Influence of Process Variables on Char Yield and Characteristics. *Renewable Energy* 28: 713–725. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(02\)00112-X](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(02)00112-X)
- KHATAMI, R.; STIVERS, C.; JOSHI, K.; LEVENDIS, Y. A.; SAROFIM, A. F. 2012. Combustion Behavior of Single Particles From Three Different Coal Ranks and From Bagasse of sugarcane in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Atmospheres. *Combustion and Flame* 159, n.3: 1253–1271.
- LIN, T.; KUO, C. 2012. Study of products of bagasse and sawdust via slow pyrolysis and iron-catalyze. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 96: 203–209.
- MACHÍN, L R; PÉREZ, L E A; BERMÚDEZ, R.A.P; LEDÓN, Y C; PRINS, W.; RONSSE, F. 2018. Effect of Citric Acid Leaching on the Demineralization and Thermal Degradation Behavior of Sugarcane Trash and Bagasse. *Biomass & Bioenergy* 108: 371–380.
- MANALS-CUTIÑO, E.M.; PENEDO-MEDINA, M. 2015. Caracterización del bagazo de caña como biomasa vegetal. *Tecnología Química XXXV*, n. 2: 179–192.
- MANI, S.; TABIL, L.; SOKHANSANJ, S. 2004. Grinding performance and physical properties of wheat and barley straws, cook stover and switchgrass. *Biomass and Bioenergy* 27: 339 – 352.
- MANYA, J.; ARAUZO, J. 2008. An alternative kinetic approach to describe the isothermal pyrolysis of micro- particles of bagasse of sugarcane. *Chemical Engineering Journal*. 139: 549–561.
- MARTÍNEZ, A. 1981. Condutividade térmica del bagazo de caña da variedade Mayari 5514 para temperaturas inferiores a 373 °K. *Ingeniería Energética* 6:45– 50.
- MARTÍNEZ, A. 1982. Difusividad térmica del bagazo de caña de la variedad Mayari 5514. *Ingeniería Energética* 3:143–148.
- MAY, J.; SHEEHAN, M.; AJAYI, O.; HICK- EY, T. 2014. Bagasse dryer design using multi-scale compartment models. *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technology* 36: 506–515.
- MAZUTTI, M.; ZABOT, G.; BONI, G.; SKOVRONSKI, A.; OLIVEIRA, D.; DI LUCIO, M.; OLIVEIRA, J.; RODRIGUES, M.; TREICHEL, H.; MAUGERI, F. 2010. Mathematical modeling of thin-layer drying of fermented and non-fermented sugarcane bagasse. *Biomass and Bioenergy* 34: 780 – 786.
- MENDES, F.; CHAUX, A.; THOMEO, J. Efeito da umidade nas propriedades físicas e estruturais do bagaço de cana. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química. 19- 22 de outubro de 2014 Sc. Brasil

- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, MME. 2016. Balanço Energético Nacional (BEN) 2016, Matriz Energética Nacional 2016 – Ano Base 2015, Ministério de Minas e Energia. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioInicial.aspx?anoColeta=2016&anoFimColeta=2015>. Acessado em Novembro 2016.
- MMA. Acordo de Paris. Disponível em <http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris> Acessado em março 2018.
- MONTOYA, J.I.; VALDÉS, C.; CHEJNE, F.; GÓMEZ, C.A.; BLANCO, A.; MARRUGO, G.; OSORIO, J.; CASTILLO, E.; ARISTÓBULO, J.; ACERO, J. 2015. Bio-oil production from Colombian bagasse by Fast pyrolysis in a fluidized bed: An experimental study. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 112: 379–387.
- MORGENROTH, B.; BATSTONE, D. 2005. Development and prospects for drying bagasse by steam. *International Sugar Journal* 107, n. 1279:410-415.
- MUNIR, S.; DAOOD, S.S.; NIMMO, W.; CUNLIFFE, A. M.; GIBBS, B. M. 2009. Thermal Analysis and Devolatilization Kinetics of Cotton Stalk, Bagasse of sugarcane and Shea Meal Under Nitrogen and Air Atmospheres. *Bioresource Technology* 100, n.3: 1413–1418.
- MYERS, T. G. AND MITCHELL, S. L. 2016. Safe storage of sugar bagasse. Disponível em < <https://www.wits.ac.za/media/wits-university/conferences/misgsa/documents/2018/SAFE%20STORAGE%20OF%20SUGAR%20BAGASSE.pdf>>. Acessado em junho 2018
- NEBRA, S.A.; MACEDO, I. 1988. Bagasse Particles Shape and Size and Their Free-Settling Velocity. *International Sugar Journal* 90. 1077: 168-170.
- OLIVA, L.; BEATÓN, P. 1981. Determinación del ángulo de deslizamiento del bagazo en dependencia de la humedad. *Ingeniería energética* 9: 295-298.
- ORTIZ, L.A.; SEGURA, F.J.; JABALERA, R.S.; PAULA, M.M.; ARIAS DO CAMPO, E.; GUTIERREZ, J.S.; BRETADO, M.A.; COLLINS-MARTINEZ. 2013. Low temperature bagasse de sugarcane pyrolysis for the production of high purity hydrogen through steam reforming and CO<sub>2</sub> capture. *International Journal of Hydrogen energy* 38: 12580 -12588.
- OSORIO, J. & CHEJNE, F. 2017. Bio-Oil Production in Fluidized Bed Reactor at Pilot Plant from Sugarcane Bagasse by Catalytic Fast Pyrolysis. *Waste Biomass Valor.* DOI: 10.1007/s12649-017-0025-8
- PACH, M.; ZANZI, R.; BJÖRNBOM, E. 2012. Torrefied Biomass a Substitute for Wood and Charcoal. 6th Asia-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization, May, 2002.
- PANCHAL, R.; SHINDE, S.; PANCHAL, S. 2016. Effect of Bagasse Moisture on Boiler Performance. *International Research Journal of Multidisciplinary Studies* 2, n.1: 1-8.
- PATEL, B.; GAMI, B.; BHIMANI, H. 2011. Improved fuel characteristics of cotton stalk, prosopis and sugarcane bagasse through torrefaction. *Energy for Sustainable Development* 15: 372–375.
- PENEDO, M.M.; SÁNCHEZ DO CAMPO L. A.; FALCÓN H.J. 2008. Pirólisis de bagazo de caña a escala de laboratorio. Parte I: Influencia de las condiciones de operaciones en el rendimiento de productos. *Tecnología Química* 28, n. 2: 61-70.
- PERAZZINI, H.; FLAVIO BENTES FREIRE, FÁBIO BENTES FREIRE TEIXEIRA, J. 2016. Thermal Treatment of Solid Wastes Using Drying Technologies: A Review. *Drying technology* 34, n.1: 39–52. <http://>

dx.doi.org/10.1080/07373937.2014.995803.

PIMCHUAI, A.; DUTTA, A.; BASU, P. 2010. Torrefaction of Agriculture Residue to Enhance Combustible Properties. *Energy Fuels* 24: 4638–4645, DOI: 10.1021/ef901168f.

PHANPHANICH, M.; MANI, S. 2011. Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology* 102: 1246 – 1253.

POLANCO, L.; KOCHERGIN, V.; ALVAREZ, J. 2013. Fluidized Bed Superheated Steam Dryer for Bagasse. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems* 3: 265-271, <http://dx.doi.org/10.4236/jsbs.2013.34036>.

PONCE, N.; FRIEDMAN, P.; LEAL, D. 1983. Geometric properties and density of bagasse particles. *International Sugar Journal* 85: 291-295.

PRAVEEN, L.; STALIN, B. 2016. Optimized Design of a Bagasse Dryer System for Sugar Industry. *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science* 6, n. 4: 115- 119.

