

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
NÍVEL MESTRADO**

**ALTAIR FERNANDES**

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE COMBUSTÃO DA BIOMASSA (BAGAÇO DE  
CANA) PARA VALORIZAÇÃO DAS CINZAS GERADAS**

**São Leopoldo**

**2019**



ALTAIR FERNANDES

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE COMBUSTÃO DA BIOMASSA (BAGAÇO DE  
CANA) PARA VALORIZAÇÃO DAS CINZAS GERADAS**

Dissertação apresentada como requisito  
parcial para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia Civil, pelo Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Civil da  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos -  
UNISINOS

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes

São Leopoldo

2019

F363a      Fernandes, Altair.  
Avaliação do processo de combustão da biomassa (bagaço de cana) para valorização das cinzas geradas / por Altair Fernandes. - São Leopoldo, 2019.

101 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2019.  
Orientação: Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes, Escola Politécnica.

1.Biocombustíveis. 2.Biomassa. 3.Energia – Fontes alternativas. 4.Usinas de açúcar. 5.Cana-de-açúcar. 6.Bagaço de cana. 7.Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). I.Moraes, Carlos Alberto Mendes. II.Título.

CDU 662.6  
620.91

Catálogo na publicação:  
Bibliotecária Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252

ALTAIR FERNANDES

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE COMBUSTÃO DA BIOMASSA (BAGAÇO DE  
CANA) PARA VALORIZAÇÃO DAS CINZAS GERADAS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 22 de fevereiro de 2019

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Paulo Ricardo da Silva Pereira – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

---

Prof. Dra. Regina Célia Espinosa Modolo – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

---

Profa. Dra. Daiane Calheiro Evaldt – Universidade do Vale do Rio dos Sinos



## **AGRADECIMENTOS**

Minha dissertação não poderia chegar ao objetivo final sem o apoio precioso de várias pessoas.

Primeiramente agradeço à Deus por conseguir concluir mais uma etapa de minha vida. Meus pais Messias (*in memoriam*) e minha mãe Hortência, que sempre me apoiaram e me incentivaram a dar sequência em minha carreira acadêmica. Claudiane minha esposa e Mariana minha filha, foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador professor Carlos, que com paciência e serenidade conduziu esse trabalho sempre me incentivando e apoiando nos momentos difíceis. Às professoras Regina e Feliciane, que com seus conhecimentos e experiência acadêmica, contribuíram muito para a conclusão de minha dissertação.



## RESUMO

As usinas sucroalcooleiras representam um importante papel na matriz energética brasileira e utiliza a biomassa resultante da moagem da cana-de-açúcar na forma de bagaço que é utilizado como fonte de energia interna, como energia elétrica e vapor além de cogeração para a rede nacional de distribuição de energia elétrica. As cinzas são resíduos provenientes do resultado da combustão do bagaço de cana-de-açúcar que são depositadas em tanques de armazenamento, sendo utilizada muitas vezes como fertilizante. O bagaço percorre um caminho curto até alimentar a caldeira como combustível e se não tiver um processamento de moagem adequado poderá afetar diretamente a qualidade da combustão para geração de vapor. Neste contexto este trabalho teve como principal objetivo a avaliação do processo de combustão do bagaço de cana-de-açúcar para a valorização das cinzas geradas em duas usinas sucroalcooleiras no Estado de Goiás. Para isto foram estudados os processos produtivos e as cinzas geradas, realizado ensaios de perda ao fogo, massa específica, FRX, DRX, análise térmica e carbono total nas cinzas. Através dos ensaios efetuados, foi possível destacar entre as quatro caldeiras estudadas a que teve os melhores resultados em termos de combustão. A umidade do bagaço também teve destaque nos ensaios realizados, influenciando diretamente no processo de combustão das caldeiras. Foi apresentado sugestões de melhorias no processo visando melhorar a qualidade do bagaço como matéria prima na combustão.

**Palavras-chave:** Usinas sucroalcooleiras. Resíduos. Cinzas Bagaço de cana-de-açúcar. Reciclagem.



## **ABSTRACT**

Sugarcane mills play an important role in the Brazilian energy matrix and use the biomass resulting from sugarcane crushing in the form of bagasse that is used as an internal energy source, such as electric power and steam, in addition to cogeneration for the national grid. distribution of electricity. Ashes are residues resulting from the combustion of sugarcane bagasse that are deposited in storage tanks and are often used as fertilizer. Bagasse travels a short path until it feeds the boiler as fuel and if it does not have proper milling processing it can directly affect the quality of the combustion for steam generation. In this context, the main objective of this work was to evaluate the combustion process of sugarcane bagasse for the ashes generated at two sugarcane mills in the State of Goiás. The production processes and the ash generated were studied fire loss tests, specific mass, FRX, XRD, thermal analysis and total carbon in the ashes. Through the tests carried out, it was possible to highlight among the four boilers studied the one that had the best results in terms of combustion. The moisture of the bagasse was also highlighted in the tests carried out, directly influencing the combustion process of the boilers. Suggestions for improvements in the process were presented to improve the quality of the bagasse as a raw material in the combustion.

Key-words: Sugar and alcohol plants. Waste. Ashes Sugarcane bagasse. Recycling.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais opções de conversão de biomassa para transportadores secundários de energia .....	24
Figura 2 - Consumo mundial de energia comercializada por tipo de combustível - 1990 – 2030 .....	26
Figura 3 - Geração de energia elétrica mundial por fonte no ano de 2012 .....	26
Figura 4 - Difusor de CA instalado na Usina Guariroba - Grupo Bunge .....	28
Figura 5 - Descrição geral funcionamento do difusor .....	29
Figura 6 - Detalhamento dos principais componentes do difusor.....	29
Figura 7 - Terno de moenda.....	30
Figura 8 - Detalhamento do funcionamento e principais componentes do terno de moenda .....	31
Figura 9 - Disposição dos ternos de moenda.....	31
Figura 10 - Filtros rotativos de usina sucroalcooleira .....	32
Figura 11 - Detalhe do funcionamento do filtro rotativo com a retirada da torta de filtro.....	32
Figura 12 - Fluxograma básico do processo de produção sucroalcooleira e pontos que utilizam vapor .....	34
Figura 13 - Esquema simplificado de uma caldeira a vapor .....	34
Figura 14 – Componentes de uma caldeira .....	35
Figura 15 – Fluxograma de geração de vapor com cogeração .....	36
Figura 16 – Processo de moagem da CA através de moendas eletrificadas, que não utilizam mais turbinas à vapor .....	38
Figura 17 - Caldeira com grelhas <i>pin-hole</i> e dois tubulões, para combustão de resíduos sólidos.....	39
Figura 18 - Caldeira de LF borbulhante para combustão de resíduos sólidos .....	40
Figura 19 – Esquema de sistema de secagem com seus principais componentes...41	
Figura 20 - Vista frontal do secador na operação em Ingenio El Carmen, México....42	
Figura 21 – Composição morfológica das cinzas do bagaço de cana de açúcar: Componentes de partículas orgânicas (A), cenosferas com componentes de óxidos metálicos (B), cinzas volantes (C) e cinzas da caldeira (D).....	44
Figura 22 - Difração de raios x dos resíduos de cinza de BCA de CA .....	45

Figura 23 – EDS cinzas de CA no espectro do alumínio (A) e no espectro do ferro (B) com a demonstração da abundância relativa do elemento. ....	49
Figura 24 – Ciclo integrado para tecnologias sustentáveis agri-combustível- biomaterial-bioenergia .....	51
Figura 25 – Etapas desenvolvidas neste trabalho .....	53
Figura 26 - Localização geográfica das cinzas do BCA.....	55
Figura 27 – Limites do sistema de geração de cinzas do BCA da Usina 01.....	56
Figura 28 - Limites do sistema de geração de cinzas do BCA da Usina 02.....	57
Figura 29 - Lavador de gases de estágio único em contracorrente .....	58
Figura 30 - BCA armazenado para combustão nas caldeiras da Usina 02 .....	60
Figura 31 – Combustão do BCA para caracterização das cinzas.....	61
Figura 32 - Processo de combustão do BCA e tratamento das cinzas na Usina 01. 66	
Figura 33 - Processo de combustão do BCA e tratamento de cinzas na Usina 02... 67	
Figura 34 - Piscinas de decantação dos resíduos oriundos do lavador de gases .... 68	
Figura 35 - Difratoograma de raios x da amostra 16 sy= <b>CaCO<sub>3</sub></b> .....	81
Figura 36 - Difratoograma de raios x da amostra 15 .....	82
Figura 37 - Curva DTG para amostra nº 15.....	83
Figura 38 – Curva TG x DTG para amostra nº 15.....	84
Figura 39 - Curva TG para amostra nº 15.....	85
Figura 40 - Curva DTA para amostra nº 17 .....	86
Figura 41 – Curva TG x DTG para amostra nº 17.....	87
Figura 42 - Curva TG para amostra nº 17.....	88

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Oferta interna de energia (OIE).....	27
Tabela 2 - Relação entre tipos de caldeira com detalhes de funcionamento .....	37
Tabela 3 - Composição química dos resíduos de cinzas de BCA.....	46
Tabela 4 - Questionário realizado nas duas usinas.....	58
Tabela 5 - Demonstrativo das amostras analisadas.....	59
Tabela 6 - Resíduos gerados na região de Mineiros em Goiás, para Usina 01, com uma produção totalizando 5 milhões de toneladas de CA moída e 415 milhões de litros de etanol.....	69
Tabela 7 - Resíduos gerados na região de Mineiros em Goiás, para Usina 02, totalizando 2,7 milhões de toneladas de CA moída e 233,6 milhões de litros de etanol .....	69
Tabela 8 - Respostas ao questionário elaborado a Usina 01 .....	70
Tabela 9 - Respostas ao questionário elaborado a Usina 02.....	72
Tabela 10 - Valores de perda ao fogo.....	74
Tabela 11 - Valores de massa específica .....	75
Tabela 12 - Valores da fluorescência de raios x (FRX1) .....	76
Tabela 13 - Valores de fluorescência de raios x (FRX2) da amostra 17 .....	76
Tabela 14 - Valores de fluorescência de raios x (FRX2) da amostra nº 18.....	77
Tabela 15 - Valores fluorescência de raios x (FRX2) da amostra nº 15.....	78
Tabela 16 - Valores da fluorescência de raios x (FRX2) da amostra nº 16.....	79
Tabela 17 - Determinação de carbono total .....	89



## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
BCA	Bagaço de cana-de-açúcar
CA	Cana-de-açúcar
$C_6H_{12}O_6$	Glicose
$O_2$	Oxigênio
$CO_2$	Dióxido de carbono
$C_2H_5OH$	Etanol
Brix	Porcentagem em massa de sólidos solúveis contidos em uma solução de sacarose quimicamente pura
TG	Turbo-geradores
$H_2$	Hidrogênio
CO	Monóxido de carbono
$CH_4$	Metano
$K_2O$	Óxido de potássio
MgO	Óxido de magnésio
$P_2O_5$	Pentóxido de difósforo
CaO	Óxido de cálcio
pH	Potencial de hidrogênio
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
PVA	Matriz de álcool polivinílico
PP	Polipropileno isostático
LF	Leito fluidizado
ETALG	Estação de tratamento de água de lavagem de gases



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
1.1 OBJETIVOS .....	20
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>20</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>20</b>
1.2 JUSTIFICATIVA .....	20
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>23</b>
2.1 PROCESSAMENTO DA CANA DE AÇÚCAR PARA PRODUÇÃO DE ETANOL E AÇÚCAR .....	28
2.2 SISTEMAS DE SECAGEM DE RESÍDUOS (TORREFAÇÃO).....	40
2.3. CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS GERADAS .....	42
2.4 RECICLAGEM DE RESÍDUOS .....	47
<b>2.4.1. Construção civil</b> .....	<b>47</b>
<b>2.4.2. Utilização na agricultura</b> .....	<b>47</b>
<b>2.4.3. Cenosferas</b> .....	<b>48</b>
<b>2.4.4. Compósitos reforçados por cinzas</b> .....	<b>49</b>
<b>2.4.5. Adsorvente</b> .....	<b>50</b>
<b>2.4.6 Utilização de resíduos como bio-refinaria</b> .....	<b>51</b>
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>53</b>
3.1 ETAPA 1 – PROCESSO PRODUTIVO E AS CINZAS GERADAS .....	54
<b>3.1.1 Processo de produção da cana de açúcar e os resíduos gerados das Usinas 01 e 02</b> .....	<b>54</b>
<b>3.1.2 Localização geográfica das usinas estudadas</b> .....	<b>54</b>
<b>3.1.3 Limites do sistema estudado</b> .....	<b>55</b>
<b>3.1.4 Visita técnica às usinas</b> .....	<b>58</b>
3.2 ETAPA 2 - CARACTERIZAÇÃO DO BCA E CINZAS PARA VALORIZAÇÃO COMO COPRODUTO .....	59
<b>3.2.1 Amostragem de materiais</b> .....	<b>59</b>
<b>3.2.2 Teste de combustão do BCA em laboratório</b> .....	<b>60</b>
<b>3.2.3 Caracterização das amostras</b> .....	<b>61</b>
3.2.3.1 Massa específica.....	62
3.2.3.2 Perda ao fogo .....	62
3.2.3.3 Espectrometria de fluorescência de raios x – qualitativa (FRX1) .....	62

3.2.3.4 Espectrometria de fluorescência de raios x – Semiquantitativa (FRX2) .....	63
3.2.3.5 Carbono total .....	63
3.2.3.6 Difração de raios x .....	63
3.2.3.7 Caracterização térmica - Termogravimetria .....	64
<b>4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>65</b>
4.1 ETAPA 1 – PROCESSO PRODUTIVO E AS CINZAS GERADAS .....	65
<b>4.1.1 Levantamento de dados de produção, equipamentos e técnicas de combustão.....</b>	<b>65</b>
4.1.1.1 Usina 01 .....	65
4.1.1.2 Usina 02.....	66
<b>4.1.2 Gerenciamento dos resíduos gerados.....</b>	<b>68</b>
<b>4.1.3 Avaliação do processo de produção de etanol das empresas .....</b>	<b>70</b>
4.2 ETAPA 2 - CARACTERIZAÇÃO DO BCA E CINZAS PARA VALORIZAÇÃO COMO COPRODUTO .....	73
<b>4.2.1 Perda ao fogo .....</b>	<b>73</b>
<b>4.2.2 Massa específica.....</b>	<b>74</b>
<b>4.2.3 Fluorescência de raios x .....</b>	<b>75</b>
<b>4.2.4 Difração de raios x.....</b>	<b>80</b>
<b>4.3.5 Análise Térmica .....</b>	<b>83</b>
<b>4.3.6 Carbono Total.....</b>	<b>89</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>91</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>93</b>
<b>APÊNDICE A – RELATÓRIO TÉCNICO DE PRODUÇÃO .....</b>	<b>101</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As principais fontes de energia no mundo são os combustíveis fósseis como o petróleo, carvão e gás natural. Porém, estudos apontam que estas fontes de energia se esgotarão nos próximos 40-50 anos tomando como base o ano de 2011 (SAIDUR et al., 2011). Além disso, prejuízos ambientais como poluição urbana, aquecimento global e chuvas ácidas emitidas por essas fontes instigaram o mundo a tentar reduzir as emissões de carbono através de fontes alternativas de energia que sejam ambientalmente corretas, com baixas emissões poluidoras e com eficiência na utilização dos recursos. As fontes de energias renováveis como eólica, solar e a partir de biomassa atualmente são as menos prejudiciais do ponto de vista ambiental. A biomassa é definida como toda matéria orgânica, de origem animal ou vegetal capaz de ser transformada em energia (SAIDUR et al., 2011). No setor sucroalcooleiro, a fabricação de álcool e açúcar é realizada através da moagem da cana-de-açúcar que tem como resíduo o bagaço (biomassa), que é utilizado para gerar energia através da combustão em caldeira com utilização em turbo-geradores. O bagaço de cana-de-açúcar (BCA) atende às necessidades energéticas da própria produção sucroalcooleira como o excedente utilizado para vendas externas para rede nacional. Devido à quantidade gerada, as cinzas produzidas durante a combustão do BCA são resíduos que necessitam de uma destinação rápida e correta, e normalmente se tornam um problema para muitas usinas.

Segundo Bartolotto (2015), o ramo industrial está em constante desenvolvimento buscando o aumento da produtividade tanto no produto final quanto no processo, provocando assim um aumento no consumo de energia, de vapor e de fabricação de caldeiras de grande porte para suprir essa demanda. Um fator comum no plano estratégico do crescimento das empresas mundiais está no aumento da produção de vapor, por isso novas tecnologias que visem o aumento da produção do vapor e da eficiência das caldeiras são fundamentais para este setor industrial. Uma das formas de se aumentar o rendimento das caldeiras está na melhoria da qualidade do combustível visando uma redução de seu consumo (ANDRADE, 2014).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo a avaliação do processo de combustão do BCA para a valorização das cinzas geradas em duas usinas sucroalcooleiras no Estado de Goiás.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Comparar as características das cinzas do BCA após a combustão em processo industrial com uma cinza produzida em escala laboratorial;
- b) Propor melhorias para os processos de combustão para aumentar a eficiência destes processos e promover o potencial de valorização dessas cinzas;
- c) Propor potenciais rotas de reciclagem das cinzas geradas considerando os resultados de caracterização obtidos;
- d) Avaliar potenciais rotas de reciclagem das cinzas geradas considerando os resultados de caracterização obtidos.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Usinas do setor sucroalcooleiro têm como principais objetivos a construção de indicadores de produtividade ligados à quantidade de álcool, açúcar e geração de energia e muitas vezes não valorizam a eficiência do processo produtivo. Um exemplo disso é o BCA utilizado como combustível na caldeira. Após a CA ser moída na moega para extrair o líquido em que se gera o bagaço, ele é transportado para a caldeira muitas vezes sem um tratamento prévio para reduzir sua umidade, contribuindo para uma baixa eficiência na sua combustão e, conseqüentemente, na geração de vapor. É fundamental a melhoria da qualidade do BCA para a combustão tornando o processo mais eficiente, em que ações de produção e tecnologias mais limpas podem ser aplicadas, como a diminuição de sua umidade entre outras melhorias.

Toda a cadeia produtiva do setor sucroalcooleiro gera resíduos que necessitam tratamentos específicos atendendo regras ambientais estabelecidas por órgãos competentes que regularizam o setor.

A qualidade do resíduo gerado na extração do caldo, que é o BCA, está diretamente ligada à eficiência na geração de vapor e conseqüentemente à produção de cinzas com qualidade.

As cinzas quando geradas com qualidade têm seu aproveitamento valorizado em termos de possibilidade de utilização em outros segmentos industriais. Soluções de utilização dessas cinzas são necessárias para reduzir o impacto causado pela quantidade gerada e pela agressão que a mesma pode causar para o meio ambiente se disposta de forma inadequada, ou seja, diretamente no solo.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

De acordo com Klason (2006), a combustão é uma das maiores descobertas feitas pelo homem e um dos alicerces em que a sociedade moderna é dependente. A máquina a vapor, que historicamente desempenhou um papel importante na industrialização só foi possível ser inventada devido aos processos de combustão.

Os principais processos industriais de hoje utilizam sistemas de vapor. As indústrias dos EUA produzem vapor através da combustão de 37% de todo o combustível fóssil utilizado (EINSTEIN, et al., 2009).

As principais aplicações do vapor produzido estão nos processos de aquecimento, concentração e destilação de líquidos ou utilização direta como matéria-prima. Consumo elevado de combustíveis fósseis para produção de vapor tem sido realidade para os grandes consumidores de energia no âmbito industrial, nos quais são destacados a seguinte relação considerando energia fóssil: 57% para processamento de alimentos, 81% para celulose e papel, 42% para produtos químicos, 23% para o refino de petróleo e 10% para metais primários (EINSTEIN, et al., 2009), proporções estas que têm se mantido na atual década.

Segundo Brasil (2011), biomassa é toda matéria orgânica não fóssil, de origem animal ou vegetal, que pode ser utilizada na produção de calor, seja para uso térmico industrial, seja para geração de eletricidade e/ou que pode ser transformada em outras formas de energias sólidas (carvão vegetal, briquetes), líquidas (etanol, biodiesel) e gasosas (biogás a partir de resíduo sólido urbano).

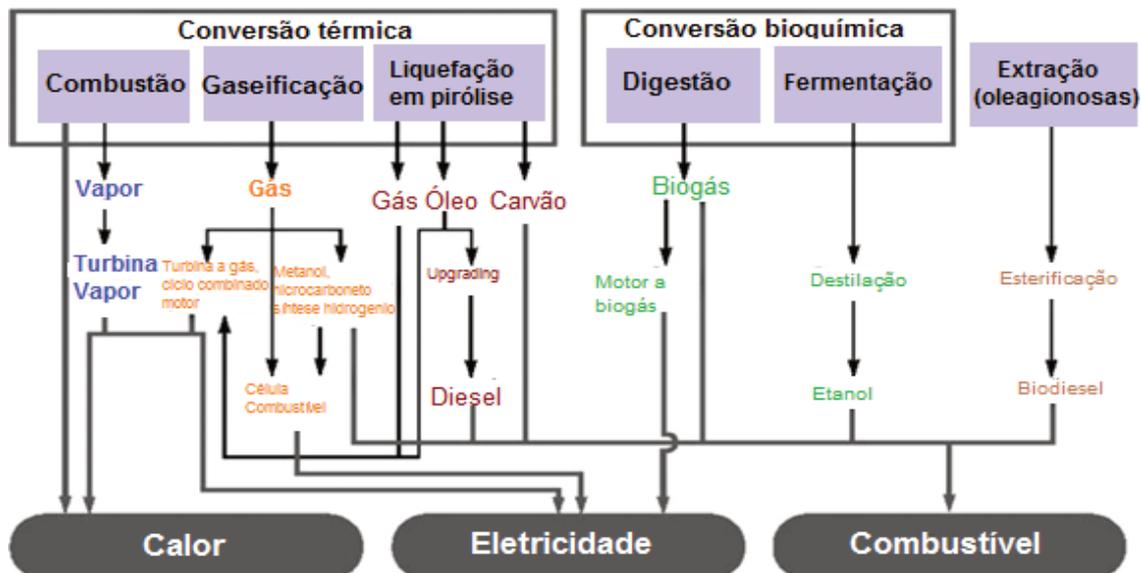
A biomassa é considerada uma das fontes de energia mais importantes nestas primeiras décadas do século 21 principalmente em zonas rurais, sendo muitas vezes a única fonte existente. Comparadas com tecnologias renováveis como a solar e eólica, a biomassa se destaca pela ausência de problemas de armazenamento, ou seja, a energia poderá ser gerada a qualquer momento pois tem estoque para tal. A biomassa pode ser utilizada como combustível na produção de biogás, combustíveis líquidos e eletricidade. A biomassa é considerada uma fonte de energia renovável pois sempre existirá colheita, crescimentos de plantas, fazendo com que seus suprimentos sejam ilimitados, tendo nos resíduos potenciais sub ou coprodutos. (AIE, 2017).

As biomassas com potencial para serem utilizadas como combustível compreendem um grupo de diferentes espécies vivas, como madeira, capim, palha, BCA, talos, resíduos alimentares e agrícolas, etc. Os materiais pertencentes à

categoria de biomassa possuem como origem o processo fotossintético. Uma reação entre a água e o dióxido de carbono acontece no processo fotossintético, esses dois componentes reagem entre si para formar glicose ( $C_6H_{12}O_6$ ) e oxigênio. As plantas e bactérias utilizam a glicose como “alimento” deixando o oxigênio sem utilização. A energia necessária para executar essa reação é gerada a partir da luz solar que é absorvida através da clorofila pelas folhas das plantas. Com relação ao  $CO_2$ , a mesma quantidade que a planta absorve durante o crescimento, é cedida com a morte da planta através de sua decomposição ou queima. Por esse motivo, a biomassa é classificada como neutra em  $CO_2$ , ou seja, o nível de  $CO_2$  não aumenta nem diminui seu teor na atmosfera. (KLASON, 2006).

Existem vários processos onde a biomassa pode ser convertida em combustível. A escolha do melhor processo levará em conta o tipo e a quantidade de biomassa disponível, o consumidor de energia desejado, as normas ambientais e outros fatores. (ABBASI; ABBASI, 2010). Grande quantidade de combustíveis líquidos e gasosos podem ser obtidos através de diferentes tipos de biomassa, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Principais opções de conversão de biomassa para transportadores secundários de energia



Fonte: Adaptado de Caputo et al. (2005), Faaij (2006) e Balat et al. (2009).

A utilização de fontes renováveis e não renováveis atualmente é assunto discutível na comunidade científica e econômica mundial. A transformação dos elementos constituintes no combustível em calor, através da presença de oxigênio, é definida como combustão, que é a transformação de energia química em calor.

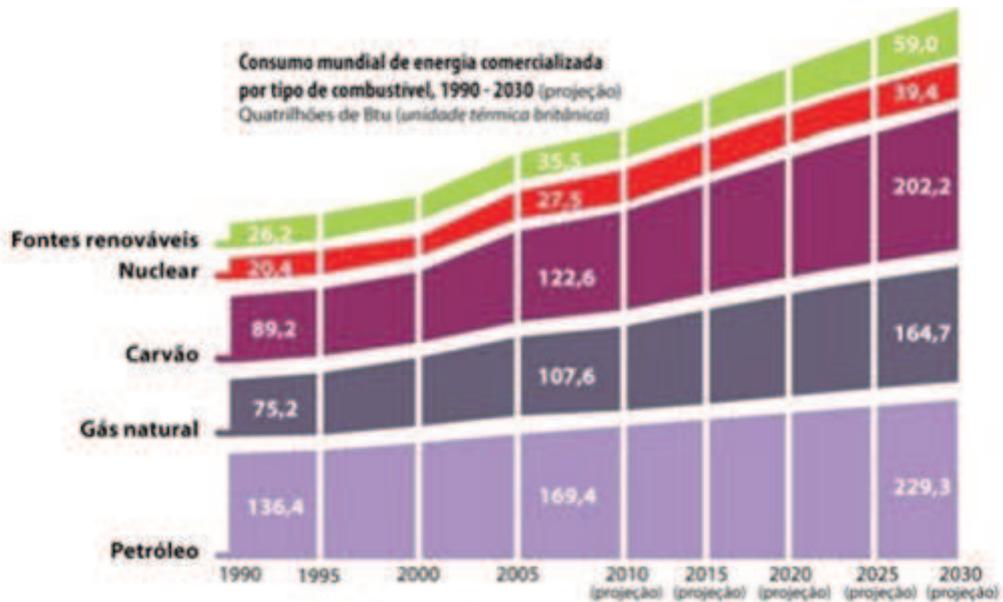
Na gaseificação, o combustível sólido é convertido em gasoso através do controle da presença de oxigênio, em valores abaixo de condições estequiométricas (mínimo teórico para combustão), podendo ser utilizado para geração de calor como eletricidade. (ANEEL, 2018).

Na liquefação em pirólise, a transformação da biomassa em combustíveis majoritariamente líquidos, pode ser de forma direta ou indireta, sendo que na indireta é produzido o gás de síntese. A pirólise também é utilizada para aproveitamento de resíduos vegetais que são compactados e transformados em briquetes, que possuem maiores teores de carbono e poder calorífico, que podem ser utilizados com maior eficiência na geração de calor e potência. (BIOMASSABR, 2018).

A conversão química da biomassa em energia utiliza processos químicos diferentes, fazendo uso de enzimas de bactérias e outros micro-organismos na reação com a biomassa através de processos como a digestão anaeróbica e fermentação. A reação entre um ácido graxo livre e um álcool de cadeia curta (metanol ou etanol), na presença de um catalizador para formação de ésteres, é chamada de esterificação, que é uma das rotas promissoras de obtenção do biodiesel. (ARANDA, 2009).

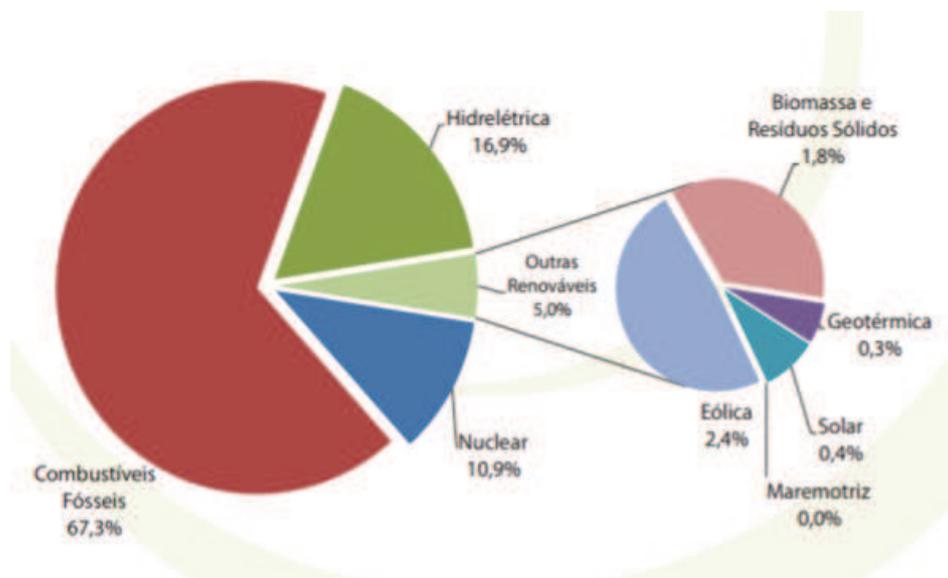
O uso de energias renováveis é um dos objetivos na Conferência das Nações Unidas sobre o desenvolvimento sustentável. A energia é um dos principais fatores que pode definir o sucesso ou fracasso de projetos relacionados ao futuro sustentável, inclusive assuntos relacionados ao aquecimento global e catástrofes climáticas. (GEA, 2012). Apesar das principais fontes de energia: petróleo, gás natural e carvão continuarem a ser as mais comercializadas apresentando uma taxa de crescimento aparentemente maior que as fontes renováveis, verifica-se que as fontes de energias renováveis possuem um aumento na comercialização ultrapassando as fontes de origem nuclear (Figura 2). Várias fontes de energia renovável se destacam no panorama mundial, a biomassa está situada entre as duas principais fontes, em primeiro lugar nesse ranking está a energia eólica (Figura 3).

Figura 2 - Consumo mundial de energia comercializada por tipo de combustível - 1990 – 2030



Fonte: ANP (2016) apud CARRIM (2016).

Figura 3 - Geração de energia elétrica mundial por fonte no ano de 2012



Fonte: EPE (2016).

A oferta de energia de combustíveis não renováveis no Brasil teve um decréscimo entre os anos de 2014 e 2015 na ordem de 4,9%. O petróleo e derivados, gás natural, urânio (U308) e derivados contribuíram para essa diminuição. Já a oferta

de energia de combustíveis renováveis teve um acréscimo de 2,3% no mesmo período, em que os derivados da BCA e outras combustíveis renováveis tiveram uma contribuição para o aumento da energia renovável. No Brasil, a oferta interna de energia através de fontes renováveis teve um aumento de 1,8%, com participação de 41,2% no ano de 2015 com relação ao ano de 2014 que foi de 39,4%, conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Oferta interna de energia (OIE)

ESPECIFICAÇÃO	mil tep		15/14 %	Estrutura %	
	2014	2015		2014	2015
<b>NÃO-RENOVÁVEL</b>	<b>185.070</b>	<b>175.957</b>	<b>-4,9</b>	<b>60,6</b>	<b>58,8</b>
<i>PETRÓLEO E DERIVADOS</i>	<i>120.327</i>	<i>111.626</i>	<i>-7,2</i>	<i>39,4</i>	<i>37,3</i>
<i>GÁS NATURAL</i>	<i>41.373</i>	<i>40.971</i>	<i>-1,0</i>	<i>13,5</i>	<i>13,7</i>
<i>CARVÃO MINERAL E DERIVADOS</i>	<i>17.521</i>	<i>17.675</i>	<i>0,9</i>	<i>5,7</i>	<i>5,9</i>
<i>URÂNIO (U308) E DERIVADOS</i>	<i>4.036</i>	<i>3.855</i>	<i>-4,5</i>	<i>1,3</i>	<i>1,3</i>
<i>OUTRAS NÃO-RENOVÁVEIS(*)</i>	<i>1.814</i>	<i>1.830</i>	<i>0,9</i>	<i>0,6</i>	<i>0,6</i>
<b>RENOVÁVEL</b>	<b>120.446</b>	<b>123.255</b>	<b>2,3</b>	<b>39,4</b>	<b>41,2</b>
<i>HIDRÁULICA E ELETRICIDADE</i>	<i>35.019</i>	<i>33.897</i>	<i>-3,2</i>	<i>11,5</i>	<i>11,3</i>
<i>LENHA E CARVÃO VEGETAL</i>	<i>24.936</i>	<i>24.519</i>	<i>-1,7</i>	<i>8,2</i>	<i>8,2</i>
<i>DERIVADOS DA CANA-DE-AÇÚCAR</i>	<i>48.128</i>	<i>50.648</i>	<i>5,2</i>	<i>15,8</i>	<i>16,9</i>
<i>OUTRAS RENOVÁVEIS</i>	<i>12.363</i>	<i>14.191</i>	<i>14,8</i>	<i>4,0</i>	<i>4,7</i>
<b>TOTAL</b>	<b>305.516</b>	<b>299.211</b>	<b>-2,1</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
<i>dos quais fósseis</i>	<i>181.034</i>	<i>172.101</i>	<i>-4,9</i>	<i>59,3</i>	<i>57,5</i>

(\*) Gás industrial de alto forno, aciana, coqueria, enxofre e de refinaria.

Fonte: Energia (2016).

No Brasil, uma das fontes renováveis para geração de energia elétrica é a cogeração de energia através da combustão da biomassa do BCA. A cogeração de energia é uma forma de obter simultaneamente e de maneira sequencial duas ou mais fontes de energia somente com um combustível, sendo o processo mais comum a produção de eletricidade e energia térmica através do biogás ou biomassa. (COGEN, 2017). O BCA é um resíduo fibroso produzido através do esmagamento da CA para produção de açúcar e álcool e se encontra amplamente disponível nas indústrias para o processamento da CA. (CARDONA et al., 2010). Segundo a Única (2017), o Brasil produziu na safra de 2014/15 um total de 632 milhões de toneladas de CA gerando um total de 2,528 milhões de toneladas de BCA. Devido seu alto teor de fibra, ele é utilizado nas indústrias brasileiras sucroalcooleiras como combustível para geração de vapor e energia, para o processamento interno em sistemas combinados de energia e calor. (LORA et al., 2009). Nas usinas sucroalcooleiras, cerca de 98% da necessidade energética interna é utilizada através da combustão do BCA, fornecendo

energia elétrica, térmica e mecânica para a produção de açúcar e álcool. (RAI et al., 2011).

## 2.1 PROCESSAMENTO DA CANA DE AÇÚCAR PARA PRODUÇÃO DE ETANOL E AÇÚCAR

A produção de etanol, açúcar e energia elétrica inicia na lavoura com a plantação da CA. O canavial possui variedades de plantas que são planejadas para atenderem a produção na indústria em todo o período da safra. Elas são classificadas em precoce, média e tardia, com seu tempo de colheita variando entre 12, 14 e 16 meses, respectivamente.

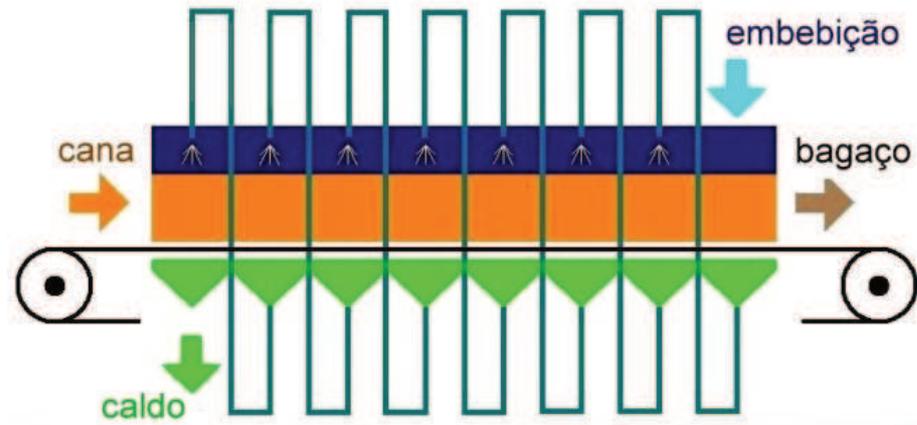
A colheita é feita através de colhedoras e transportadas por caminhões canavieiros até a indústria. Na usina a CA é tombada em mesas alimentadoras e transportadas por esteiras passando pelo preparo da CA, onde ela é picotada e desfibrada sendo preparado para a extração. A extração do caldo da CA é feita através de difusores (Figuras 4 e 5) e moenda (Figura 8). No difusor, as células da CA embebidas na água, age como membranas semipermeáveis, sendo a sacarose extraída pelo escoamento de fluido através de um terno de moenda, separando caldo e BCA. Na Figura 6 é possível visualizar um esquema de funcionamento do difusor. A esteira metálica entrando no difusor com a CA vinda do preparo, os jatos de água em contato com a CA e o sentido em que o caldo é direcionado.

Figura 4 - Difusor de CA instalado na Usina Guariroba - Grupo Bunge



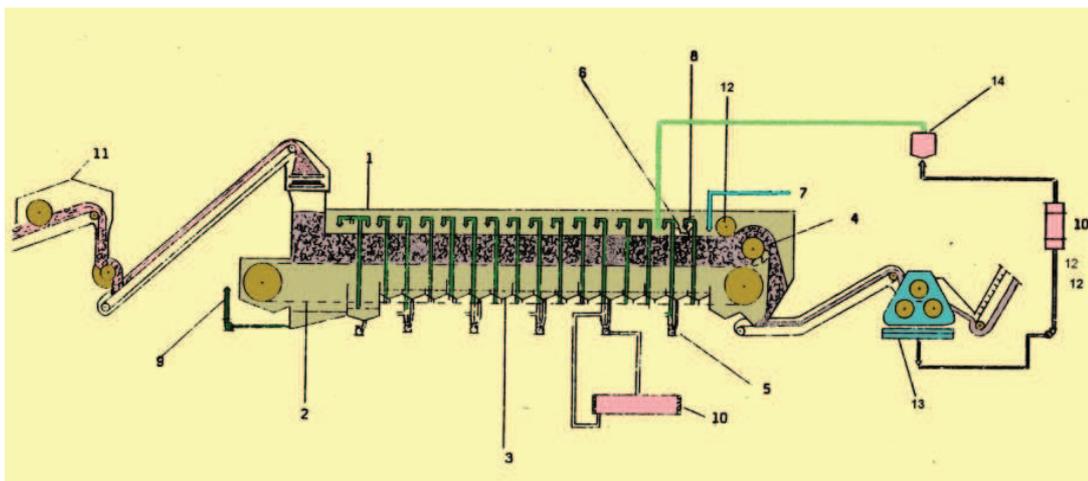
Fonte: Sermatec (2018).

Figura 5 - Descrição geral funcionamento do difusor



Fonte: Sermatec (2018).

Figura 6 - Detalhamento dos principais componentes do difusor



Fonte: USP (2018).

No item 11 da Figura 6 a CA é desfibrada e desintegrada sendo preparada para o difusor, a esteira do item 2 é composta por uma cinta metálica perfurada, por onde o colchão de CA formado percorre todo o difusor em contato com a água. No item 3 está localizado os compartimentos individuais, por onde o sistema de embebição percorre em sentido contrário ao movimento da esteira, sendo responsável por ajudar a retirar a maior quantidade de caldo da CA. No item 4 está o raspador rotativo, responsável por retirar o BCA da esteira metálica. As bombas centrífugas são responsáveis movimentar o sistema de embebição, item 5. A entrada de água é realizada no final da esteira, item 7. A circulação de água doce através do sistema de embebição é mostra no item 8. A saída do caldo é realizada no início do difusor demonstrado através do item 9. Ao sair do difusor, o BCA passa por um terno de

secagem, onde é extraído novamente a maior quantidade de caldo presente na composição, item 13.

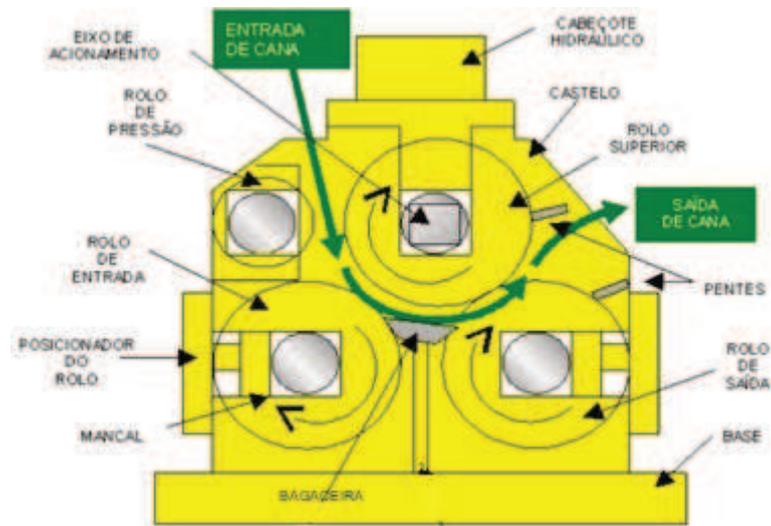
Na moenda, o colchão de CA é esmagado em ternos de moenda, cuja função é extrair o máximo de caldo possível da CA, tendo como resíduo o BCA que é aproveitado para gerar vapor através da combustão em caldeiras. A figura 7 mostra os principais componentes de um terno de moenda. O eixo de acionamento é o eixo onde a CA é recebida no terno que juntamente com o rolo de pressão inicia o esmagamento. O rolo de entrada continua o processo de esmagamento e direciona o caldo e BCA para o próximo conjunto de rolos. Entre os rolos de entrada e saída existe a bagaceira, responsável pelo direcionamento de caldo e BCA para a última etapa no terno de moenda. Os rolos de saída e de entrada são responsáveis pelo último processo de esmagamento da CA no terno (Brumazi, 2018). Esse processo de esmagamento nos ternos é repetido algumas vezes, dependendo da capacidade de moagem. Normalmente varia entre 4 a 6 ternos conforme Figura 10 .

Figura 7 - Terno de moenda



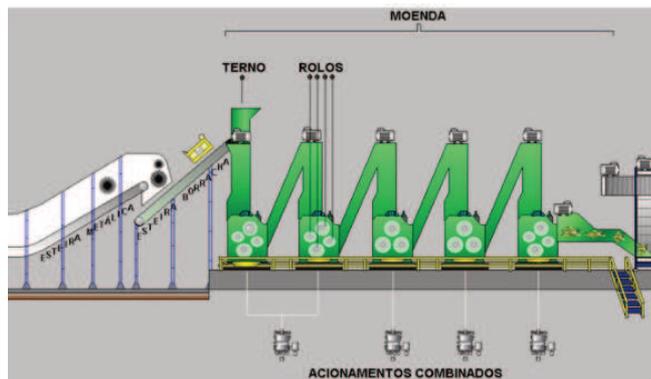
Fonte: Brumazi (2018).

Figura 8 - Detalhamento do funcionamento e principais componentes do terno de moenda



Fonte: USP (2018).

Figura 9 - Disposição dos ternos de moenda



Fonte: Smar (2018).

A próxima etapa do processo é no tratamento de caldo, onde é realizado a concentração do caldo bruto através da retirada parcial de água contida na CA, além da retirada de impurezas contidas no caldo através do decantador. A concentração é realizada em aquecedores que utilizam vapor para realizar a troca térmica com o caldo provocando sua evaporação. As impurezas retiradas nessa etapa são chamadas de torta de filtro e utilizadas como fertilizantes na lavoura. A torta de filtro oriunda do decantador é enviado ao filtro rotativo (Figura 10 e 11) e tem como objetivo retirar o açúcar residual (Figura 12).

Figura 10 - Filtros rotativos de usina sucroalcooleira



Fonte: Megem (2018).

Figura 11 - Detalhe do funcionamento do filtro rotativo com a retirada da torta de filtro



Fonte: Megem (2018).

Após a realização do tratamento, o caldo é enviado para duas etapas seguintes: a destilaria e fabricação de açúcar.

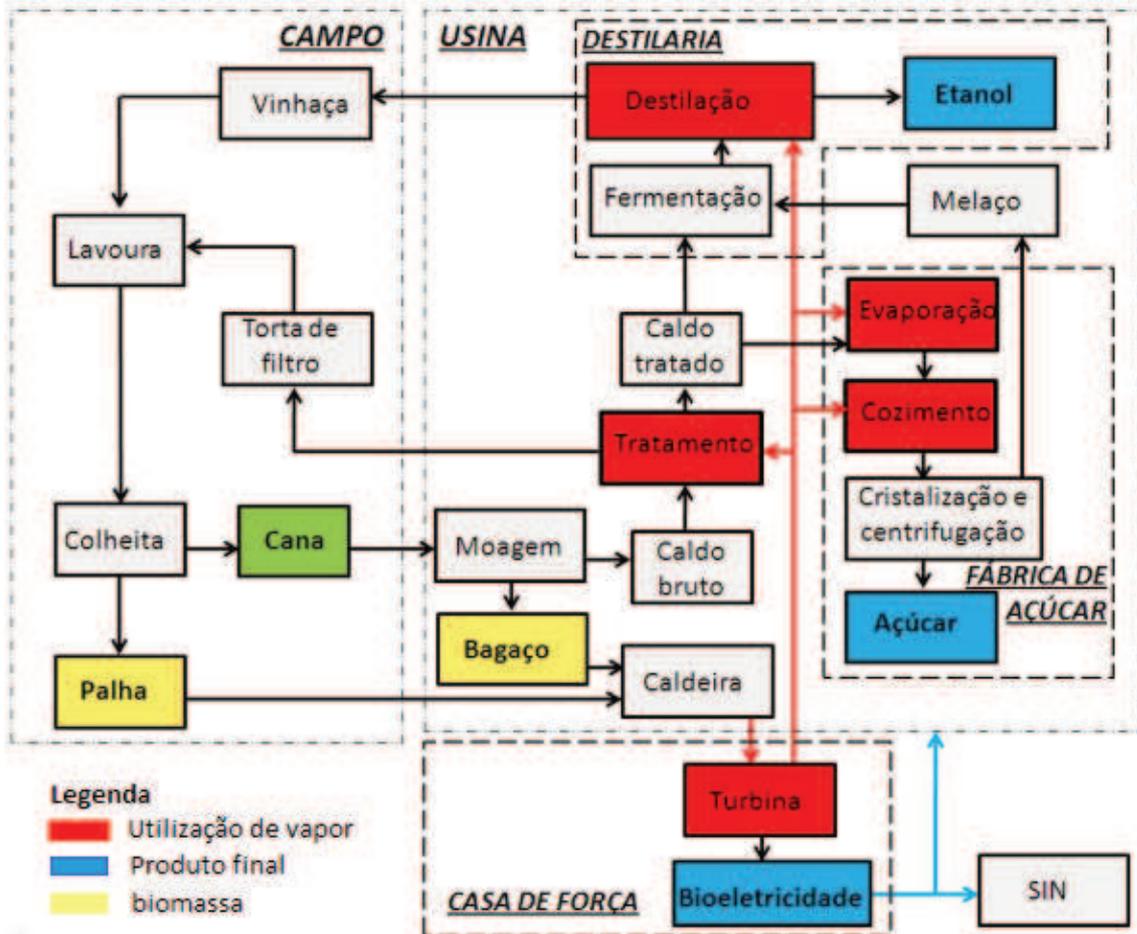
Na destilaria o caldo tratado recebe micro-organismos (levedura *Saccharomyces cerevisia*) que irão realizar a fermentação. Essa técnica consiste na

quebra de moléculas de açúcar ( $C_6H_{12}O_6$ ) transformando em duas moléculas de etanol ( $2C_2H_5OH$ ) mais duas moléculas de gás carbônico ( $2CO_2$ ). O resultado do processo de fermentação é o vinho fermentado, que contém leveduras, açúcar não fermentado e 10% de etanol. A retirada do etanol presente no vinho fermentado é feita nas colunas de destilação, onde o vinho é aquecido até evaporar (vapores alcoólicos). O restante do vinho destilado para obtenção do etanol, denominado vinhaça, representa praticamente 90% desta mistura e é destinado à lavoura como fertilizante. A vinhaça é utilizada na irrigação das lavouras de CA. Na fábrica de açúcar o xarope oriundo do tratamento de caldo é concentrado novamente através da troca térmica em cozedores que utilizam vapor para recuperar de 80 a 85% da sacarose presente no xarope concentrado com aproximadamente 65º brix, que é a porcentagem de sólidos solúveis visando o processo de cristalização. Após o cozimento, a massa passa por um processo de separação física (centrifugação) e é lavada com água quente e vapor, a seguir é encaminhada para secadores, que retiram a umidade do açúcar como última etapa de fabricação. As turbinas são movimentadas através do vapor gerado nas caldeiras tendo como combustível o BCA da CA e através de turbo-geradores (TG) produzem energia tanto para consumo no processo interno como para venda externa. (NOVACANA, 2017).