PURANIK, V.; YARNAL, G. 2009. Improved method of bagasse drying for energy saving in sugar industries. *International Sugar Journal*. 2009 111, no 1329: 572-581.

RASUL, M.; RUDOLPH, V.; CARSKY, M. 1999. Physical properties of bagasse. *Fuel* 78: 905-910.

REPELLIN, V.; GOVIN, A.; ROLLAND, M.; GUYONNE, T R. 2010. Energy requirement for fine grinding of torrefied wood. *Biomass and Bioenergy* 34:923 – 930.

REN, X.; SUN, R.; MENG, X.; VOROBIEV, N.; SCHIEMANN, M.; LEVENDIS, Y. 2017. Carbon, sulfur and nitrogen oxide emissions from combustion of pulverized raw and torre-

fied biomass Fuel 188: 310–323.

RINALDI, R.; SCHUTH, F. 2009. Design of solid catalysts for the conversion of biomass. *Energy & Environmental Science* 2: 610-626.

ROCA, G.; GÓMEZ.; BOIZAN, M.; CORTEZ, L. 2013. Measuring effectiveness of pneumatic classification of bagasse of sugarcane particles. *International Engineering Journal* 1, n.1. Disponível em <http://pub.iengj.org/?journal=IENGJ&page=article&op=view&path%5B%5D=3> Acessado junho 2017.

RODRIGUEZ, R.; MAGNE, P.; DEGLISE, X. 1987. Sugarcane bagasse as a feedstock for an industrial Fast pyrolysis process under development. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 12: 301-318.

SF AGRO. Farming Brasil. Disponível em <<https://sfagro.uol.com.br/producao-de-cana-2017-2018>>. Acessado em junho 2018.

SILVA, M.; CORRÊA, J. 2005. Academic Research on Drying in Brazil 1970–2003, *Drying Technology* 23, n.7: 1345-1359. DOI: 10.1081/DRT-200063473.

SHRIVASTAV, S.; HUSSAIN, I. 2013. Design of Bagasse Dryer to Recover Energy of Water Tube Boiler in a Sugar Factory. *International Journal of Science and Research* 2, n. 8: 356-358.

SOHAIB, Q., MUHAMMAD, A. and YOUNAS, M. 2017. Fast pyrolysis of sugarcane bagasse: Effect of pyrolysis conditions on final product distribution and properties, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 39, n2: 184-190, DOI: 10.1080/15567036.2016.1212292

SOUZA, AE; TEIXEIRA, SR; SANTOS, GT; COSTA, FB; LONGO, E. 2011. Reuse of sugarcane bagasse ash (SCBA) to produce ceramic materials. *Journal of Environmental Manage-*

ment. 2011 Oct;92(10):2774-80. doi: 10.1016/j.jenvman.2011.06.020.

SRIVASTAVA, U., KAWATRA, S. K., AND EISELE, T. C. 2013. Production of pig iron by utilizing biomass as a reducing agent. *Int. J. Miner. Process* 119, 51–57. doi:10.1016/j.minpro.2012.12.008

STÖCKER, M. 2008. Biofuels and biomass-to-liquid flues in the biorefinery: catalytic conversion of lignocellulosic biomass using porous materials. *Angewandte Chemie International Edition* 47: 9200-9211.

TEIXEIRA, S.R.; MAGALHÃES, R.S.; ARENALES, A.; SOUZA, A.E.; ROMERO, M.; RINCÓN, J.M. 2014. Valorization of sugarcane bagasse ash: Producing glass-ceramic materials. *Journal of Environmental Management* 134: 15-19.

TOLMASQUIN, M. T. 2016. Energia Renovável, hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, EPE, Rio de Janeiro 452pp. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf>> Acessado em Março 2017.