O processo de combustão do BCA para aproveitamento energético tanto no processo de produção de açúcar e álcool como para cogeração de energia é realizado através de caldeiras. Segundo Botelho (2011), caldeira é o equipamento que utiliza a energia química através da combustão da biomassa transferindo calor para a água que se converte em vapor.

Para realizar o processamento da CA na fabricação de açúcar, álcool e geração de energia, vários pontos no processo utilizam vapor. A Figura 12 destaca principais pontos (quadros na cor vermelha), o tratamento de caldo, fábrica de açúcar, destilaria e geração de energia, além dos pontos onde é utilizada a biomassa e os produtos finais.

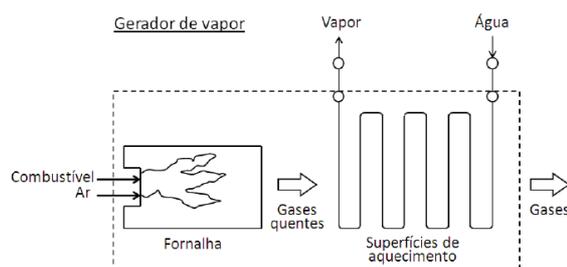
Figura 12 - Fluxograma básico do processo de produção sucroalcooleira e pontos que utilizam vapor



Fonte: Única (2017).

As Figuras 13 e 14 apresentam esquemas simplificados de caldeira a vapor, destacando dois componentes principais: a fornalha (local onde acontece a combustão) e a troca térmica entre os gases e a água, através da superfície da tubulação.

Figura 13 - Esquema simplificado de uma caldeira a vapor

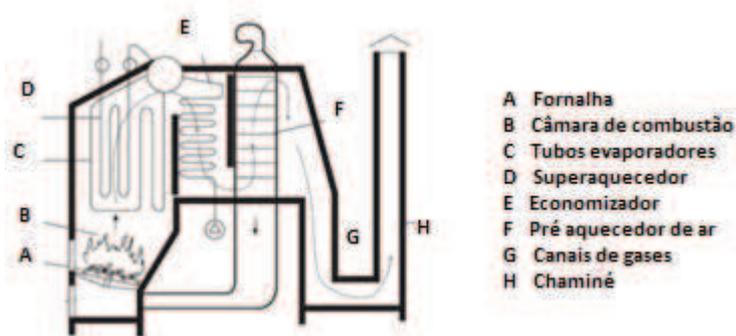


Fonte: Lora et al. (2004).

Segundo Stuchi et al. (2015), os principais componentes de uma caldeira são:

- a) Fornalha: região da caldeira aonde ocorre a transferência de calor para a câmara de combustão;
- b) Câmara de combustão: local aonde o calor gerado pela fornalha propicia a combustão da biomassa;
- c) Tubos evaporadores: responsáveis pela transformação da fase líquida da água para vapor;
- d) Superaquecedor: região onde o vapor é superaquecido no interior dos tubos;
- e) Economizador: trocador de calor responsável por elevar a temperatura da água antes de entrar nos tubos evaporadores;
- f) Pré aquecedor de ar: consiste na elevação da temperatura do ar para a fornalha;
- g) Canais de gases: região onde os gases gerados pela combustão são encaminhados para descarte
- h) Chaminé: responsável pelo descarte dos gases na atmosfera.

Figura 14 – Componentes de uma caldeira

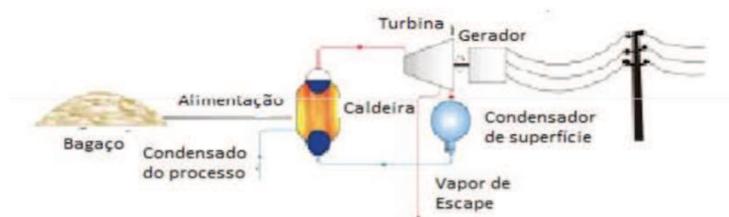


Fonte: Lora, et al. (2004).

A caldeira a vapor tem como vantagem o atendimento de cargas flutuantes de vapor no processo, provendo repentinas altas de demanda de vapor além de ter fácil construção, custo baixo, com estruturas robustas e pouca alvenaria. (FOGLIATO et al., 2009). Na década de oitenta (século 20), o BCA era visto como algo indesejado, pois a combustão era realizada em caldeiras ineficientes, com baixa pressão, porém hoje, com o avanço da tecnologia e a necessidade de melhoria na produtividade, existem muitas caldeiras de alta pressão que atendem na sua totalidade a demanda

interna de energia para produção de açúcar e álcool da indústria (Figura 15) além de comercializar o excedente para a rede de distribuição. (GOLDEMBERG et al., 2008).

Figura 15 – Fluxograma de geração de vapor com cogeração



Fonte: Baptista (2016).

Segundo Santos (2012), as caldeiras estão relacionadas obedecendo as seguintes regras apresentadas na Tabela 2. As principais aplicações estão relacionadas com o tipo de equipamento que podem ser as centrais termelétricas, as de uso industrial e a de propulsão naval. Com relação à disposição dos gases e do fluido de trabalho temos as caldeiras flamotubulares ou piro-tubulares, onde os gases fluem no interior dos tubos imersos em água e a água circula no interior dos tubos trocando calor pela superfície com os gases, respectivamente. Segundo a disposição relativa dos gases e do fluido de trabalho tem-se: a circulação natural, onde a circulação do fluido de trabalho é realizada pela diferença de densidade entre a água e a mistura de vapor de água. No caso da circulação forçada é utilizada pelas bombas de circulação. As bombas de passe único são bombas de circulação que forçam a passagem da água pelos tubos somente uma vez. Para o critério de tipo de combustível ou fonte de calor tem-se as caldeiras para sólidos, líquidos e gasosos, onde nos sólidos são utilizados combustíveis como biomassa, carvão mineral, resíduos urbanos, etc. Os tipos líquidos são os óleos combustíveis, e no caso do tipo gasoso são: gás natural, gás de processo e gás residual. Relacionando o critério como processo de combustão temos as caldeiras de grelha fixa ou rotativa, queima em suspensão e leito fluidizado. As caldeiras de grelha fixa ou rotativa são próprias para queima de biomassa ou resíduos industriais, as caldeiras de queima em suspensão são utilizadas para combustível sólido pulverizado além de óleo combustível e gás natural. As caldeiras de leito fluidizado (LF) podem utilizar combustíveis sólidos em geral.

Tabela 2 - Relação entre tipos de caldeira com detalhes de funcionamento

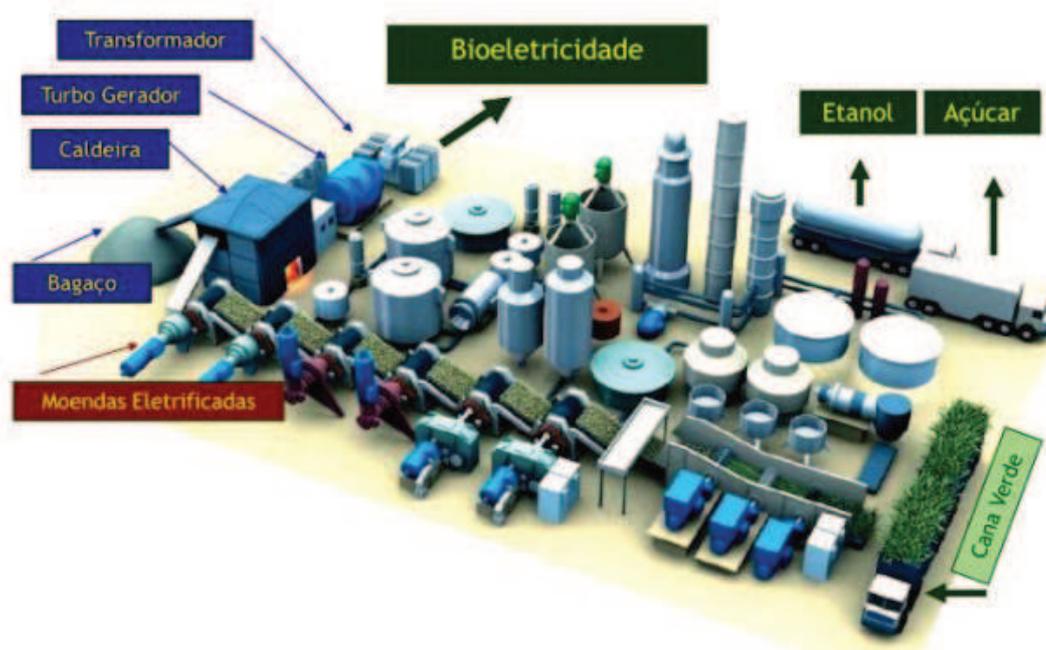
<b>Critério</b>	<b>Tipo</b>	<b>Sistema</b>
Aplicação principal	Centrais termelétricas	
	Uso industrial	
	Propulsão naval	
Disposição relativa dos gases e do fluido de trabalho	Caldeiras flamotubulares ou piro-tubulares	Os gases fluem no interior dos tubos imersos em água
	Caldeiras aquatubulares	A água circula no interior dos tubos trocando calor pela superfície com os gases
Força motriz para a circulação do fluido de trabalho	Circulação natural	Circulação do fluido de trabalho pela diferença de densidade entre a água líquida e a mistura vapor de água
	Circulação forçada	Utilização de bombas de circulação
	Passe único	Bomba de circulação força a passagem da água pelos tubos somente uma vez
Nível de pressão de operação	Classificada em baixa, média, alta, super alta e crítica	
Tipo de combustível ou fonte de calor	Sólidos	Biomassa, carvão mineral, resíduos urbanos, etc
	Líquidos	Óleos combustíveis
	Gasosos	Gás natural, gás de processo e gás residual
Processo de combustão	Grelha fixa ou rotativa	Próprio para queima de biomassas ou resíduos industriais
	Queima em suspensão	Para combustível sólido pulverizado, óleo combustível e gás natural
	LF	Para queima de combustíveis sólidos em geral
Organização de tiragem de ar e gases de combustão	Tiragem natural	Exercida exclusivamente pela chaminé. Típicas de caldeiras antigas e de chaminé
	Tiragem forçada	Exercida por sopradores que pressurizam o ar
	Tiragem induzida	Realizada por ventiladores de exaustão, gerando uma pressão ligeiramente negativa no interior da fornalha
	Tiragem balanceada	Uma combinação de tiragem forçada com a tiragem induzida
Disposição da fornalha e superfície de aquecimento	Pode ser de diversos tipos como, por exemplo, em forma de $\Pi$ , forma de T, em forma de U ou em forma de torre	

Fonte: Adaptado de Santos (2012).

A relação entre a quantidade de CA processada e o consumo de vapor no processo varia muito em termos da modernidade de equipamentos, tipo de produto

gerado (álcool ou açúcar) e tipo de sistema de acionamento de moendas que pode ser eletrificada ou por acionamento com turbina a vapor. Com relação à potência gerada, o tipo de turbina também influencia a quantidade de vapor consumido. O vapor era o meio de utilização para acionar o preparo da CA e moagem através do acionamento de turbinas, esse sistema foi muito utilizado nos anos 80. Foi substituído gradativamente por motores elétricos (Figura 16), com o objetivo de aumentar a eficiência energética industrial, tendo uma relação direta com o consumo de vapor e energia elétrica. (SANTOS, 2012).

Figura 16 – Processo de moagem da CA através de moendas eletrificadas, que não utilizam mais turbinas à vapor

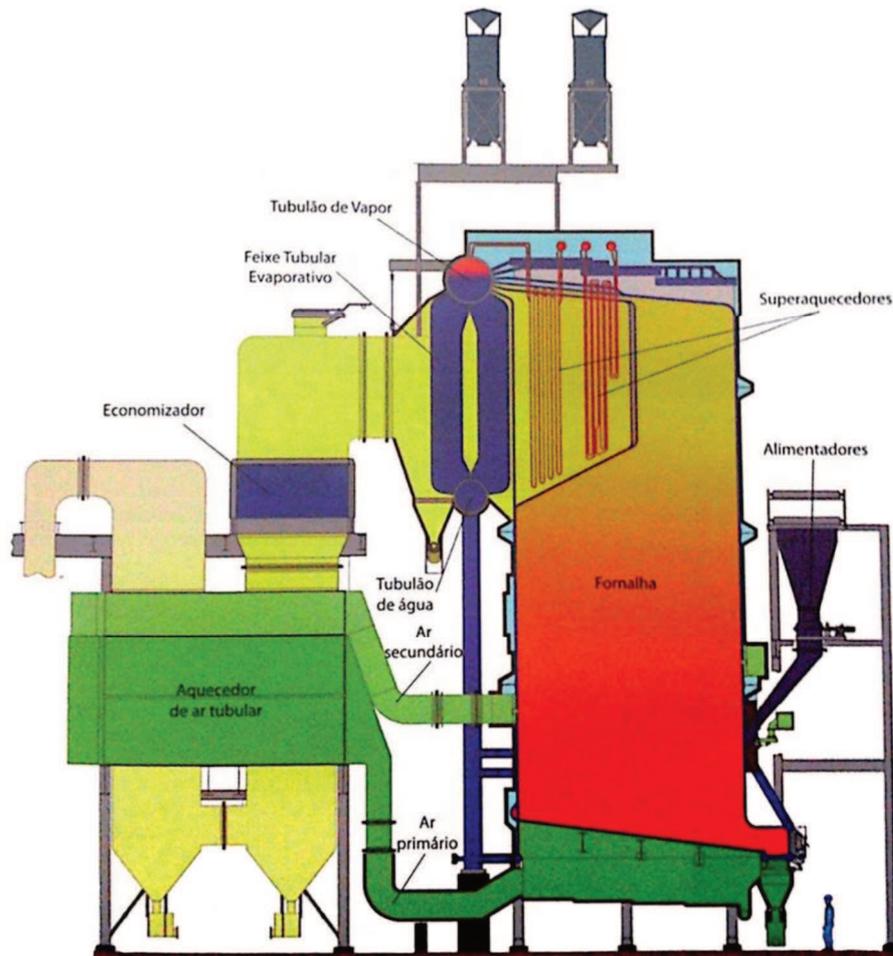


Fonte: COGEN (2017).

Os principais tipos de tecnologia que são utilizados nas usinas para a combustão do BCA de CA são os que utilizam sistemas com grelhas *pin-hole* (Figura 17) e sistemas de LF (Figura 18). (RODRIGUES, 2014).

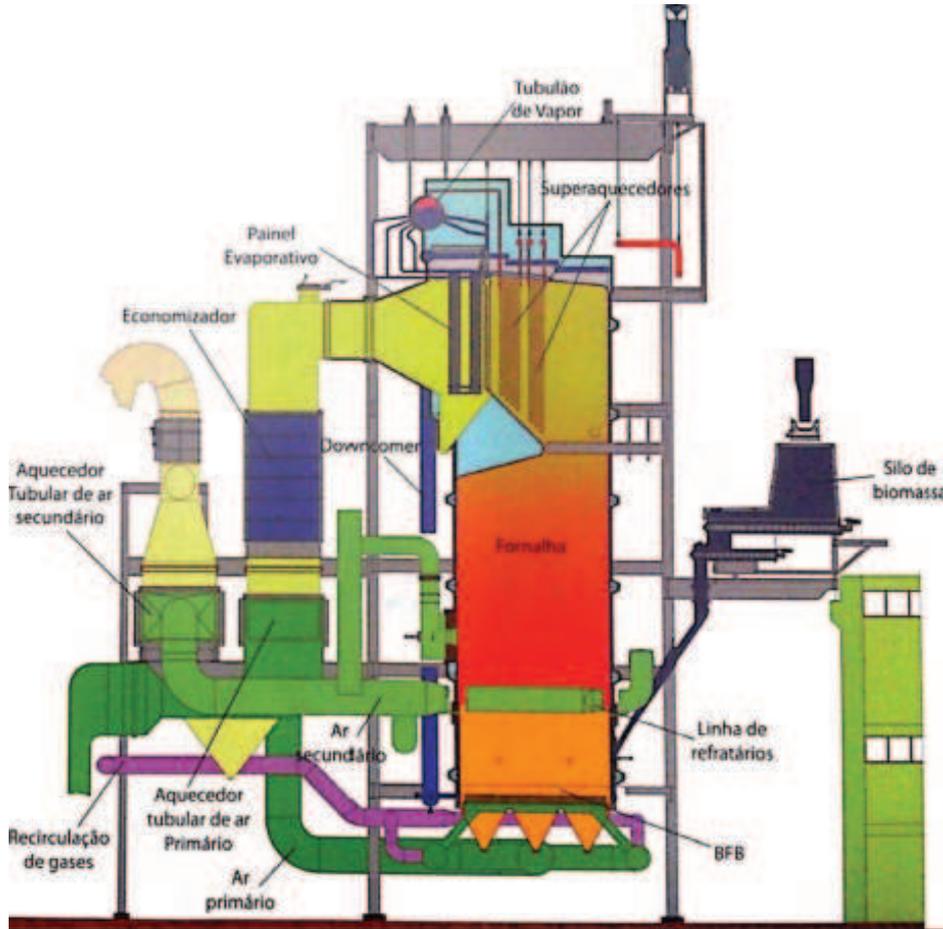
A caldeira com sistema de grelhas *pin-hole* é considerada a melhor alternativa para coeração, pois a limpeza das cinzas acontece sem modificar variáveis de vazão e pressão do vapor produzido, além de não possuir parte móveis, que contribuem para uma diminuição nos custos de manutenção. (CALDEMA, 2018).

Figura 17 - Caldeira com grelhas *pin-hole* e dois tubulões, para combustão de resíduos sólidos



Fonte: Hpbenergia (2018).

Figura 18 - Caldeira de LF borbulhante para combustão de resíduos sólidos



Fonte: Hpbenergia (2018).

A combustão na caldeira de LF é caracterizada pela injeção do BCA de CA em um leito de areia, local onde permanece até a combustão de grande parte do BCA tendo como eficiência valores acima de 99%. O controle da temperatura na faixa de 850°C e as baixas emissões de particulados na atmosfera são algumas das vantagens da utilização desta tecnologia. (SERMATEC, 2018).

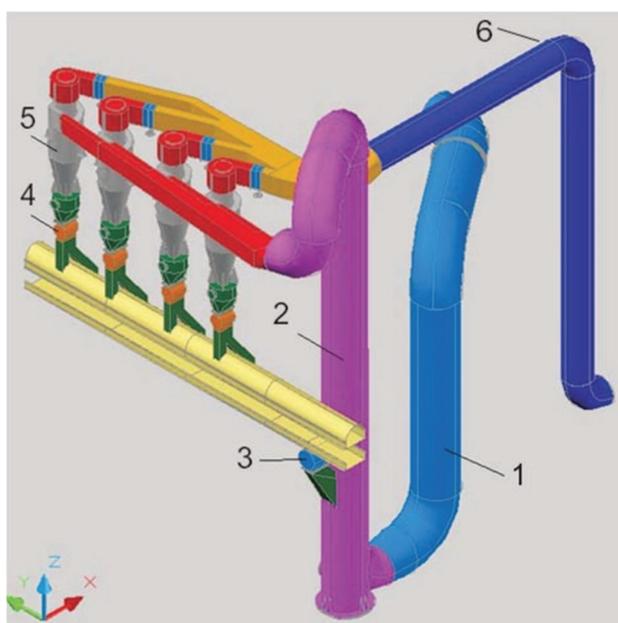
## 2.2 SISTEMAS DE SECAGEM DE RESÍDUOS (TORREFAÇÃO)

O BCA é uma biomassa que possui teor de açúcar residual e natureza hidrofílica, por isso tem tendência a biodegradação química e combustão espontânea (BRECCIA, 1997; MACASKILL, 2001) e o alto teor de umidade que está entre 45% a 55% pode reduzir sua eficiência de combustão. (MACASKILL, 2001; NDIBE et al., 2015). Mesmo com sua baixa densidade de energia volumétrica, forma de partícula

alongada e a baixa densidade de partículas, o BCA apresenta dificuldades de transporte e manuseio. (ORANG et al., 2015). Uma alternativa para reduzir a umidade do BCA está na utilização de secadores utilizando gases de combustão da caldeira antes da entrada no aquecedor de ar como gases de secagem (Figuras 19 e 20). O sistema é composto por um condutor de vapor quente (1), um tubo de secagem vertical (2), válvula rotativa de alimentação de BCA úmido (3), quatro válvulas rotativas de BCA de pré-secagem de descarga (4), quatro separadores de ciclone (5), um condutor de gases frios (6), uma ventoinha induzida de tiragem e uma chaminé.

O desempenho das caldeiras está direta e fortemente relacionado com a umidade do bagaço, entre todas as outras variáveis envolvidas. (ARNAO, 2007). Esses altos índices de umidade podem ser diminuídos através da instalação de secadores de bagaço. (COLOMBRES, 2010). No Brasil, a instalação destes equipamentos não teve sucesso, talvez por problemas de projeto. Em países como Argentina e Cuba, onde os problemas de projetos não são obstáculos, os secadores têm se mostrado eficientes. (ARNAO, 2007).

Figura 19 – Esquema de sistema de secagem com seus principais componentes



Fonte: Colombres et al. (2010).

Figura 20 - Vista frontal do secador na operação em Ingenio El Carmen, México



Fonte: (Colombres, et al., 2010)

Outra alternativa para resolver problemas de umidade pode ser o pré-tratamento por torrefação. (BACH et al., 2016). A torrefação é um processo pirolítico que transforma o BCA em carvão, reduzindo o teor de umidade, aumentando sua densidade de energia e melhorando suas propriedades de manejo e transporte comparados com a do carvão. (LIU et al., 2016). Existem duas formas de se conseguir a torrefação de biomassa que são através de métodos secos e úmidos. A torrefação a seco atua na biomassa elevando sua temperatura no intervalo de 200 a 300°C, no intervalo de 2 a 3 horas. (DENG et al., 2009; LIU et al., 2016; MADANAYAKE et al., 2016).

Para a utilização da biomassa em torrefação úmida, o BCA é envolvido em um pré-tratamento em um meio hidrotérmico a um intervalo de temperatura variando entre 180 a 260°C (BACH et al., 2016; MAKELA et al., 2016; QUANG-VU et al., 2015).

### 2.3. CARACTERIZAÇÃO DAS CINZAS GERADAS

As cinzas são resíduos sólidos gerados através da combustão da biomassa e se classificam em fuligem (partículas extremamente finas depositadas na caldeira), cinzas geradas no interior da caldeira e as cinzas volantes que são partículas finas transportadas junto com o processo de combustão. (BASU et al., 2009). As cinzas possuem composição e morfologia diferentes pois são vários os parâmetros na

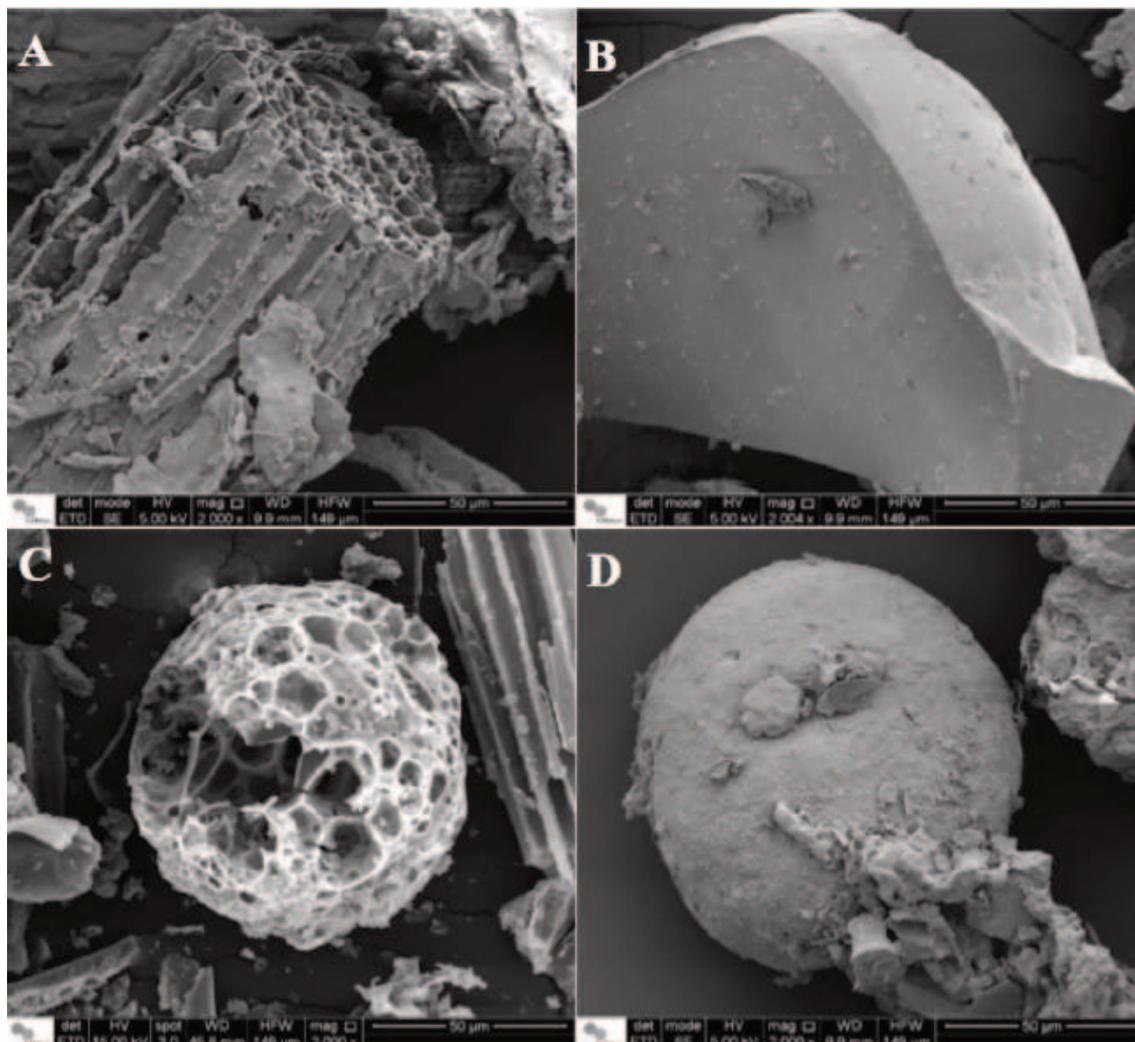
combustão que interferem na sua geração como a temperatura, tempo de combustão e percentual de umidade da biomassa. (BASU et al., 2009).

Segundo Teixeira et al. (2008), as cinzas possuem composições diferentes tanto com relação à sua morfologia quanto à composição química. Com relação à morfologia existem partículas de diferentes formas e tamanhos e com relação à composição química a variação acontece devido a parâmetros de processo de combustão como a temperatura, tempo de combustão e tipo de biomassa.

Existem três tipos de partículas que fazem parte da composição das cinzas com relação à morfologia segundo Macedo (2009):

- Os materiais lignocelulósicos, componente orgânico das cinzas, também conhecido por carbonos não queimados estão relacionados diretamente com a quantidade de umidade do BCA na combustão, podendo ou não originar cinzas com qualidade. De acordo com Cordeiro et al. (2008), a elevada quantidade de carbonos não queimados é indício de uma baixa eficiência na combustão do BCA (Figura 21 A).
- A composição de 60 % das cinzas é feita por partículas de silicato e dióxidos de silicato (Figura 21 B), provenientes da areia e quartzo vindos da lavoura, fixando-se na CA mesmo após a lavagem e o processo de combustão (MACEDO, 2009; AHMARUZZAMAN, 2010; HWANG et al., 2002).
- Segundo Rohatgi et al. (2009), a composição de 32% das cinzas é geralmente na forma de cenosfera, que são formadas durante o processo de combustão e são compostas por diferentes espécies de óxidos de diferentes metais como:  $K_2O$ ,  $MgO$ ,  $P_2O_5$  e  $CaO$  (Figura 21 C e D). As cenosferas podem ser encontradas com variações de tamanho e morfologia, são ocas com ou sem poros e possuem variação de composição. (ROHATGI et al., 2009).

Figura 21 – Composição morfológica das cinzas do bagaço de cana de açúcar: Componentes de partículas orgânicas (A), cenosferas com componentes de óxidos metálicos (B), cinzas volantes (C) e cinzas da caldeira (D).



Fonte: Cacuro et al. (2014).

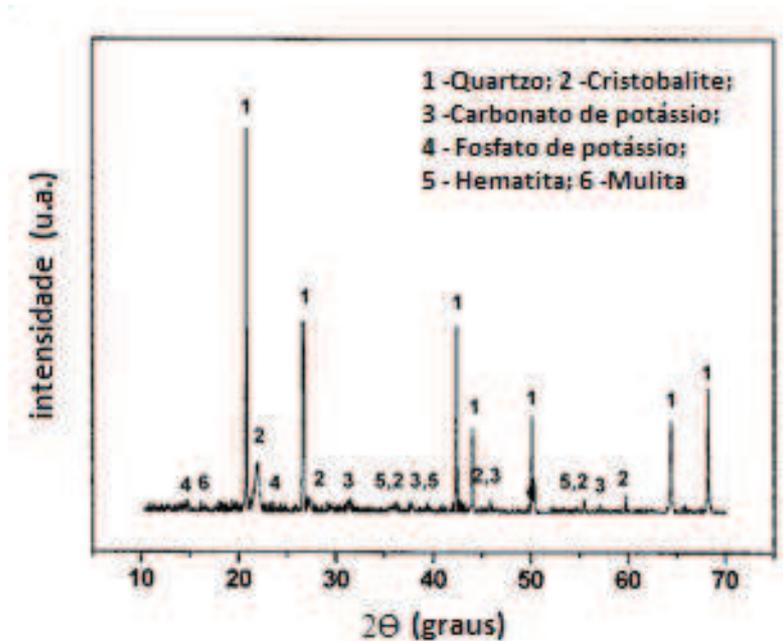
Segundo Di Paula et al. (2009), a moagem de 1 tonelada de CA gera 250 kg de BCA e a combustão de 250 kg de BCA gera 25 kg de cinzas.

Em um experimento realizado em uma usina de açúcar e álcool com cogeração de energia na Índia, (SANDIP et al., 2018) caracterizou cinzas do BCA em análise de DRX e constatou que o elemento preponderante presente é o  $\text{SiO}_2$  e elementos minoritários são óxidos de sódio e cálcio.

De acordo com Schettino et al. (2013), a análise de DRX foi realizada em uma amostra de cinzas de BCA e apresentou picos característicos das seguintes fases

minerais: quartzo, cristobalita, carbonato de potássio, fosfato de cálcio, hematita, e mulita, com predomínio de quartzo (Figura 22).

Figura 22 - Difração de raios x dos resíduos de cinza de BCA de CA



Fonte: Adaptado de Schettinoa et al. (2013).

Com relação à composição química, a amostra apresentou  $\text{SiO}_2$  como principal componente, representando quase 85,5 % em massa, com presença de Ca, Al, P, K e Fe como componentes em menor proporção.

Segundo Montakarntiwong et al. (2013), para que resíduos tenha características de materiais aglutinantes pozolânicos, de acordo com as normas ISO 3812, devem respeitar as seguintes composições químicas:

- A soma de  $\text{SiO}_2$ , mais  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , mais  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , em porcentagem de massa não deve ultrapassar 70%,
- A porcentagem de massa de  $\text{SiO}_2$  deve ser no mínimo de 35%,
- Mg em porcentagem de massa não deve ser superior a 5%,
- $\text{SO}_3$  em porcentagem de massa não deve ser superior a 3%,
- A porcentagem em massa de álcalis não deve ser superior a 1,5%,
- O valor da perda ao fogo deve ser menor que 12%.

Tabela 3 - Composição química dos resíduos de cinzas de BCA

<b>Composição</b>	<b>Percentual (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	85,55
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,21
TiO <sub>2</sub>	0,20
K <sub>2</sub> O	1,33
SO <sub>3</sub>	2,28
CaO	4,05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3,01
MnO	0,08

Fonte: Adaptado de Schettino et al. (2013).

O BCA é composto por matéria orgânica vegetal rica em polissacarídeos como a celulose e hemicelulose, além da lignina, que juntos compõem cerca de 75% da biomassa, o restante é composto por substâncias como proteínas, óleos vegetais e minerais. Segundo Cordeiro (2006), a composição do BCA em base anidra é em torno de 50% de celulose (C<sub>5</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>), 25% de hemicelulose (C<sub>5</sub>H<sub>8</sub>O<sub>4</sub>) e 25% de lignina (C<sub>7</sub>H<sub>10</sub>O<sub>3</sub>).

O comportamento térmico e os parâmetros cinéticos durante o processo de termoconversão é de vital importância para se obter um melhor aproveitamento de uma biomassa. (SANTOS et al., 2011). A relação entre a taxa de aquecimento do processo de quatro tipos de biomassa (BCA e palha de CA, resíduos de madeira e capim elefante) e suas respectivas decomposições obtiveram resultados evidenciando três zonas de perda de massa, a primeira em torno de 100°C, relacionada com a eliminação de água, a segunda entre 200-350°C e a terceira 350-500°C, sendo a segunda e terceira devido ao processo de degradação da matéria orgânica. (SEYE et al., 2003). A estabilidade térmica e a faixa de temperatura de decomposição da hemicelulose, celulose e lignina em espécies de eucaliptos, coco de babaçu e piaçava, foi estudada por Raad et al. (2006) com o objetivo de otimização do processo de fabricação de carvão vegetal na siderurgia. Nesse estudo, os componentes da madeira se decompunham em diferentes faixas de temperatura: a hemicelulose estava na faixa de 200 a 300°C, a celulose entre 240 a 350°C e a lignina entre 350 e 500°C.

## 2.4 RECICLAGEM DE RESÍDUOS

### 2.4.1. Construção civil

A cinza é um resíduo com grande quantidade de sílica e baixo valor agregado, por isso é uma alternativa atraente e viável como substitutivo da areia em construção civil (GONZÁLEZ et al., 2009; MACEDO, 2009). A areia é um componente da construção civil que apesar do baixo custo, tem seu valor aumentado no custo final devido à logística de transporte no custo final. Com a utilização das cinzas em componentes na construção civil, verifica-se uma diminuição nos custos do produto final e um aumento na eficiência na produção.

Desta forma ocorre a minimização do impacto ambiental ao interromper a extração da areia do meio ambiente assim como uma utilização das cinzas que gerariam lucro para as usinas (MACEDO, 2009; SANTOS et al., 2008). Há também utilização de cinzas em materiais cimentícios quando o material não é inerte e sim como incremento em propriedades do cimento. Segundo Macedo (2009), a utilização das cinzas em argamassas alcançou resultados satisfatórios quanto à sua pozolanicidade em substituição parcial de material argiloso pelas cinzas de CA. A utilização dos resíduos das cinzas do BCA na indústria da construção pode ser a melhor solução para o gerenciamento dos resíduos sólidos, pois não contribui de nenhuma forma para emissão de CO<sub>2</sub>. (VASUDHA et al., 2017).

### 2.4.2. Utilização na agricultura

A utilização das cinzas na agricultura passa pelo uso como adubo juntamente com a torta de filtro em lavouras de CA principalmente no Estado de São Paulo (LIMA et al., 2010). Uma das principais vantagens da utilização das cinzas na agricultura é como corretivo de pH do solo, pois as cinzas possuem pH alcalino. (AHMARUZZAMAN, 2001).

A capacidade de retenção da água também é uma característica das cinzas devido a contribuição do aumento da microporosidade no solo. (AHMARUZZAMAN, 2010; LIMA et al., 2010).

As cinzas volantes foram estudadas como agentes auxiliares no aumento do rendimento e crescimento de trigo plantado provocando alterações nas propriedades

químicas e físicas do solo com o aumento da densidade, condutividade hidráulica saturada e na umidade do solo, além da capacidade de retenção do solo. (GARG et al., 2005).

Segundo Basu et al. (2009), as principais vantagens da utilização das cinzas na agricultura são:

- Melhoria nas propriedades do solo como mudança na textura, com quantidades controladas de cinzas;
- Utilização como controle de pH do solo;
- Aumento da capacidade de retenção de água pelo solo.

Com relação ao aproveitamento como nutrientes do solo, as cinzas volantes possuem elementos essenciais como cálcio, ferro, manganês e potássio, além de boro, selênio e molibdênio. A dosagem das cinzas para esses fins tem que ser controlada, pois em sua composição também se encontra metais pesados como alumínio e boro que podem causar toxicidade quando utilizado em grande escala. (BASU et al., 2009).

A aplicação de cinzas de BCA em solos agrícolas não afetaram a produtividade da CA nem os atributos tecnológicos sofreram influência pelas doses de cinzas adicionadas, fato esse que torna viável a incorporação do resíduo em solos agrícolas, não provocando situação contrária à produção de açúcar e álcool. (BEGA, 2014).

### **2.4.3. Cenóferas**

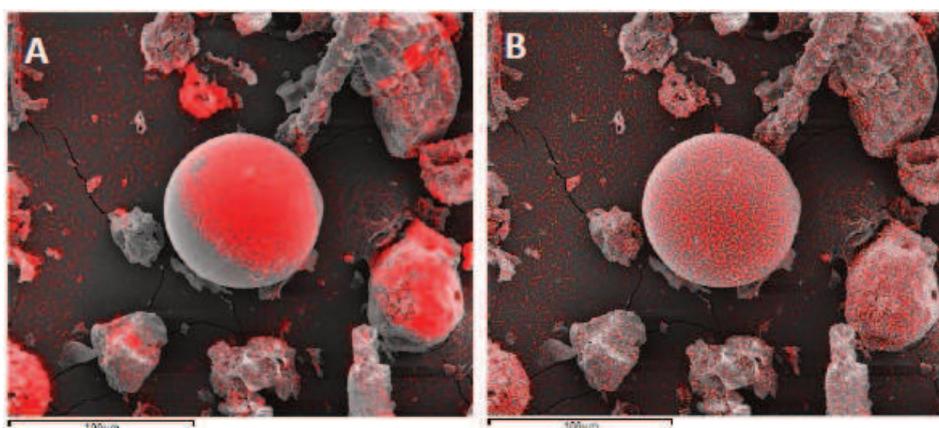
Em uma amostra de cinzas analisadas por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) observadas via microscopia eletrônica de varredura (MEV), observou-se a alta quantidade elementar relativa das cenóferas que são os pontos em vermelho (Figura 23 A e B). Devido a porosidade dos materiais que compõem as cenóferas, uma forma de utilização pode estar relacionada como isolantes térmicos.

Segundo Blisset et al. (2012), as cenóferas possuem porosidades que juntamente com sua composição (mistura de óxidos metálicos) podem ser utilizadas como catalisadores.

As cenóferas estão sendo estudadas para várias aplicações industriais, dentre as quais se destaca como agregado para aumentar a resistência de compósitos de polietileno de alta densidade, que além de aumentar a resistência à tração também diminui sua densidade. Com a utilização das cinzas foi possível aumentar as

propriedades mecânicas de resistência a tração e a estabilidade térmica do compósito. (DEEPTHI et al., 2010). As cenosferas foram utilizadas também como material de preenchimento por Rohatgi et al. (2009) onde se destinaram a confecção de compósitos de poliéster juntamente com as cinzas. O compósito estudado apresentou uma considerada diminuição da massa final produzidas, pois as cenosferas possuem sua estrutura “oca”.

Figura 23 – EDS cinzas de CA no espectro do alumínio (A) e no espectro do ferro (B) com a demonstração da abundância relativa do elemento.



Fonte: Cacuro et al. (2014).

#### 2.4.4. Compósitos reforçados por cinzas

Os compósitos são materiais formados por pelo menos dois diferentes materiais com propriedades distintas, interfaceados entre si. Sua formação pode ser feita a partir de combinações de diferentes tipos de materiais como metais, polímeros e cerâmicas, com propriedades distintas dos materiais isolados. (SILVA, 2003; VINSON et al., 2006).

A utilização das cinzas como compósitos é uma atividade relativamente nova comparada com a utilização em construção civil, porém já existe uma vasta quantidade de estudos sobre o assunto, além de apontar com um significativo potencial econômico. (VINSON et al., 2006; GUHANATAHN et al., 2001; GU et al., 2007).

Nath et al. (2010) prepararam compósitos feitos com cinzas volantes modificados em hidróxido de sódio em uma matriz de álcool polivinílico (PVA) que

apresentaram boa resistência mecânica e biodegradabilidade, onde verificou-se que as resistências à tração dos filmes compósitos aumentaram proporcionalmente com as cinzas volantes modificadas quimicamente, e a força máxima atingida foi 414% maior no caso de 20% em massa da CVMQ do que em filme puro de PVA. Experimentos com compósitos de polipropileno isostático (PP) reforçados com cinzas volantes foram realizados e verificou-se um aumento na elasticidade, onde o ganho variou entre 10 a 60%, e com 20% de cinzas volantes comparado com o PP puro (NATH et al., 2009).

Sengupta et al. (2013) realizaram um experimento de um compósito com dois resíduos: cinza volante e polipropileno reciclado. Foram incorporados à matriz de PP diversas concentrações de cinzas volantes com ácido palmítico sendo que o resultado apresentou um aumento da resistência à tração. A cristalinidade se alterou significativamente, tendo como resultado um melhoramento nas propriedades dos compostos de 1% a 2% no peso dos compostos e a resistência ao impacto aumentou em 132%.

#### **2.4.5. Adsorvente**

Outra forma de se utilizar as cinzas também é no tratamento de efluentes industriais. As cinzas se tornam viáveis ambientalmente e com custo reduzido ao tradicional uso do carvão ativado, agindo como adsorvente e retirando íons metálicos e corantes de efluentes aquáticos. (BARBOSA et al., 2014; SHAH et al., 2013). A capacidade das cinzas de ser adsorvente está nas partículas de carbono mal combusto.

Experimentos no tratamento de esgotos industriais com cinzas volantes na retirada de íons de chumbo de efluentes industriais foram realizados com redução de íons  $Pb^{2+}$  nos esgotos industriais após a aplicação das cinzas. (BARBOSA et al., 2014).

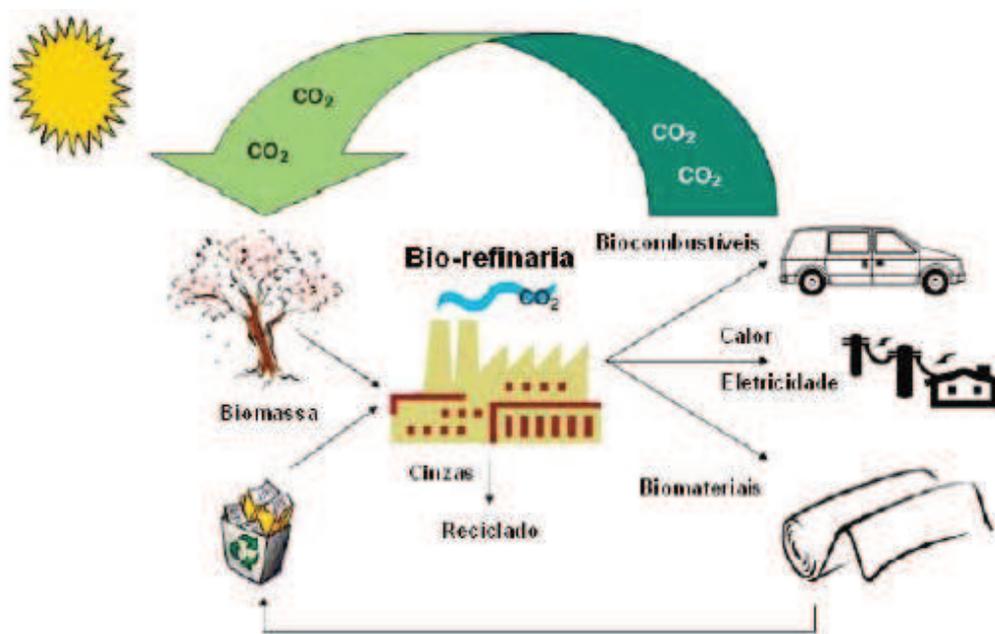
Shah et al. (2013) realizaram a caracterização das cinzas de BCA e comparou com outros tipos de cinzas para comprovar a capacidade de adsorção destinada ao tratamento de efluentes industriais contaminados com corantes. Foi observado uma melhor porosidade e capacidade de adsorção das cinzas de BCA em comparação com cinzas de outros tipos.

As cinzas de CA também foram testadas por Kumar et al. (2005) como adsorventes em soluções aquosas para retirada de azul de metileno, testando sua eficiência na remoção em soluções com pH 8.

#### 2.4.6 Utilização de resíduos como bio-refinaria

Segundo Ondrey (2006), a partir de diferentes biomassas tem-se a possibilidade de definir da mesma forma que o petróleo como uma bio-refinaria. Sendo um complexo integrado com a possibilidade de produção de diferentes produtos (químicos, combustíveis e potência), num ciclo produtivo que possibilitaria atingir maiores eficiências sobre o ponto de vista termodinâmico, econômico e ambiental (Figura 24).

Figura 24 – Ciclo integrado para tecnologias sustentáveis agri-combustível-biomaterial-bioenergia



Fonte: Adaptado de Ragauskas et al. (2006).

“Bio-refinarias” hipotéticas foram analisadas e apresentadas por Lynd et al. (2005) tendo como base materiais ligno-celulósicos, sendo que em alguns cenários apresentaram eficiência energética global maior que 70% e com competitividade

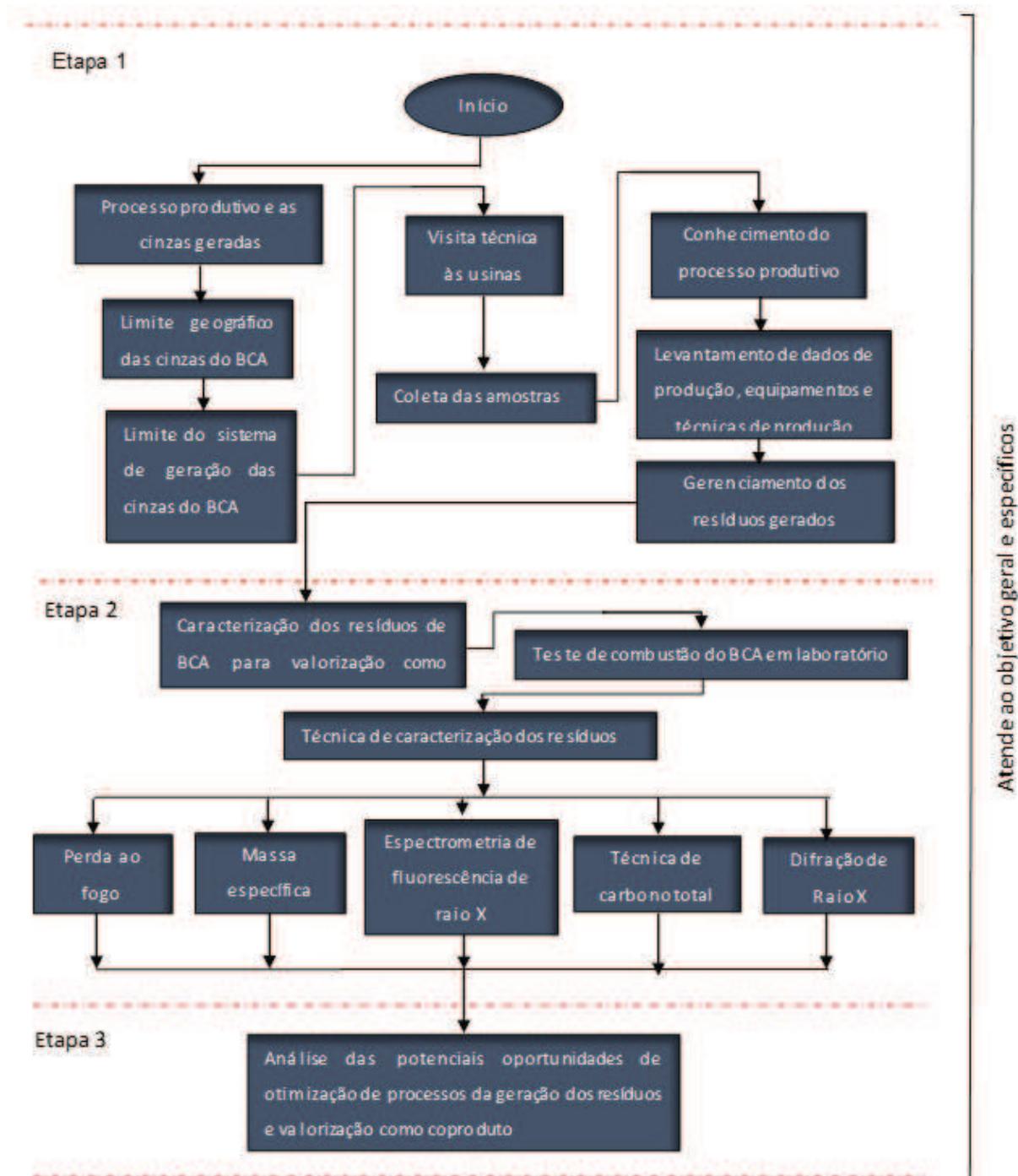
econômica com processos convencionais existentes tendo como base preços de combustíveis fósseis dos últimos anos.