TSAI, W.T.; LEE, M.K.; CHANG, Y.M. 2006. Fast Pyrolysis of rice straw, bagasse of sugarcane and coconut shell in an induction-heating reactor. *Journal of Analysis and Application* 76: 230–237.

TREDET, W and SUNTIVARAKORN, R. 2017 Fast Pyrolysis of Sugarcane Bagasse in Circulating Fluidized Bed Reactor - Part A: Effect of Hydrodynamics Performance to Bio-Oil Production. *Energy Procedia* 138: 801-805. doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.072

TRIANA, O.; LEONARD, M.; SAAVEDRA, F.; FERNANDEZ, N.; GALVEZ, G.; EMMA PENA, E. 1990. Atlas of sugarcane bagasse,

GEPLACEA: México DF, p. 38.

UNICADATA. 2018. UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. São Paulo. Brasil. Disponível em <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=32&tipoHistorico=4>>. Acessado em março de 2018.

VALIX, M.; KATYAL, S.; CHEUNG, W. 2017. Combustion of thermochemically torrefied bagasse of sugarcane. *Bioresource Technology* 223: 202–209

VAN DER STELT, M.J.; GERHAUSER, H.; KIEL, J.H.; PTASINSKI, K.J. 2011. Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and Bioenergy* 35: 3748 - 3762.

VAN DE VELDEN, MANON, BAEYENS, JAN, BREMS, ANKE, JANSSENS, BART AND DEWIL, RAF. 2010. Fundamentals, kinetics and endothermicity of the biomass pyrolysis reaction. *Renewable Energy* 35, n.1:232-242.

VARMA, A. K.; MONDAL, P. 2016. Physico-chemical Characterization and Pyrolysis Kinetic Study of Sugarcane bagasse Using Thermogravimetric Analysis, *Journal of Energy Resources Technology* 138. DOI: 10.1115/1.4032729.

VIJAYARAJ, B.; SARAVANAN, R. 2008. Numerical Modeling of Moisture and Temperature Distribution within a Rectangular Bagasse Layer Undergoing Drying. *Drying Technology* 26, n.6: 749-758, DOI: 10.1080/07373930802046419.

WHITE, J.; CATALLO, W. LEGENDRE B. 2011. Biomass pyrolysis kinetics. A comparative critical review with relevant agricultural residue case studies. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 91: 1-33.

WOODCOOK, C. R.; MASON, J. S. 1987. Bulk solids Handling: An introduction to the practice and technology. Glasgow: Leonard Hill.



WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, WMO. GREENHOUSE GAS BULLETIN. No. 13: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2016. 2017. Disponível em: <[https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=4022](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=4022)> Accessed on 24 January 2018.

WRIGHT, M.; LIMA, I.; BIGNER, R. 2016. Microbial and physicochemical properties of sugarcane bagasse for potential conversion to value-added products. *International Sugar Journal* 118, n. 1410: 424-433.

XU, R.; FERRANTE, L.; BRIENS, C.; BERRUTI, F. 2011. Bio-oil production by flash pyrolysis of sugar cane residues and post-treatments of the aqueous phase. *Journal of Analytical Applied Pyrolysis* 91: 263-272.

YILDIZ, G.; RONSSE, F.; VAN DUREN, R.; PRINS, W. 2016. Challenges in the design and operation of processes for catalytic Fast pyrolysis of woody biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57: 1596–1610.

ZANATTA, ER.; REINEHR, TO; AWADALLAK, JÁ; KLEINÜBING, SJ; DOS SANTOS, JBO. 2016. Kinetic studies of thermal decomposition of sugarcane bagasse and cassava bagasse. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 125, n.1: 437-445. DOI 10.1007/s10973-016-5378-X.

ZHANG, Y.; GHALY, A.; LI, B. 2012. Availability and physical properties of residues from major agricultural crops for energy conversion through thermochemical processes. *American Journal of Agricultural and Biological Science* 7. n. 3: 312-321, doi:10.3844/ajabssp.2012.312.321.