Para que essas simulações aconteçam, as tecnologias-chaves são a gaseificação, produzindo gás de síntese e a tecnologia da conversão de lignocelulósicos em açúcares. (WERPY et al., 2005). Com relação à gaseificação, durante esse estudo verificou-se a possibilidade do enorme potencial que esta tecnologia oferece, produzindo energia e diferentes combustíveis. No caso da hidrólise, deve-se pensar que no momento que a tecnologia se tornar viável e competitiva comercialmente, os processos bioquímicos tendo como matéria prima o açúcar produzindo plásticos, ácidos orgânicos, solventes, entre outros não serão mais exclusividade da indústria de açúcar convencional.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a realização deste trabalho foi estabelecida com o objetivo de avaliar a eficiência da combustão do BCA pela caracterização das cinzas geradas pela caldeira em duas usinas de produção de etanol a partir de cana de açúcar. O fluxograma com as etapas desenvolvidas no trabalho é apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Etapas desenvolvidas neste trabalho



Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.1 ETAPA 1 – PROCESSO PRODUTIVO E AS CINZAS GERADAS

#### **3.1.1 Processo de produção da cana de açúcar e os resíduos gerados das Usinas 01 e 02**

A Usina 01 processou na safra de 2016/2017 cerca de 5 milhões de toneladas de CA, com 74 mil hectares de áreas agrícolas gerenciadas, produziu 415 mil m<sup>3</sup> de etanol hidratado, e exportou 100 KWh/t de energia por tonelada de CA moída.

A extração do caldo foi feita através de 6 ternos de moenda de 100 polegadas. Após a extração, o BCA é enviado para combustão através de esteiras transportadoras. As caldeiras estão dispostas em série, sendo a primeira a receber o BCA a caldeira com grelhas HPB de 320 toneladas de vapor por hora, em seguida a caldeira de LF HPB de 400 toneladas de vapor por hora. A condução das cinzas após a combustão nas caldeiras foi realizada através do lavador de gases e conduzidas para um sistema de filtragem antes de se depositar no tanque de decantação. As cinzas juntamente com os resíduos do tratamento de caldo do processo foram aplicadas na fertilização da lavoura. A vinhaça é um resíduo oriundo da destilação e também é utilizado na lavoura através de um sistema de fertirrigação.

A Usina 02 processou na safra 2016/2017 cerca de 2,7 milhões de toneladas de CA. A extração do caldo foi realizada através do difusor modular Dedini, com capacidade de 18.000 toneladas de CA por dia. O BCA gerado foi transportado para combustão em duas caldeiras instaladas em série, duas caldeiras idênticas, da marca Dedini série AT 200 com 67 bar de pressão e 200 toneladas de vapor por hora cada. As cinzas geradas nas caldeiras foram captadas pelo lavador de gases e direcionadas para as piscinas de decantação. As cinzas decantadas nas piscinas, foram levadas como fertilizantes para a lavoura de CA. A vinhaça produzida na destilação também foi direcionada como fertilizante na lavoura através da irrigação.

#### **3.1.2 Localização geográfica das usinas estudadas**

As localizações geográficas das cinzas deste estudo são de duas empresas do sudoeste goiano (Usinas 01 e 02), região de tríplice fronteira estadual GO-MT-MS. Um dos municípios foi Mineiros que fica a 420 km de Goiânia (Usina 02), outro foi

Chapadão do Céu, que fica a 480 km da capital de Goiás (Usina 01). Na Figura 26 pode-se visualizar o mapa com as localizações.

Figura 26 - Localização geográfica das cinzas do BCA

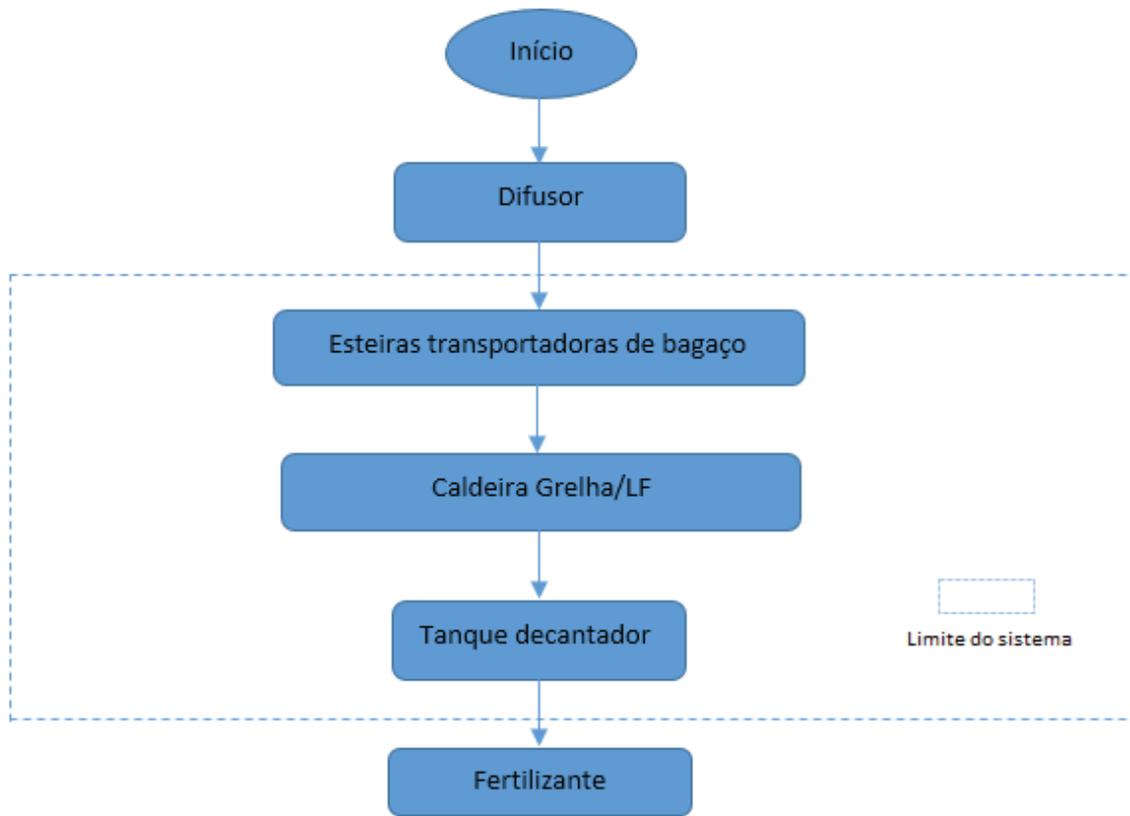


Fonte: Adaptado de Wikipédia (2018).

### 3.1.3 Limites do sistema estudado

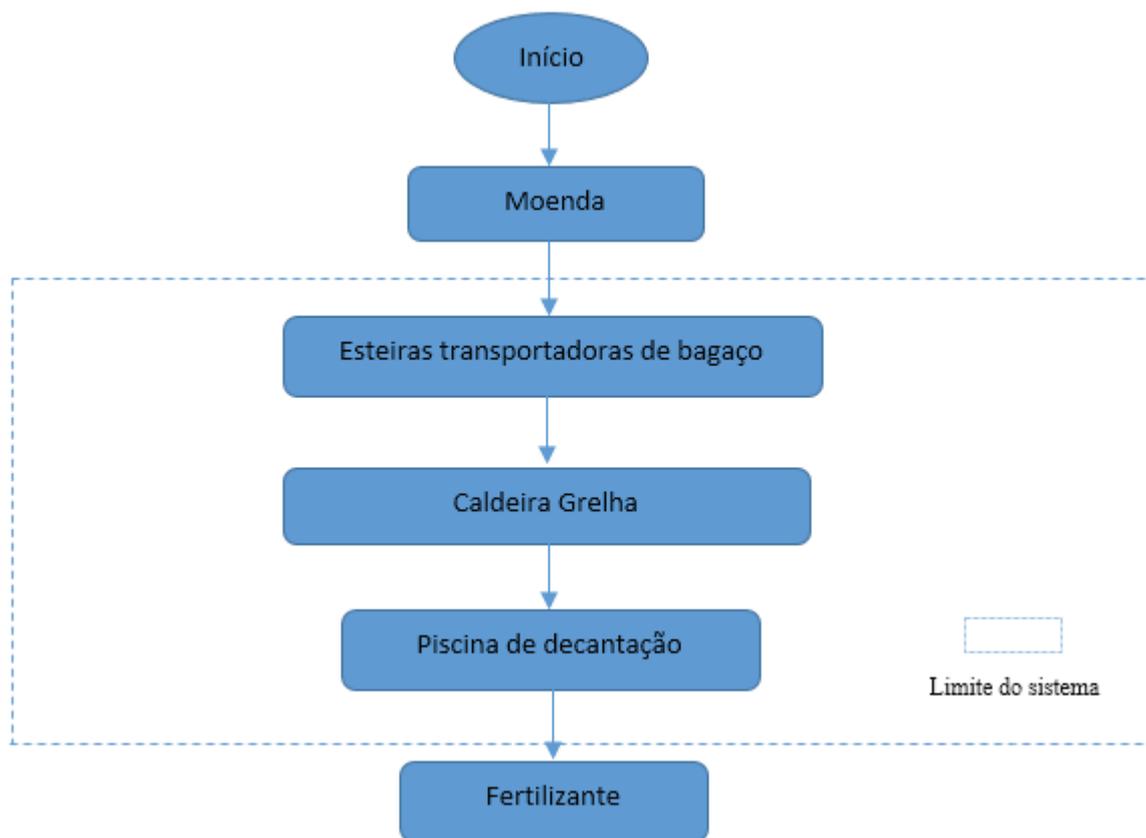
Ao considerar as cinzas geradas como um coproduto optou-se por limitar o estudo nos sistemas de alimentação das caldeiras, iniciando nas esteiras do BCA para as caldeiras para geração de vapor. Desconsiderou-se a extração da CA de açúcar nas moendas e difusores, processos antecessores à formação do BCA.

Figura 27 – Limites do sistema de geração de cinzas do BCA da Usina 01



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 28 - Limites do sistema de geração de cinzas do BCA da Usina 02

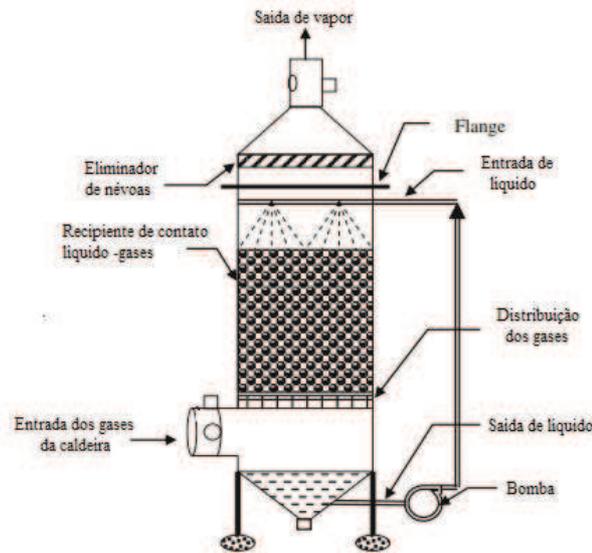


Fonte: Elaborada pelo autor.

Nas usinas, o BCA foi gerado por ternos de moenda na Usina 02 (Figura 28) e difusor na Usina 01 (Figura 27), que seguiram através de esteiras transportadoras para as caldeiras de grelhas (Usina 01 e 02) e de LF (Usina 01). Os gases gerados no processo de combustão do BCA receberam tratamento para evitar a emissão de gases poluentes direto para atmosfera, sendo o lavador de gases responsável por essa ação.

Os gases gerados na combustão do BCA entraram no lavador e foram conduzidos por uma câmara onde entraram em contato com a água que envolvem os particulados gerados na combustão (Figura 29). Na Usina 01 os resíduos recebidos do lavador de gases foram destinados ao tratamento no tanque decantador, enquanto na Usina 02 foram destinados para a piscina de decantação.

Figura 29 - Lavador de gases de estágio único em contracorrente



Fonte: Adaptado de Jafari et al. (2012).

### 3.1.4 Visita técnica às usinas

Com o objetivo de aprofundar o conhecimento do processo produtivo de combustão de BCA, que culmina com a produção de cinza de BCA, realizou-se 2 visitas técnicas nas usinas onde gerou-se um questionário para se comparar o status atual da produção com oportunidades identificadas em literatura no sentido de o tornar mais ecoeficiente.

Tabela 4 - Questionário realizado nas duas usinas

**Pergunta 1:** As cinzas volantes são as mais importantes para análise com possíveis utilização como coproduto. Nas análises das cinzas coletadas, constatou-se uma grande quantidade de sílica. Seria possível coletar em as amostras em pontos diferentes da caldeira?

**Pergunta 2:** Existe um controle da umidade do BCA que alimenta as caldeiras quando é extraído nas moendas?

**Pergunta 3:** E quando ele é retirado do monte, existe um controle da umidade?

**Pergunta 4:** Qual é a eficiência das caldeiras?

**Pergunta 5:** Qual o destino das cinzas geradas no processo?

**Pergunta 6:** Com relação às cinzas geradas, é feita alguma análise para verificar a qualidade da combustão?

**Pergunta 7:** Qual o volume de BCA e de cinzas geradas durante a safra?

**Pergunta 8:** Quais são o tipo e modelo dos equipamentos de extração (moenda/difusor) e de geração de vapor (caldeira)?

**Pergunta 9:** Como é a rota de destino das cinzas geradas após a combustão na caldeira, após ser captada pelo lavador de gases?

**Pergunta 10:** Existe um indicador que mostra a quantidade de água utilizada no processo?

Fonte: Elaborada pelo autor.

### 3.2 ETAPA 2 - CARACTERIZAÇÃO DO BCA E CINZAS PARA VALORIZAÇÃO COMO COPRODUTO

#### 3.2.1 Amostragem de materiais

As amostras de BCA e cinzas foram coletadas durante visita técnica a Usina 01 (Figura 30).

A relação de todas as amostras coletadas com suas respectivas técnicas de caracterização, além da época em que foram coletadas estão descritas na Tabela 5.

Tabela 5 - Demonstrativo das amostras analisadas

<b>Identificação da amostra</b>	<b>Denominação da amostra (origem)</b>	<b>Mês e ano de amostragem</b>	<b>Usina</b>	<b>Análises realizadas</b>
1	Cinzas caldeiras LF e Grelha	10/2017	Usina 01	PF, ME
2	Cinzas caldeiras LF e Grelha	03/2018	Usina 01	PF
3	Areia da caldeira LF	10/2017	Usina 01	PF
4	Areia da caldeira LF	03/2018	Usina 01	PF, ME
5	Cinzas da caldeira LF	10/2017	Usina 01	PF
6	Cinzas da caldeira LF	03/2018	Usina 01	PF, ME
7	Cinzas do soprador de fuligem	10/2017	Usina 02	PF, FRX1
8	Cinzas do soprador de fuligem	03/2018	Usina 02	PF, ME
9	BCA da Mulfla 800°C	10/2017	Usina 02	PF
10	BCA da Mulfla 800°C	03/2018	Usina 02	PF, ME
11	Monte de cinzas de fora da caldeira	10/2017	Usina 02	PF, ME, DCT
12	Monte de cinzas de fora da caldeira	03/2018	Usina 02	PF, FRX1, DCT

13	Cinzas caldeiras LF e Grelha	03/2018	Usina 01	PF, ME
14	Cinzas caldeiras LF e Grelha	05/2018	Usina 01	PF, FRX2
15	Cinzas caldeiras LF e Grelha	03/2018	Usina 01	PF, FRX1, FRX2, DRX
16	Cinzas caldeiras LF e Grelha	05/2018	Usina 01	PF, FRX1, FRX2, DRX
17	Cinzas caldeiras LF e Grelha	03/2018	Usina 01	PF, FRX1, FRX2, DRX
18	Cinzas caldeiras LF e Grelha	05/2018	Usina 01	PF, FRX1

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 30 - BCA armazenado para combustão nas caldeiras da Usina 02



Fonte: Usina 02 (2019)

### 3.2.2 Teste de combustão do BCA em laboratório

Foi realizado a combustão do BCA da Usina 02 em uma mufla a 800°C em um laboratório durante 2 horas (Figura 31), com o objetivo de realizar um comparativo da caracterização das cinzas nessa situação com as cinzas originárias da combustão em caldeira.

Figura 31 – Combustão do BCA para caracterização das cinzas



Fonte: Registrada pelo autor.

### 3.2.3 Caracterização das amostras

As técnicas de caracterização das cinzas realizadas neste trabalho foram a perda ao fogo, massa específica, análise de fluorescência de raios X qualitativa (FRX1), análise de fluorescência de raios X semiquantitativa (FRX2),

determinação de carbono total (DTC), difração de raios X (DRX) e caracterização térmica (CT).

### 3.2.3.1 Massa específica

A massa específica é definida como a razão direta entre a massa e o volume de uma amostra. Sua análise se faz necessária para comparar o resultado das cargas e também comparar com outro tipo de material. Os valores de massa específica foram obtidos através da técnica de picnometria utilizando um aparelho picnômetro a gás hélio da marca Micrometrics Modelo Accupy C II 1340 realizado no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais - LCVMat na Unisinos.

### 3.2.3.2 Perda ao fogo

A técnica de perda ao fogo tem como objetivo quantificar o material orgânico presente na amostra como carbono livre e dióxido de carbono existentes em hidratos, carbonatos e água combinada. Os valores menores de perda ao fogo, indicam que menores são os valores dos contaminantes e carbonos residuais presentes nas amostras. Sua análise se faz necessária devido a relação direta entre a quantidade de carbonos mal queimados com a eficiência da combustão na caldeira. O ensaio foi realizado no LCVMat na Unisinos.

### 3.2.3.3 Espectrometria de fluorescência de raios x – qualitativa (FRX1)

A técnica de espectrometria de fluorescência de raios x é uma técnica não destrutiva que consiste na identificação de elementos (constituição química) presentes em uma amostra qualitativamente e estabelece também a proporção (concentração) de cada material presente na amostra. Realizou-se a análise elementar comparativa da composição química em um espectrômetro de fluorescência de raios x por energia dispersiva, marca SHIMADZU, pertencente ao LCVMat na Unisinos, cujos resultados são apresentados em percentual (%), calculados como óxidos e normalizados a 100%.

### 3.2.3.4 Espectrometria de fluorescência de raios x – Semiquantitativa (FRX2)

A técnica de espectrometria de fluorescência de raios x semiquantitativa foi utilizada para identificar a composição química considerando os óxidos binários de 2 amostras de cinzas de BCA (Amostra nº 15 e 17), a fim de confirmar as quantidades dos elementos presentes realizado qualitativamente no FRX1. As análises foram realizadas em um espectrômetro da Panalytical no Instituto Tecnológico (ITT) Fossil na Unisinos, modelo MiniPal 4, versão 7.0, com a aplicação Omniam de análise semiquantitativa, utilizando o padrão interno do equipamento.

### 3.2.3.5 Carbono total

O analisador de carbono é utilizado para a quantificação do carbono total contido no material. Assim como a análise de perda ao fogo, quanto menor o teor carbonáceo de cinzas, melhor para aplicação deste material em diversas oportunidades como refratário, substituição de cimento ou como agregado miúdo na construção civil. As Amostras nº 11, 12, 13 e 14 foram analisadas através de método de combustão total, em analisador de carbono da marca Leco, modelo LECO SC -144DR. Essa análise ocorreu no Laboratório do ITT Fossil na Unisinos.

### 3.2.3.6 Difração de raios x

A difração de raios x é um fenômeno que emprega o espalhamento coerente resultante da interação entre as ondas de radiação eletromagnéticas, por estruturas organizadas, com os elétrons dos átomos de um determinado material, permitindo sua análise morfológica, determinando sua estrutura cristalina, e fração percentual cristalina.

As difrações de raios x de outras 2 amostras (Amostras nº 15 e 17) foram realizadas no difratômetro de raios x localizado no ITT Fossil na Unisinos.

A preparação das amostras para DRX foram realizadas através da moagem em gral de ágata para obtenção das partículas com granulometria inferior a peneira 325 da ABNT (45µm). A identificação dos picos obtidos, no difratograma, foi realizada com o Software HighScore Plus 4.5, e seus respectivos bancos de dados (PDF2 e COD).

### 3.2.3.7 Caracterização térmica - Termogravimetria

As análises térmicas foram realizadas em 2 amostras (Amostras nº 15 e 17) no equipamento da marca Perkin Elmer, modelo STA 8000, instalado no LCVmat na Unisinos. A amostra foi acondicionada em cadinho de alumina, com rampa de temperatura de 20 a 1000°C, com aquecimento de 10°C/min, sob atmosfera de nitrogênio.

## **4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS**

### **4.1 ETAPA 1 – PROCESSO PRODUTIVO E AS CINZAS GERADAS**

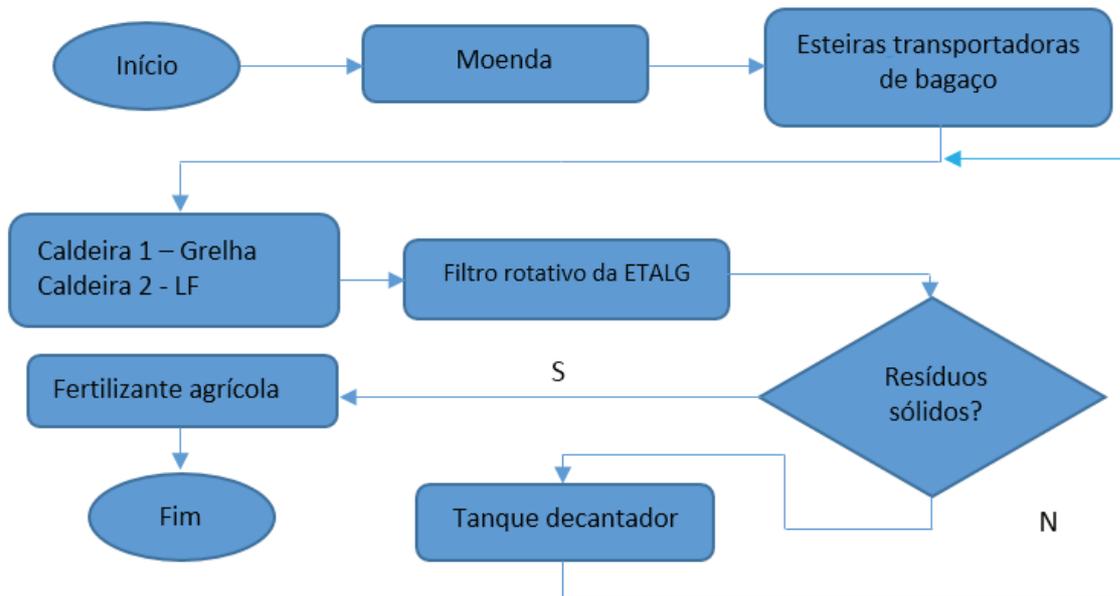
#### **4.1.1 Levantamento de dados de produção, equipamentos e técnicas de combustão**

##### **4.1.1.1 Usina 01**

Na Usina 01 foram moídas na safra de 2016/17 um total de 5 milhões de toneladas de CA. O sistema de extração do caldo foi realizado através de moenda composta por seis ternos sendo o primeiro com 100 polegadas (marca Simisa) e os demais de 90 polegadas (marca Dedini) que geraram o BCA que foram transportados pelas esteiras até realizar a combustão em caldeiras. Para a produção de vapor e energia elétrica ela possuía duas caldeiras, Caldeira 1 com sistema de grelhas e Caldeira 2 com sistema de LF, que geravam juntas 700 toneladas de vapor/hora a 520°C.

No processo de tratamento das cinzas como resíduos gerados pelas caldeiras, existiam os lavadores de gases que captavam as cinzas e levavam através de canaletas para a estação de tratamento de água de lavagem de gases (ETALG) onde um filtro rotativo (Filtro VLC) separava os resíduos sólidos (cinzas e demais) provenientes da combustão da caldeira do líquido resultante da lavagem. O líquido era encaminhado em um tanque decantador que retornava para o filtro rotativo o resíduo decantado em um circuito fechado (Figura 32).

Figura 32 - Processo de combustão do BCA e tratamento das cinzas na Usina 01



Fonte: Elaborada pelo autor.

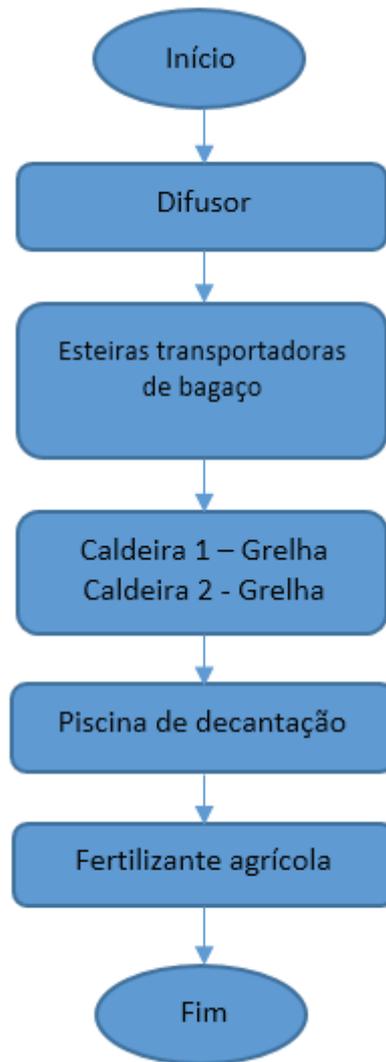
#### 4.1.1.2 Usina 02

Na Usina 02 foram moídas na safra de 2016/7 um total de 2,7 milhões de toneladas de CA. Para a produção de vapor e energia elétrica ela possuía duas caldeiras de grelhas que geraram juntas 400 toneladas de vapor a 490°C. O processo de extração da CA foi realizado através de um difusor modular da marca Dedini, com capacidade de moagem de 18.000 toneladas de CA dia. No final do processo de extração existiam dois ternos de moenda de 90 polegadas. Na extração, a CA passou pelo difusor onde através de vapor e jatos de água foi desfibrada, sendo conduzida no final a um terno que retirava todo o caldo (Figura 33).

O resíduo formado após o terno de moagem, o BCA, foi conduzido por esteiras para alimentar as caldeiras de grelhas como combustível, os gases gerados nessa combustão foram captados pela lavagem de gases conduzindo até as piscinas de decantação. Após atingirem sua capacidade máxima de resíduos, foi retirada a água e os resíduos formados foram utilizados como fertilizante na lavoura (Figura 34). As usinas possuíam relatórios para controle da qualidade do processo, onde monitoravam indicadores de performance de todos os setores que faziam parte da indústria e agrícola (Apêndice A). Nesse relatório observou-se a quantidade de BCA

produzido até a data de geração do dia totalizando mais de 569 mil toneladas e com média de porcentagem de umidade do BCA em torno de 50%.

Figura 33 - Processo de combustão do BCA e tratamento de cinzas na Usina 02



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 34 - Piscinas de decantação dos resíduos oriundos do lavador de gases



Fonte: Registrada pelo autor.

#### 4.1.2 Gerenciamento dos resíduos gerados

As duas usinas tinham setores específicos relacionados ao gerenciamento dos resíduos. O setor de Saúde, Segurança e Meio Ambiente das duas usinas, tinham como objetivo realizar a tratativa dos resíduos gerados na industrialização da CA. O BCA era utilizado na geração de vapor, as cinzas e torta de filtro na fertilização da lavoura de CA e a vinhaça na irrigação das lavouras das duas empresas. As Tabelas 6 e 7 demonstram a quantidade estimada de resíduos gerados pelas duas empresas em estudo.

A Usina 01 tinha um Plano de Gerenciamento de resíduos sólidos (PGRS), onde estavam inclusos a gestão dos resíduos sólidos quanto à implantação de coleta seletiva. O acondicionamento e armazenamento era feito em uma central de resíduos, onde os resíduos eram segregados, armazenados separadamente e beneficiados. Houve um crescimento das taxas de resíduos não perigosos nas últimas safras, 88% em 2015/2016, 90% em 2016/2017 e 91 % em 2017/2018. Com relação à taxa de resíduos sólidos perigosos, houve uma estabilidade, respectivamente 8%, 7% e 8%. No processo, a vinhaça e a torta de filtro eram os principais resíduos, que com o tratamento correto, eram aplicados nas lavouras como fertilizantes com potencial de nutrientes principalmente o potássio. A gestão dos recursos hídricos compreendia o reuso de 100% da água dos processos e o tratamento da água. O reuso era realizado através da instalação de sistemas fechados, com o objetivo de utilizar a mínima quantidade de captação de água.

A diminuição da geração de resíduos e o envio desses materiais para aterros era um dos objetivos e das prioridades da Usina 02 com relação à gestão de resíduos. A Usina 02 iniciou suas atividades em 2010, gerando mais de 500 toneladas de resíduos não recicláveis. No ano safra de 2016/2017, foi iniciado um projeto visando a diminuição dos resíduos não recicláveis, diminuição de gastos com o gerenciamento de resíduos com o envolvimento maior das áreas geradoras e o principal que foi a diminuição da disposição de resíduos em aterros industriais. Na safra de 2017/2018 houve uma redução de 73,5% no envio de resíduos para aterros. Tal desempenho foi possível devido à sensibilização dos funcionários para melhorar a separação dos materiais.

Tabela 6 - Resíduos gerados na região de Mineiros em Goiás, para Usina 01, com uma produção totalizando 5 milhões de toneladas de CA moída e 415 milhões de litros de etanol

Resíduos	Local de geração	Quantidade	Armazenamento
BCA	Moagem	1.250.000 t*	Caldeira
Cinzas	Caldeiras	31.250 t**	Lagoa
Palha	Lavoura	1.200.000 t***	Lavoura
Torta de filtro	Filtro rotativo	175.000 t****	Área aberta
Vinhaça	Destilação	2,99x10 <sup>9</sup> litros*****	Lagoa

\*A quantidade estimada de geração de BCA para 1 t de CA é de 250 kg (DI PAULA et al., 2009).

\*\*A combustão de 250 kg de BCA produz 25 kg de cinzas (DI PAULA et al., 2009).

\*\*\*A quantidade estimada de geração de palha para 1 t de CA é de 240 kg (UNICA, 2017).

\*\*\*\*Para cada t de CA moída, são geradas de 35 kg de torta de filtro (SANTOS et al., 2008).

\*\*\*\*\*A produção de vinhaça está na ordem de 13 litros por 1 litro de álcool produzido (PAULINO, 2011).

Fonte: Adaptado de Usina 01(2017).

Tabela 7 - Resíduos gerados na região de Mineiros em Goiás, para Usina 02, totalizando 2,7 milhões de toneladas de CA moída e 233,6 milhões de litros de etanol

Resíduos	Local de geração	Quantidade	Armazenamento
BCA	Moagem	675.000 t*	Caldeira
Cinzas	Caldeiras	16.875 t**	Lagoa
Palha	Lavoura	648.000 t***	Lavoura
Torta de filtro	Filtro rotativo	94.500 t****	Área aberta
Vinhaça	Destilação	0,415x10 <sup>9</sup> litros*****	Lagoa

\*A quantidade estimada de geração de BCA para 1 t de CA é de 250 kg (DI PAULA et al., 2009).

\*\*A combustão de 250 kg de BCA produz 25 kg de cinzas (DI PAULA et al., 2009).

\*\*\*A quantidade estimada de geração de palha para 1 t de CA é de 240 kg (UNICA, 2017).

\*\*\*\*Para cada t de CA moída, são geradas de 35 kg de torta de filtro (SANTOS et al., 2008).

\*\*\*\*\*A produção de vinhaça está na ordem de 13 litros por 1 litro de álcool produzido (PAULINO, 2011).

Fonte: Adaptado de Usina 02 (2017).

A seguir são apresentados os resultados obtidos nas etapas descritas na metodologia, onde foram destacadas a caracterização das cinzas utilizadas.

#### 4.1.3 Avaliação do processo de produção de etanol das empresas

Na Tabela 8 é possível observar o questionário com as respostas referente a Usina 01.

Tabela 8 - Respostas ao questionário elaborado a Usina 01

<b>Pergunta 1:</b> As cinzas volantes são as mais importantes para análise com possíveis utilização como coproduto. Nas análises das cinzas coletadas, constatou-se uma grande quantidade de sílica. Seria possível coletar em as amostras em pontos diferentes da caldeira?	<b>Resposta:</b> O caminho que as cinzas percorrem pode ser considerado como um circuito fechado até o final do processo de lavagem dos gases. Ou seja, não existe outro ponto para coleta de amostras de cinzas a não ser após o lavador de gases.
<b>Pergunta 2:</b> Existe um controle da umidade do BCA que alimenta as caldeiras quando é extraído nas moendas?	<b>Resposta:</b> Sim, existe um controle de umidade do BCA, pois ele é essencial para podermos ter uma boa extração do caldo além de uma combustão com qualidade
<b>Pergunta 3:</b> E quando ele é retirado do monte, existe um controle da umidade?	<b>Resposta:</b> O BCA quando é retirado do monte não possui controle de umidade.
<b>Pergunta 4:</b> Qual é a eficiência das caldeiras?	<b>Resposta:</b> A eficiência é a relação entre o volume de BCA queimado e o vapor gerado. Uma tonelada de BCA gera 2,1 toneladas de vapor, como são duas caldeiras teremos a relação de 4,2 toneladas de vapor por tonelada de BCA.
<b>Pergunta 5:</b> Qual o destino das cinzas geradas no processo?	<b>Resposta:</b> As cinzas geradas são controladas conforme leis ambientais, porém não podemos exibir documentos por decisão gerencial.
<b>Pergunta 6:</b> Com relação às cinzas geradas, é feita alguma análise para verificar a qualidade da combustão?	<b>Resposta:</b> No dia a dia não é feito análise para verificar a qualidade da combustão.
<b>Pergunta 7:</b> Qual o volume de BCA e de cinzas geradas durante a safra?	<b>Resposta:</b> O equipamento de extração utilizado na usina é uma moenda Dedini de 6 ternos, de 100 polegadas, uma caldeira HPB de 400 toneladas de vapor e uma HPB 320 toneladas de vapor.
<b>Pergunta 8:</b> Quais são o tipo e modelo dos equipamentos de extração (moenda/difusor) e de geração de vapor (caldeira)?	<b>Resposta:</b> A moenda é composta por seis ternos, sendo o primeiro de 100 polegadas (marca Simisa) e os demais de 90 polegadas (marca Dedini).
<b>Pergunta 9:</b> Como é a rota de destino das cinzas geradas após a combustão na caldeira, após ser captada pelo lavador de gases?	<b>Resposta:</b> A rota de destino das cinzas geradas após a combustão na caldeira é o filtro rotativo, para secagem e transportada para a compostagem. A água residual desta filtragem retorna para o lavador de gases em um circuito fechado.
<b>Pergunta 10:</b> Existe um indicador que mostra a quantidade de água utilizada no processo?	<b>Resposta:</b> A usina possui um controle da quantidade de água utilizada no processo, porém por decisão gerencial não podemos estar informando a quantidade controlada.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que a Usina 01 possui um processo ecoeficiente considerando o gerenciamento de resíduos e recursos hídricos. Além de realizar o tratamento adequado com as cinzas da combustão, a ETALG é responsável por diminuir a quantidade de água utilizada no processo, já que após o filtro rotativo, a água é depositada em um tanque próximo à ETALG e é bombeada novamente para o lavador de gases onde se inicia a captação dos gases das caldeiras. A utilização do lavador de gases como filtro das emissões provocadas pela combustão limita o reuso das cinzas como coproduto. Além de utilizá-las como fertilizantes, se o processo de filtragem pudesse ser trocado por um filtro manga, por exemplo, as cinzas poderiam ser beneficiadas sendo mais atrativas e propícias para reciclagem, apesar da resposta teórica a respeito da eficiência da caldeira. Nota-se que a Usina 01 apresenta problemas de rendimento na produção de vapor, pois durante as duas visitas técnicas não se notou a presença de secadores e nenhum outro tipo de equipamento responsável por reduzir a umidade do bagaço. Fato esse comprovado por (ARNAO, 2007) que afirma que a umidade do BCA está diretamente ligada com o desempenho da caldeira.

Na Tabela 9 é possível observar o questionário com as respostas referente a Usina 02.

Tabela 9 - Respostas ao questionário elaborado a Usina 02

**Pergunta 1:** As cinzas volantes são as mais importantes para análise com possíveis utilização como coproduto. Nas análises das cinzas coletadas, constatou-se uma grande quantidade de sílica. Seria possível coletar em as amostras em pontos diferentes da caldeira?

**Resposta:** Não, não existe outro ponto. O que pode ser feito é retirar as cinzas de outros locais quando as caldeiras estiverem paradas para manutenção, ou seja, na entressafra, provavelmente no final de janeiro para março.

**Pergunta 2:** Existe um controle da umidade do BCA que alimenta as caldeiras quando é extraído nas moendas?

**Resposta:** Sim, existe controle da umidade do BCA, pois é através desse controle que procuramos entregar um combustível com qualidade para a caldeira.

**Pergunta 3:** E quando ele é retirado do monte, existe um controle da umidade?

**Resposta:** O BCA que não é utilizado no momento que sai da moagem, é depositado em um monte que fica do lado da caldeira. Ele não possui controle de umidade, fica ao relento.

**Pergunta 4:** Qual é a eficiência das caldeiras?

**Resposta:** Nos últimos dias estamos com uma baixa eficiência, devido alguns tubos com vazamento consumindo muito BCA, para gerar a quantidade de vapor necessário para atender toda a planta além da cogeração de energia para exportação.

**Pergunta 5:** Qual o destino das cinzas geradas no processo?

**Resposta:** As cinzas geradas são destinadas à fertilização do canavial.

**Pergunta 6:** Com relação às cinzas geradas, é feita alguma análise para verificar a qualidade da combustão?

**Resposta:** Sim, existe análises periódicas de controle de emissões de poluentes.

**Pergunta 7:** Qual o volume de BCA e de cinzas geradas durante a safra?

**Resposta:** A quantidade de BCA já foi um item que controlávamos. Porém depois que instalou-se a cogeração, e percebemos que o BCA era suficiente para atender a demanda de vapor exigida, o controle parou de ser feito. As cinzas não temos o volume controlado em números.

**Pergunta 8:** Quais são o tipo e modelo dos equipamentos de extração (moenda/difusor) e de geração de vapor (caldeira)?

**Resposta:** O difusor que é responsável pela extração do caldo é um Difusor modular Dedini, com capacidade de moagem de 18.000 toneladas de CA por dia. Para realizar a moagem final, existe um terno de moenda de 90 polegadas. Para geração de vapor são duas caldeiras da marca Dedini AT 200, com 67 bar de pressão e 200 toneladas de vapor por hora.

**Pergunta 9:** Como é a rota de destino das cinzas geradas após a combustão na caldeira, após ser captada pelo lavador de gases?

**Resposta:** Após a passagem dos gases pelo lavador de gases, as cinzas são conduzidas por canaletas até a piscina de decantação. Lá as cinzas são depositadas com duração em torno de 5 dias, até encher a piscina. A água é retirada e as cinzas são conduzidas para reforma de canaviais como fertilizantes.

**Pergunta 10:** Existe um indicador que mostra a quantidade de água utilizada no processo?

**Resposta:** A quantidade de água reutilizada na safra de 2016/17 foi de 2.494 mil m<sup>3</sup>.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Usina 02 possui um tratamento de resíduos de uma forma geral com similaridades do processo da Usina 01. O lavador de gases tem a função de capturar

os gases gerados pela combustão das caldeiras. O tratamento das cinzas é realizado em piscinas de decantação, que além de receber os resíduos do lavador de gases, recebe também resíduos vindos do difusor da moagem da CA.

A água presente na composição da CA é parcialmente retirada durante o processo de industrialização para obtenção do açúcar e do etanol das duas usinas. No início do processo ela está presente no BCA e necessita ser controlada, através da regulação dos ternos presentes na moenda e difusor. É através deste controle que se tem a umidade do BCA em condições para se obter uma melhor eficiência na combustão da caldeira e a diminuição bagaço não combusto presente nas cinzas. Em média a umidade do BCA das usinas está em 50%. Uma alternativa para melhorar a combustão na caldeira, seria a instalação de secadores, com o objetivo de diminuir a umidade do BCA através do processo de torrefação. Notou-se também na visita técnica realizada na usina 02, que o processo de tratamento do caldo não realiza a retirada das impurezas através de filtros rotativos. Com isso, toda as impurezas retiradas do decantador voltam para o difusor. Com isso, parte dessas impurezas é levada para combustão juntamente com o CBA, aumentando a quantidade de impurezas a ser retirada através do lavador de gases.

A Usina 02 possui um % de umidade do bagaço em torno de 50%, valores altos que comprovam a baixa eficiência das caldeiras na geração de vapor. Nas visitas técnicas realizadas na empresa, nota-se que o depósito do BCA é feito ao ar livre, quando não utilizado diretamente da extração do caldo. Nessa usina também não se observam equipamentos com objetivo de realizar a secagem do BCA. Uma sugestão seria a utilização de secadores, conforme descrito por (ARNAO, 2007) que aumentaria o desempenho das caldeiras diminuindo o consumo de BCA.

## 4.2 ETAPA 2 - CARACTERIZAÇÃO DO BCA E CINZAS PARA VALORIZAÇÃO COMO COPRODUTO

### 4.2.1 Perda ao fogo

Na Tabela 10 pode-se visualizar os valores de perda ao fogo das amostras coletadas.

Tabela 10 - Valores de perda ao fogo

Local de coleta da amostra	Usina	Nº das amostras	Média PF (%)
Soprador de fuligem	02	7	2,04
	02	8	
Monte cinzas piscina decantação	02	11	1,40
	02	12	
BCA Mulfla 800°C	02	9	0,75
	02	10	
Cinzas das caldeiras LF e de grelha	02	1	4,36
	01	2	
Areia caldeira LF	01	3	0,59
	01	4	
Cinzas LF	01	5	1,01
	01	6	
Cinzas das caldeiras LF e de grelha	01	13	4,98
	01	14	
	01	15	
Cinzas das caldeiras LF e de grelha	01	16	13,08
	01	17	
	01	18	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observando os resultados apresentados de todas as amostras analisadas (Tabela 8), observa-se que o valor médio é inferior a 12%, fato que pode indicar que estas amostras tenham características pozolânicas, de acordo com Montakarntiwong et al. (2013).. Nota-se também que as cinzas da caldeira de LF da Usina 01 obteve valor médio de perda ao fogo em torno de 1,01 %, levando a considerar que no local aonde foi retirado a amostra, somente existia a presença de areia, utilizada como agente do leito fluidizado para a combustão do BCA. As cinzas de BCA da mufla e a areia da caldeira de LF foram analisadas para se ter uma referência de valores com relação às outras amostras.

#### 4.2.2 Massa específica

Na Tabela 11 pode-se visualizar os valores de massa específica das amostras coletadas.

Tabela 11 - Valores de massa específica

<b>Amostra</b>	<b>Nº amostra</b>	<b>Usina</b>	<b>Massa específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>
Soprador de fuligem	8	01	2,5057
Monte cinzas piscina decantação	11	01	2,6363
BCA Mufla 800°C	10	01	2,6387
Cinzas das caldeiras LF e de grelha	1	02	2,5622
Areia caldeira LF	4	02	2,6449
Cinzas LF	6	02	2,6228
Cinzas das caldeiras LF e de grelha	13	02	2,4971
Cinzas das caldeiras LF e de grelha	17	02	2,3499

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores de massa específica das amostras de cinzas do BCA estão apresentados na Tabela 11, e estão próximos aos valores encontrados pelo estudo realizado por Lima et al. (2009) que afirmaram que existe a possibilidade de substituição da areia natural quartzosa, que tem massa específica em torno de 2,45 g/cm<sup>3</sup>, por cinzas de BCA, para fabricação de argamassas, desde que outras características seja atendidas.

#### 4.2.3 Fluorescência de raios x

Na Tabela 12 pode-se visualizar os valores do FRX1 das amostras coletadas.

Tabela 12 - Valores da fluorescência de raios x (FRX1)

Descrição da amostra	Usina	Nº amostra	Elementos majoritários >50%	Menor quantidade 5% < x < 50%	Elementos traço <5%
Soprador de fuligem	02	7	Si	Al, Fe, K, Ca	S, P, Ti, Mn, Zr, Ta, Zn, Sr, V, Ir
Monte cinzas piscina decantação	02	12	Si	Al, K	Ca, Fe, Ti, S, Sm, Zr, Zn, Mn, V, Cu
BCA Mulfla 800°C	02	10	Si	Al, Fe, K	Ca, P, Ti, S, Tm, Zr, Zn, Mn, V, Sr
Cinzas das caldeiras LF e de grelha	021	2	--	Si, Al, Fe, Ca, K	P, Ti, Ba, S, Zr, Mn, Cr, Sr, Zn, Cu
Areia caldeira LF	01	4	Si	Al	K, Fe, Ti, S, Sc, Pt, Ca, Mn, Zr, Sr
Cinzas LF	01	5	Si	Fe, Ca	K, Ti, P, S, V, Cr, Mn, Zn, Sr
Cinzas das caldeiras LF e de grelha	01	15	--	Si, Al, Fe, Ca, K	P, Ti, Mg, S, Ba, Mn, Zr, Cr, Ag, Sr, Zr, Cu
Cinzas das caldeiras LF e de grelha	01	18	--	Si, Al, Fe, Ca, K	Ti, P, Mg, Ba, S, Zr, Mn, Sr, Zn, Cr

Fonte: Elaborada pelo autor.

Somente uma das amostras, as cinzas das caldeiras de LF e grelha, apresentaram uma menor quantidade com relação às outras analisadas. Os resultados obtidos para a massa específica das amostras apresentaram bastante semelhanças. O maior valor foi do BCA da mufla, seguido pela cinza da caldeira de LF, a areia de LF, monte de cinzas fora da caldeira, soprador de fuligem, e as cinzas misturadas das duas caldeiras de LF e grelha.

Na Tabela 13 pode-se visualizar os valores do FRX2 da amostra 17.

Tabela 13 - Valores de fluorescência de raios x (FRX2) da amostra 17

<b>Óxidos</b>	<b>% massa</b>
SiO <sub>2</sub>	57,21592
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,46908
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,79776
CaO	4,35779
K <sub>2</sub> O	3,63029
MgO	3,42999
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,69840
TiO <sub>2</sub>	1,30043
SO <sub>3</sub>	0,30486
Cl	0,24014
MnO	0,05896
ZrO <sub>2</sub>	0,05394
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02921
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02345
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02103
ZnO	0,02051
SrO	0,01824

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na composição química determinada por FRX (Tabela 13), relativo à amostra 17, nota-se que a soma em massa de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> é de 79,47 %, não tendo portanto características de materiais aglutinantes pozolânicos cujos valores devem ser menores que 70% em massa, de acordo com as normas ISO 3812 Montakarntiwong et al. (2013). As somas dos compostos K<sub>2</sub>O, MgO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e CaO é de 14,07% em massa e corresponde à faixa de composição das cinzas na forma de cenosfera que é de até 32% (ROHATGI et al., 2009). A composição de silicato da amostra possui os elementos SiO<sub>2</sub> e SO<sub>3</sub> cuja soma de 57,24% é proveniente da areia e quartzo que vieram da lavoura, fixando-se na CA (AHMARUZZAMAN, 2010).

Na Tabela 14 pode-se visualizar os valores do FRX2 da amostra 18.

Tabela 14 - Valores de fluorescência de raios x (FRX2) da amostra nº 18

<b>Óxidos</b>	<b>% massa</b>
SiO <sub>2</sub>	51,79216
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,90352
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,21912
K <sub>2</sub> O	5,66990
CaO	3,60883
MgO	3,11953
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	2,52203
TiO <sub>2</sub>	1,59936
SO <sub>3</sub>	0,74350
Cl	0,55875
ZrO <sub>2</sub>	0,05400
MnO	0,05348
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03979

Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,03147
ZnO	0,02334
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02080
SrO	0,01885
CuO	0,01159

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na composição química determinada por FRX (Tabela 14), referente à amostra 18, nota-se que a soma em massa de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> é de 77,89 %, não tendo portanto características de materiais aglutinantes pozolânicos cujos valores devem ser menor que 70% em massa, de acordo com as normas ISO 3812 (MONTAKARNTIWONG et al., 2013). As somas dos compostos K<sub>2</sub>O, MgO, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e CaO é de 14,9 % em massa que corresponde à faixa de composição das cinzas na forma de cenosfera que é de até 32% (ROHATGI et al., 2009). A composição de silicato da amostra possui os elementos SiO<sub>2</sub> e SO<sub>3</sub> cuja soma de 52,53% é proveniente da areia e quartzo que vieram da lavoura, fixando-se na CA. (AHMARUZZAMAN, 2010).

Na Tabela 15 pode-se visualizar os valores do FRX2 da amostra 15.

Tabela 15 - Valores fluorescência de raios x (FRX2) da amostra nº 15

<b>Óxidos</b>	<b>% massa</b>
SiO <sub>2</sub>	46,34128
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,36326
K <sub>2</sub> O	6,72492
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,29577
CaO	5,20052
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3,24840
MgO	3,06791
TiO <sub>2</sub>	1,08081
SO <sub>3</sub>	0,73166
Cl	0,56242
MnO	0,07990
ZrO <sub>2</sub>	0,04650
Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02839
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02678
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02406
ZnO	0,02323
SrO	0,02157
CuO	0,01262

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na composição química determinada por FRX (Tabela 15), referente à amostra 15, nota-se que a soma em massa de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> é de 63,99 %, apresentando

portanto que por esta característica teria potencial de materiais aglutinantes pozolânicos cujos valores devem ser menor que 70% em massa, de acordo com as normas ISO 3812 (MONTAKARNTIWONG et al., 2013). As somas dos elementos  $K_2O$ ,  $MgO$ ,  $P_2O_5$  e  $CaO$  é de 18,4 % em massa e corresponde à faixa de composição das cinzas na forma de cenosfera que é de até 32% (ROHATGI et al., 2009). A composição de silicato da amostra possui os compostos de  $SiO_2$  e  $SO_3$ , cuja soma é de 47,07% é proveniente da areia e quartzo que vieram da lavoura, fixando-se na CA (AHMARUZZAMAN, 2010). Essa amostra também possui potencialmente características que podem potencializar como materiais aglutinantes pozolânicos: a porcentagem de massa de  $SiO_2$  que é de 46,34% portanto maior que 35%, a porcentagem de  $MgO$  é de 3,06%, sendo menor que o mínimo definido que é de 5%,  $SO_3$  cujo valor em massa percentual da amostra é de 0,73% e o mínimo exigido é de 3%. Somente na porcentagem em massa de álcalis da amostra  $K_2O$  de 6,72%, o valor não corresponde as características de materiais aglutinantes pozolânicos, pois é maior que o valor de 1,5%. (MONTAKARNTIWONG et al., 2013).

Na Tabela 16 pode-se visualizar os valores do FRX2 da amostra 16.

Tabela 16 - Valores da fluorescência de raios x (FRX2) da amostra nº 16

<b>Óxidos</b>	<b>% massa</b>
$SiO_2$	74,90601
$Al_2O_3$	8,30464
$Fe_2O_3$	3,82120
$CaO$	3,59275
$MgO$	2,59202
$K_2O$	2,40096
$P_2O_5$	1,70618
$TiO_2$	1,56338
$SO_3$	0,30928
$Cl$	0,21488
$ZrO_2$	0,03477
$MnO$	0,03034
$V_2O_5$	0,02686
$Cr_2O_3$	0,02341
$Eu_2O_3$	0,02334

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na composição química determinada por FRX (Tabela 16), referente à amostra 16, nota-se que a soma em massa de  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$  é de 87,04 %, não tendo portanto características de materiais aglutinantes pozolânicos cujos valores devem ser menor que 70% em massa, de acordo com as normas ISO 3812

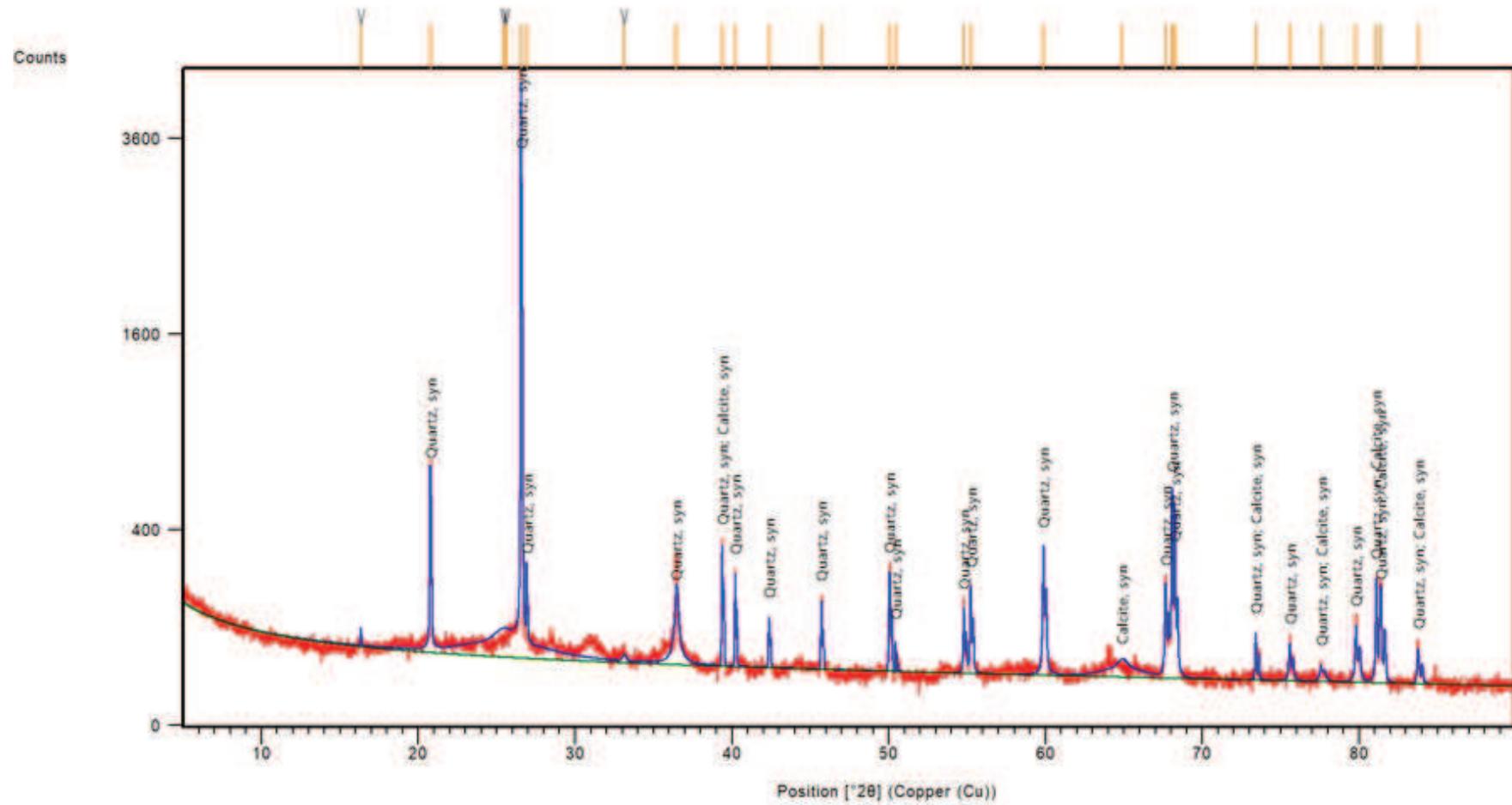
(MONTAKARNTIWONG et al., 2013). As somas dos compostos  $K_2O$ ,  $MgO$ ,  $P_2O_5$  e  $CaO$  foi de 10,286% em massa e corresponde à faixa de composição das cinzas na forma de cenosfera que é de até 32% (ROHATGI et al., 2009). A composição de silicato da amostra possui os compostos  $SiO_2$  e  $SO_3$  cuja soma é de 75,209% proveniente da areia e quartzo que vieram da lavoura, fixando-se na CA. (AHMARUZZAMAN, 2010).

#### **4.2.4 Difração de raios x**

Na Figura 35 e 36 pode-se visualizar as difrações de raios x das amostras nº 16 e 15 das cinzas do BCA. Observa-se do ponto de vista mineralógico que as cinzas da amostra nº 16 e 15 são compostas pelas seguintes fases minerais: quartzo ( $SiO_2$ ) e calcita ( $CaCO_3$ ). Esta observação está de acordo com a composição química das cinzas da amostra nº 16 e 15, ratificando também o estudo de Sandip et al. (2018) que constatou que a maior parte dos compostos das cinzas de BCA são o quartzo, óxidos de cálcio e cálcio.

Ao mesmo tempo, estas amostras mostram que as cinzas coletadas são essencialmente cristalinas, o que leva a conclusão, que apesar dos resultados de composição química discutidos anteriormente, elas não devem ter características pozolanas.

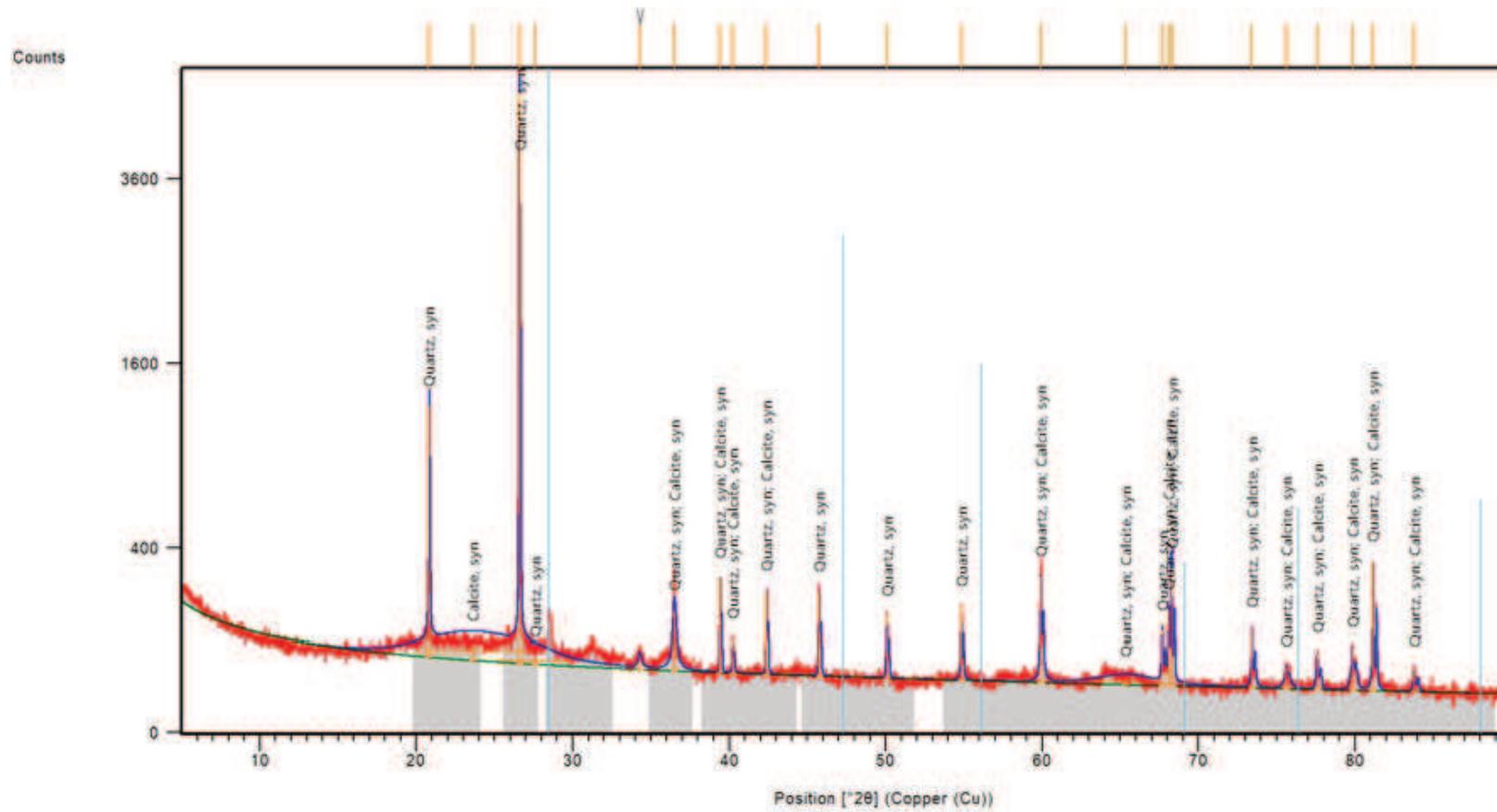
Figura 35 - Difratoograma de raios x da amostra 16 sy=  $CaCO_3$



Fonte: Elaborado pelo autor (2018)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 36 - Difratoograma de raios x da amostra 15

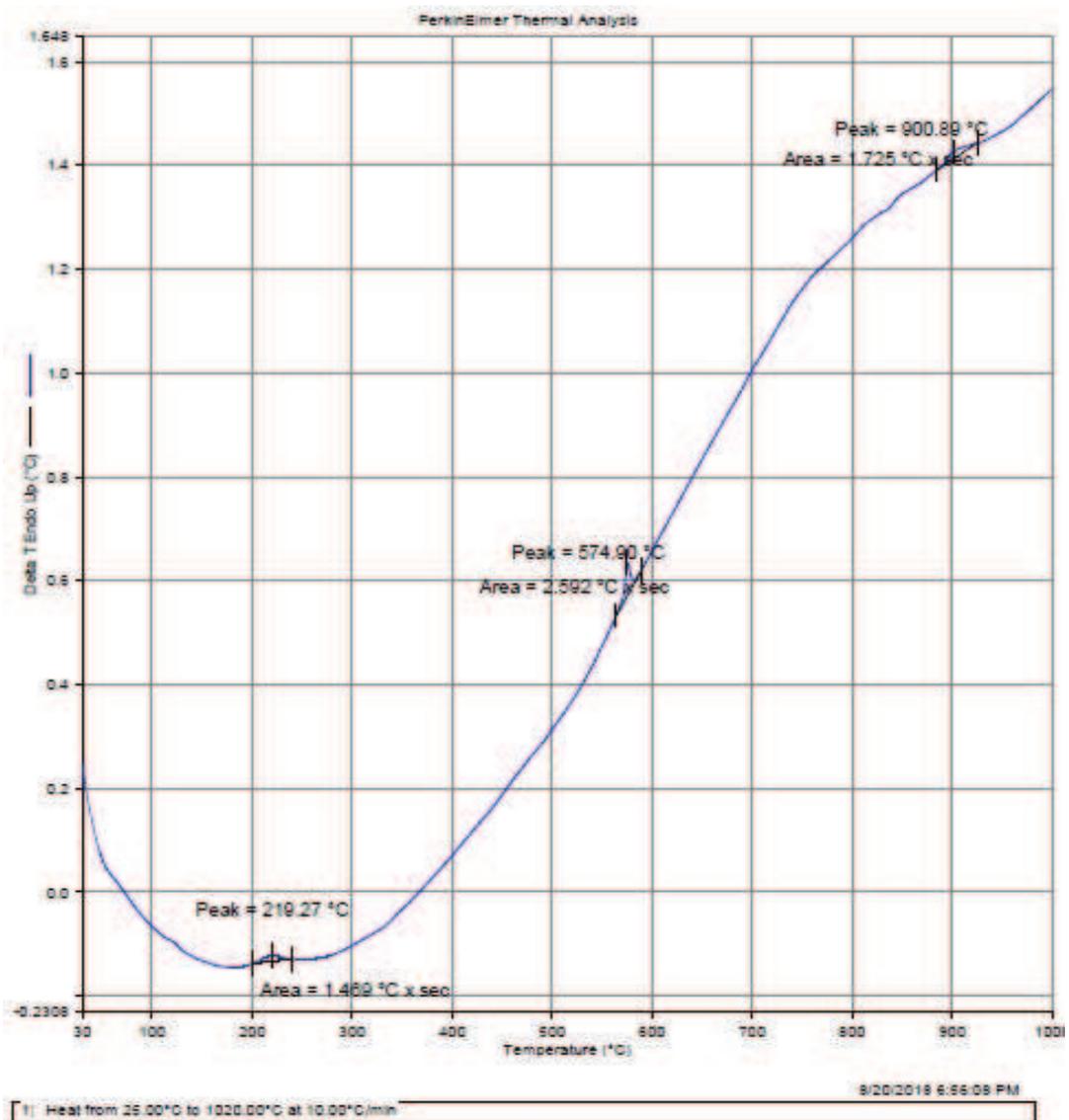


Fonte: Elaborada pelo autor.

### 4.3.5 Análise Térmica

Na Figura 37 é possível observar a curva da DTG da amostra nº 15 com rampa de temperatura de 20 a 1000°C, com aquecimento de 10°C/min, sob atmosfera de nitrogênio.

Figura 37 - Curva DTG para amostra nº 15



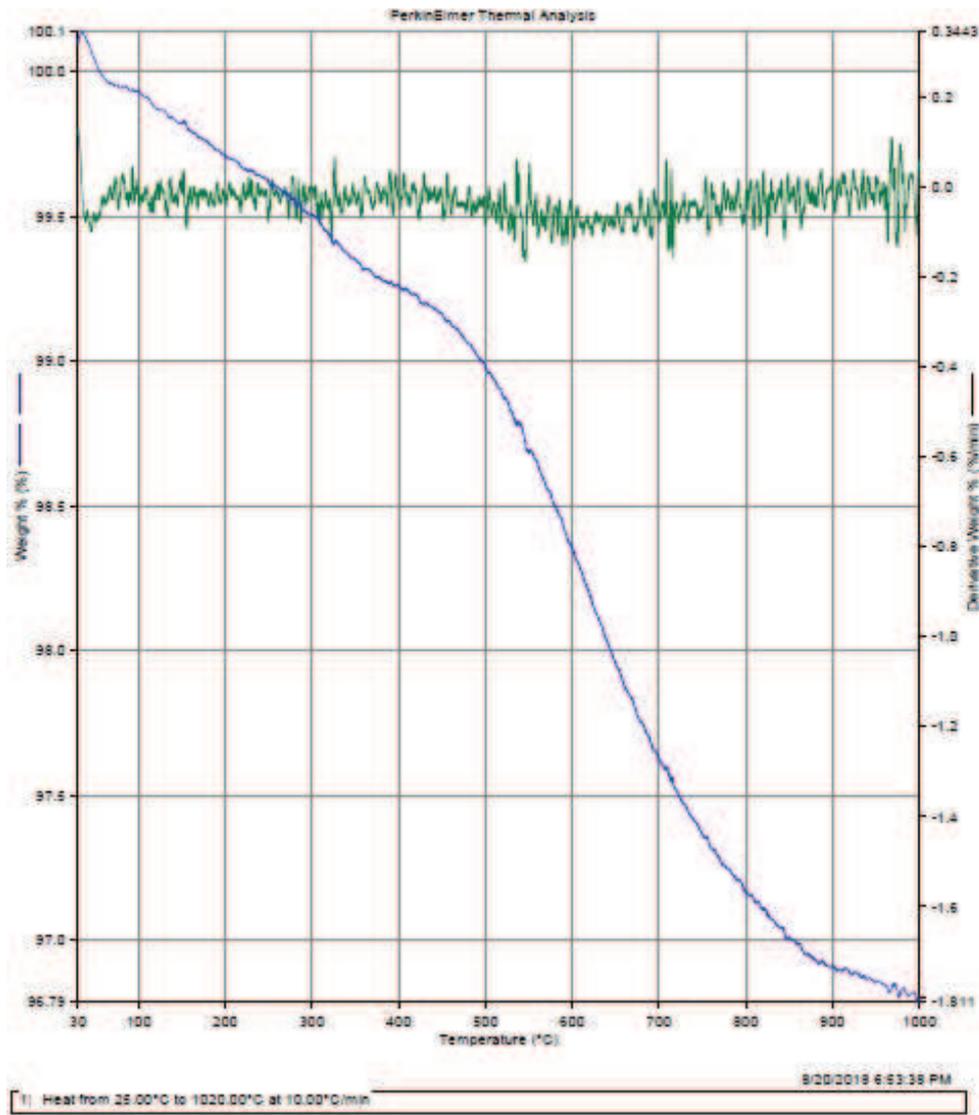
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 38, amostra nº 15, observa-se dois estágios característicos de degradação térmica, um pico endotérmico de perda de massa em torno de 180°C, e outro picos exotérmicos causados pela decomposição da hemicelulose, pico de

219,27°C e lignina, pico de 574,90°C, confirmando resultados relatados em estudo de Raad, et al. (2006). O gráfico também mostrou um pico de cristalização a 900,89°C.

Na Figura 39 é possível observar a curva da TG e DTG da amostra nº 15 com rampa de temperatura de 20 a 1000°C, com aquecimento de 10°C/min, sob atmosfera de nitrogênio.

Figura 38 – Curva TG x DTG para amostra nº 15

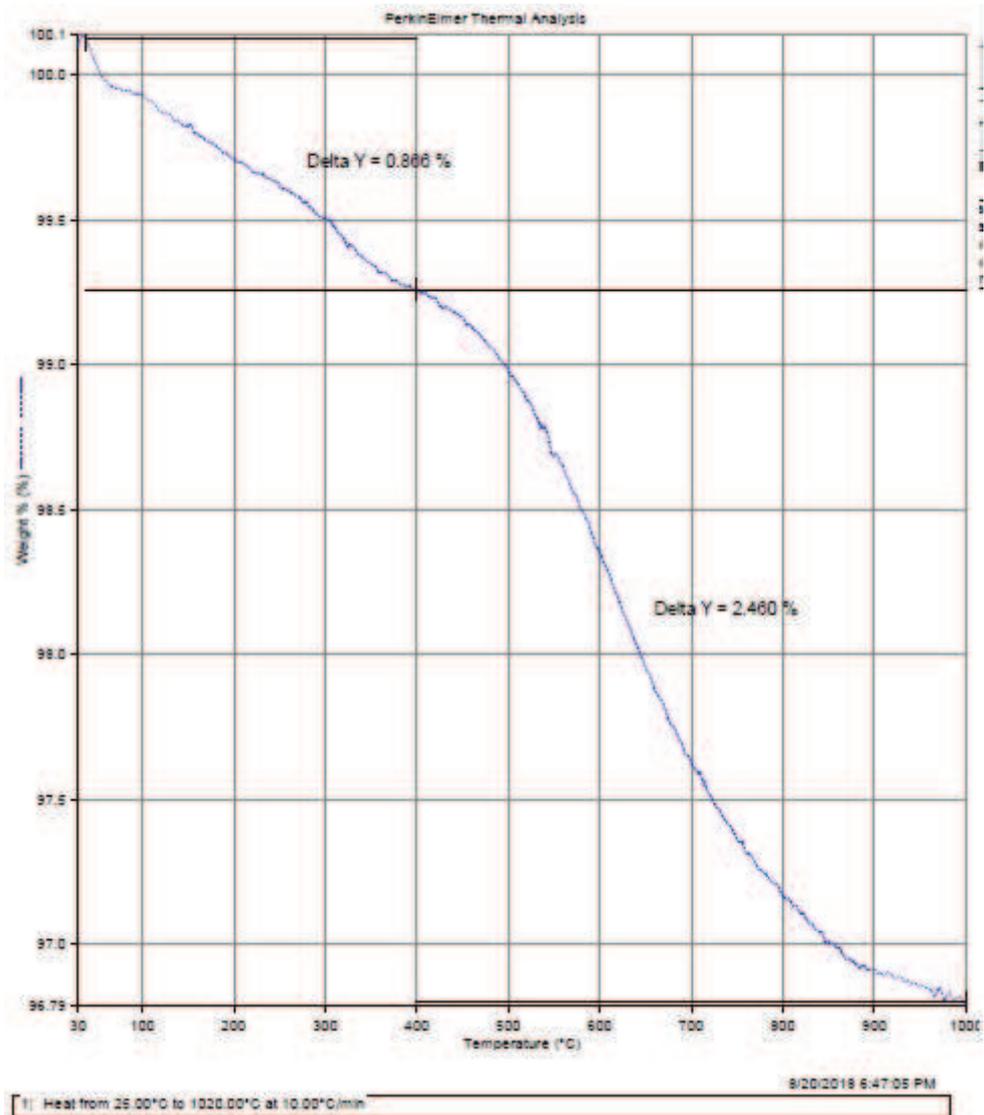


Fonte: Elaborada pelo autor.

No gráfico da Figura 39, mostra a perda de massa das cinzas com valores de 3,21 % a uma temperatura de 1000°C através da curva TGA. A curva DTG inicia com perda de massa, porém após os 50°C não é possível identificar as fases de degradação. Isto mostra a presença ainda de bagaço não combusto, ou de combustão incompleta.

Na Figura 40 é possível observar a curva da TG da amostra nº 15 com rampa de temperatura de 20 a 1000°C, com aquecimento de 10°C/min, sob atmosfera de nitrogênio.

Figura 39 - Curva TG para amostra nº 15

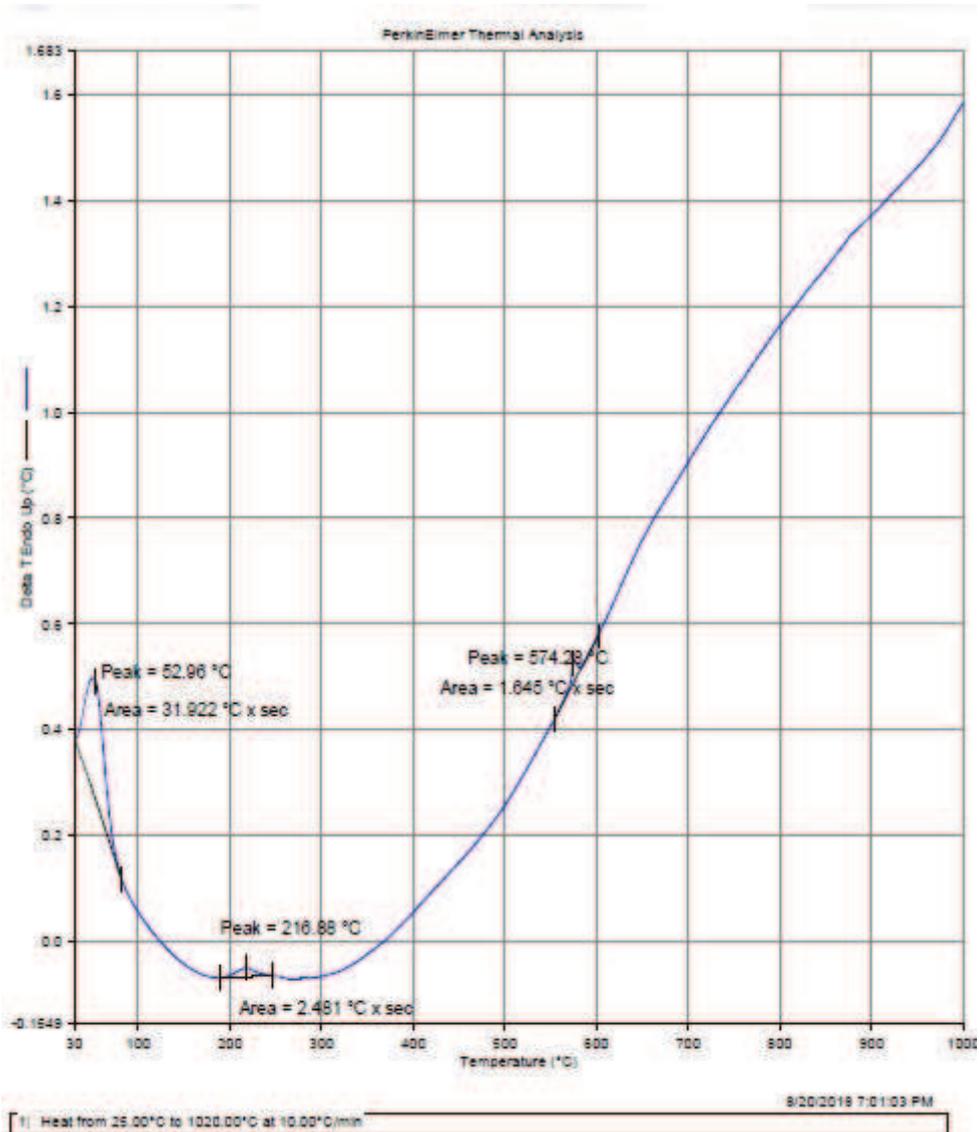


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 40 a variação de perda de massa até à degradação da hemicelulose (entre 240 a 350°C) houve uma perda de massa em torno de 0,86%, após essa temperatura, a perda de massa foi mais acentuada chegando a 2,46% a uma temperatura aproximada de 1000°C.

Na Figura 40 é possível observar a curva da DTA da amostra nº 17 com rampa de temperatura de 20 a 1000°C, com aquecimento de 10°C/min, sob atmosfera de nitrogênio.

Figura 40 - Curva DTA para amostra nº 17

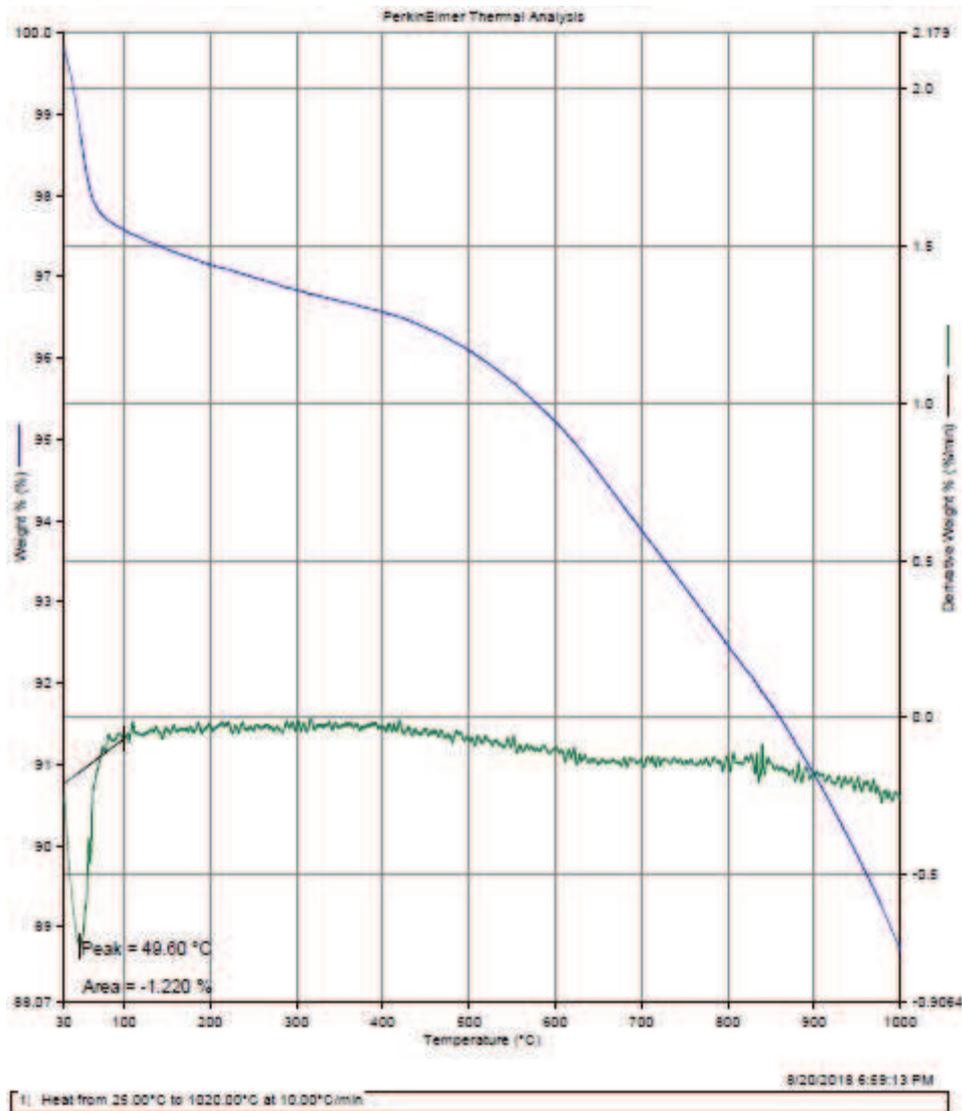


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na curva DTA (Figura 41), referente à amostra nº 17, verifica-se 3 reações exotérmicas, a primeira inicia a 52,96°C, decorrente de perda de água, no segundo pico, na temperatura de 216,88°C, observa-se a degradação da hemocelulose, a degradação da lignina é destacada no 3º pico, correspondente a uma temperatura de 574,28°C.

Na Figura 42 é possível observar a curva da TG e DTG da amostra nº 17 com rampa de temperatura de 20 a 1000°C, com aquecimento de 10°C/min, sob atmosfera de nitrogênio.

Figura 41 – Curva TG x DTG para amostra nº 17

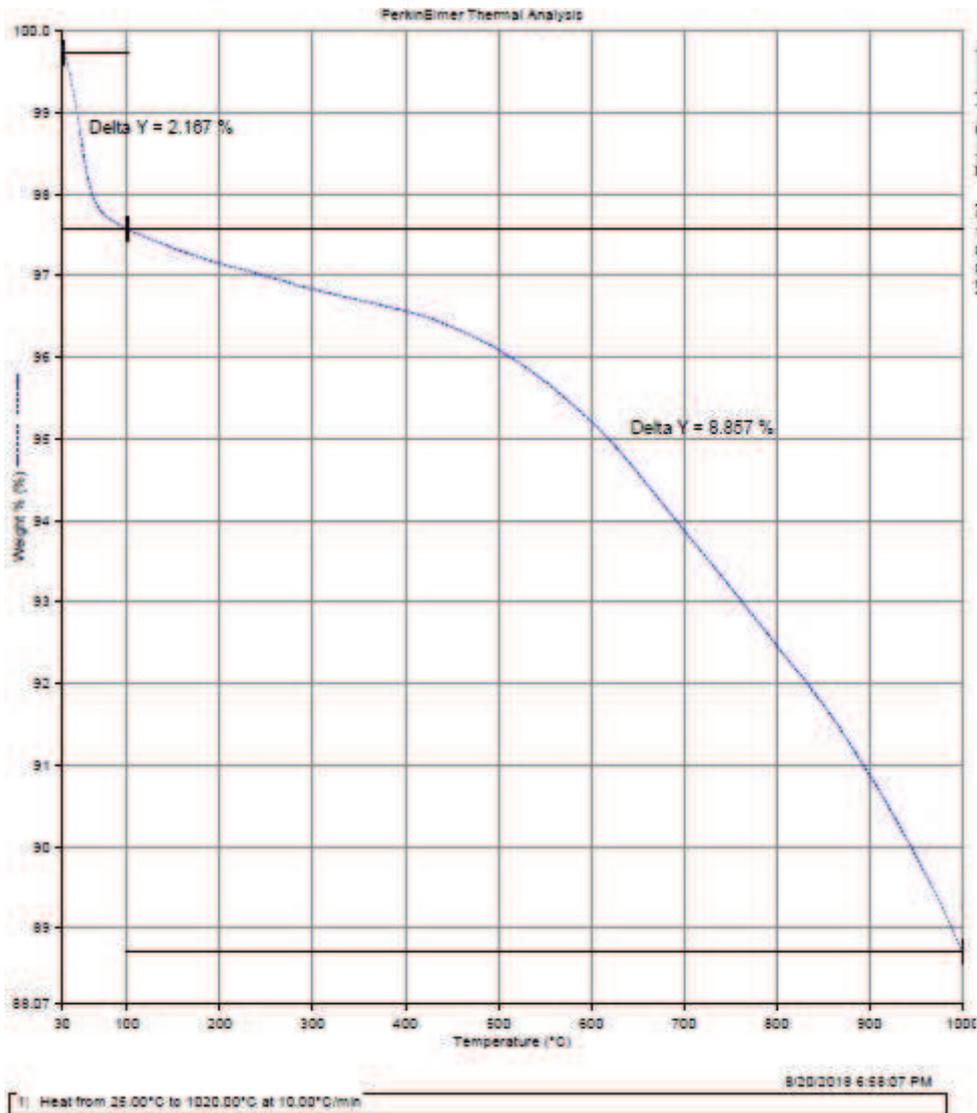


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 42 pode-se observar a sobreposição das curvas termográficas, destacando-se a reação exotérmica da Figura 41 a aproximadamente 50°C, nota-se também uma perda de material acentuada nessa temperatura.

Na Figura 43 é possível observar a curva da TG da amostra nº 17 com rampa de temperatura de 20 a 1000°C, com aquecimento de 10°C/min, sob atmosfera de nitrogênio.

Figura 42 - Curva TG para amostra nº 17



Fonte: Elaborada pelo autor.

A variação de perda de massa da amostra nº 17, da Figura 43, foi de 2,167%, correspondente nesta faixa de um pico de 52,96°C, e a partir deste valor de temperatura, houve uma perda de massa de 8,857%.

### 4.3.6 Carbono Total

Na Tabela 17 pode-se observar os valores de carbono total das cinzas analisadas.

Tabela 17 - Determinação de carbono total

<b>Amostra nº</b>	<b>Descrição</b>	<b>Massa cadinho (g)</b>	<b>Carbono %</b>	<b>Enxofre %</b>
11	Cinzas caldeiras LF e Grelha	0,6629	3,358	0,1392
12	Cinzas caldeiras LF e Grelha	0,7720	3,668	0,1780
13	Cinzas caldeiras LF e Grelha	0,7124	17,307	0,2818
14	Cinzas caldeiras LF	1,0156	0,2680	0,1454

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme apresentado na Tabela 17 de uma forma geral, os valores determinados de porcentagem de carbono são baixos, comprovando que existe combustão com qualidade segundo (CORDEIRO et al., 2008). Os resultados da determinação de carbono total constantes na Tabela 14 mostram que a amostra 13 foi a que teve o maior valor. Assim como ficou evidente no questionário realizado durante a visita técnica, a Usina 01 estava em fase de ajuste de processo quando foi colhida a amostra, evidenciando assim o alto valor de carbono nas cinzas. Destaca-se também o menor valor encontrado de percentual de carbono, correspondente à amostra 14, que foi de 0,268%. A caldeira de LF obteve o menor valor de percentual de carbono, comprovando maior eficiência com relação às caldeiras de grelha.



## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência das caldeiras através das cinzas geradas na combustão. Através das amostras analisadas, percebe-se que com relação à perda ao fogo, praticamente todas apresentaram valores considerados baixos, destacando o menor valor pertencente à caldeira de LF da Usina 01, resultado de maior eficiência da combustão. Na identificação dos elementos químicos presentes nas 4 amostras analisadas, somente uma amostra apresentou propriedades de materiais pozolânicos.

Com relação ao percentual de carbono total, as amostras apresentaram valores dentro do esperado em termos de eficiência de combustão das caldeiras, com destaque para a caldeira de LF que obteve o menor valor no comparativo entre os outros equipamentos.

Além das impurezas presentes no processo que prejudicam a qualidade das cinzas e diminui a vida útil de equipamentos e componentes, outro fator que deve ser considerado é a quantidade de água utilizado no processo para eliminação dos gases, fato esse que poderia ser evitado com a utilização de novas tecnologias. Além dos equipamentos existentes hoje no processo, como filtros rotativos, filtros prensa, peneira rotativa, exaustores nas mesas alimentadoras, o mercado já possui outros projetos com o objetivo de diminuir a quantidade de impurezas oriundas no mercado tendo como exemplos os filtros membranas. Com relação à utilização de água para eliminar a emissão de gases da combustão na caldeira, uma alternativa seria a adoção de filtros mangas para coletar as cinzas.

O BCA também contribui negativamente para a combustão quando se analisa o percentual de umidade. A eficiência da caldeira é muito afetada quando existe uma variação na moagem da CA. Uma solução para essa variação seria a utilização de pré-aquecedores instalados no processo anterior à combustão, presentes nas esteiras de alimentação das caldeiras.

Com relação à utilização da água no processo, observa-se que o circuito fechado da Usina 01, que utiliza uma ETALG para reutilizar a água e retirar as cinzas e outras impurezas do lavador de gases, mostra ser um processo mais ecoeficiente do que o tratamento da Usina 02, que trata as águas residuais do lavador de gases em piscinas de decantação.

Com relação ao rendimento das caldeiras das duas usinas, verifica-se que existe uma carência muito evidente de processo. O BCA que é o combustível das caldeiras chega através das esteiras transportadoras com a umidade muito elevada, prejudicando diretamente o processo de combustão. Sugestões de melhorias são apresentadas visando a diminuição dessa variável tão importante para o desempenho correto e produtivo do vapor gerado e utilizado no processo.

## REFERÊNCIAS

- ABBASI, Tasneem; SA., ABBASI. Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. **Renew Sustain Energy, Elsevier**, v. 14, p. 919-937, 2010.
- AHMARUZZAMAN, M. A review on the separated by density gradient centrifugation. **Fuel**. n.80, v. 800, 2001.
- AHMARUZZAMAN, M. A review on the utilization of fly ash. **Progress in energy and combustion science**. n. 36, v. 327, 2010.
- AUSTRALIAN INSTITUTE OF ENERGY (AIE). Biomassa. Disponível em <[http://www.aie.org.au/AIE/Documents/FS8\\_BIOMASS.pdf](http://www.aie.org.au/AIE/Documents/FS8_BIOMASS.pdf). 2017>. Acesso em: 29 maio. 2017.
- ANDRADE, L.P.. 2014. Eficiência energética: caminho para reduzir custos e emissões. **Petro&química**. Edição 359, 2014.
- ARNAO, Juan Harold Sosa. **Caldeiras aquatubulares de bagaço -estudo do sistema de recuperação de energia**. Tese de doutorado apresentada à comissão de pós graduação da faculdade de engenharia mecânica, como requisito para obtenção do título de doutor em engenharia mecânica na Universidade Federal de Campinas – UNICAMP. SP. 2007.
- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E PETRÓLEO (ANP). Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2016. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/?dw=78135>. Acesso em: 31 mar. 2017.
- BACH, Q.-V; SKREIBERG, O. Upgrading biomass fuels via wet torrefaction: a review and comparison with dry torrefaction. **Renewable Sustainable Energy** . v.54, p.665-677. 2016.
- BALAT, M. et al. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. **Energy convers manage**. v. 50, p.3147-3157. 2009.
- BAPTISTA, Antonio Ssampaio. Introdução à gestão de processos de geração de energia na indústria sucroenergética. Universidade de São Paulo USP. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Disponível em <[https://mbauspesalq.com/cursos/agronegocios/Downloads/0110500%20Gestao%20de%20Agronegocios%20e%20Bioenergia,%2013\\_julho\\_2016,%20Prof.%20Antonio.pdf](https://mbauspesalq.com/cursos/agronegocios/Downloads/0110500%20Gestao%20de%20Agronegocios%20e%20Bioenergia,%2013_julho_2016,%20Prof.%20Antonio.pdf). 2016>. Acesso em 03/04/2017.
- BARBOSA, R.; LAPA, N.; LOPES, H; GUNTHER, A.; DIAS, D.; MENDES, B. Biomass fly ashes as low-cost chemical agents for Pb removal from synthetic and industrial wastewaters. **Journal of colloid and interface science**. v.424, p.27-36, 2014,
- BARTOLOTTO, Carlos Filho. **Aumento da eficiência e produção de vapor com estudo de caso de uma caldeira aquatubular**. Santos : Dissertação mestrado em engenharia mecânica - Universidade Santa Cecília, 2015.

BASU, M., et al. 2009. Potential fly ash utilization in agriculture: a global review. **Progress in natural science**. v.19, p.1173-1186, 2009.

BEGA, Rodrigo Merighi. **Aplicação de cinza do bagaço de cana-de-açúcar em latossolo cultivado com cana-de-açúcar**. Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP- Campus de Jaboticabal, para a obtenção de título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal). São Paulo , 2014

BLISSET, R. S.; ROWSON, N. A. A review of the multi-component utilizations of coal fly ash. **Elsevier: Fuel**. v.97,p.1-23. 2012.

BOTELHO, Manoel Henrique Campos; BIFANO, Hercules Marcelo;. Operação de caldeira. **Editora Blucher**. ed.1, 2011.

BRASIL. Governo do Brasil. Infraestrutura. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/12/brasil-e-destaque-global-no-uso-de-biomassa>>. Acesso em 03/07/2018.

BRECCIA, J.D.; BETTUCCI, L.; PIAGGIO, M., SINERIZ, F. Degradation of sugar cane bagasse by several white-rote funge. **Acta Biotechnol**. v.17, p.177-184. 1997.

BRUMAZI. BRUMAZI SOLUÇÕES INDUSTRIAIS. Disponível em: <http://www.brumazi.com.br/produtos/sistema-de-extracao-do-caldo-moenda-8/>. Acesso em: 8 abril. 2018.

CACURO, Thiago A.;WALDMAN, Walter Rogério. **Resumos do VIII congresso de microscopia de materiais**. Campinas, 2014.

CALDEMA SERTÃOZINHO. Disponível em <<https://www.caldema.com.br/produtos/componentes/grelhas>>. Acesso em: 4 jul. 2018.

CAPUTO, Antonio C.; et al. Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants. **Elsevier: Biomass Bioenergy**. v.28,p.35-51, 2005.

CARDONA, Carlos Ariel; QUINTERO, Júlían A.; PAZ, Imilce Castro. Production of bioethanol from sugarcane bagasse: status and perspectives. **Bioresource Technology**. 2010

CARRIM, Aysha Jussara Ivonilde. **Produção e avaliação físico-química, microbiológica e ecotoxicológica de biodiesel metílico de óleo residual de fritura (ORF)**. Tese apresentada a Universidade Federal de Goiás, como parte das exigências do Programa de PósGraduação em Ciências Ambientais, para a obtenção do Título de Doutor. Goiânia : Tese em ciências ambientais - Universidade Federal de Goiás, 2016.

COGEN. Associação da indústria de cogeração de energia. Disponível em <<http://www.cogen.com.br/cogerao/conceito-e-tecnologias>>. Acesso em: 25 abril. 2018.

COLOMBRES, Frederico J. Franck., GOLATO, Marcos A.; MORALES, Walter D.. Monitoreo de un sistema de secado de bagazo acoplado a una caldera en un ingenio

de México. Tucumán : **Revista Industrial y Agrícola de Tucumán, versión On-line**. v.87,e.2, 2010.

CORDEIRO, Guilherme Chagas; TOLEDO FILHO, Romildo Dias; TAVARES, Luis Marcelo; FAIRBAIN, Eduardo de Moraes Rego. Pozzolany activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in portland cement and lime mortars. **Elsevier: Cement & concret composites**. v.30, p.410-418, 2018.

DEEPTHI, M. V.;SAILAJA, R. R. N.; SHARMA, M.; ANANTA, P.. et al. 2010. Mechanical and thermal characteristics of high density polyethylene fly ash cenospheres composites. **Materials and design**. v.31, p.2051-2060, 2010.

DENG, Jean; KUANG, Jiang-hong; LUO, Yong-hao; Wang, Gui-jun; ZHANG, Yun-liang. Pretreatment of agricultural residues for co-gasification via torrefaction. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** v.86, p.331-337. 2009.

DI PAULA, Marcos Oliveira; TINOCO, Ilda de F. F.; Rodrigues, Conrado de S.; DA SILVA, Elizabeth N.; SOUZA, Cecília de F. Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de substituição parcial de cimento Portland. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.13, n.3, p.353-357. 2009.

DOS SANTOS, Moacir L.; DE LIMA, Omar; NASSAR, Eduardo J.; CIUFFI, Katia J.; CALEFFI, Paulo S. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. *Química Nova*, 2011.

EISTEIN, Dan; WORRELL, Ernst; KHRUSHCH, Marta. Steam systems in industry: energy use and energy efficiency improvement potentials. **Lawrence Berkeley National Laboratory**, 2001.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (ENERGIA) Resultados de 2015. Resenha energética brasileira. Disponível em <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/91108841/1+-+Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira/f9d34960-a6b9-4aff-b58f-bd3a8204a2be;jsessionid=BB006231E837AC861D3390E3705B8D7D.srv155?versio n=1.0>>. Acesso em: 2 jul. 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Anuário estatístico de energia elétrica 2016. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/sites-en/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20EI%C3%A9trica%202016.pdf>>. Acesso em: 2 jul. 2018.

FAAIJ, André. Modern biomass conversion technology. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**. v.11, p. 343-375. 2006.

FOGLIATO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. Confiabilidade e manutenção industrial. **Editora Elsevier ABEPRO**. 2009.

GARG, R. N.; PATHAK, H.; DAS, D. K.; TOMAR, R. K..Use of Flyash And Biogas Slurry For Improving Wheat Yield And Physical Properties Of Soil. **Environmental Monitoring and Assessment** . v.107, p. 1-9, 2005.

GLOBAL ENERGY ASSESSMENT (GEA). Toward a sustainable future. Laxenburg, Austria : Cambridge University Press, Cambridge UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis. Disponível em <http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/Flagship-Projects/Global-Energy-Assessment/GEA-Summary-web.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2018.

GOLDEMBERG, José; COELHO, Suani Teixeira; GUARDABASSI, Patrícia. The sustainability of ethanol production from sugarcane. **Elsevier: Energy Policy**. v.36, p. 2086-2097. 2008.

GOMEZ-BAREA, A.; ARJONA, R.; OLLERO, P. Pilot plant gasification of olive stone: A technical assessment. **Energy and fuels**. v.19, p.598-605, 2005.

GONZÁLEZ, Aixa; NAVIA, Rodrigo; MORENO, Natalia. Fly ashes from coal and petroleum coke combustion: current and innovative potential applications. **Waste management & research**. 2009

GU, J.; WU, G.; ZHAO, X. . Preparation of high damping fly ash/epoxy composites. **Gongneng Cailiao/Journal of functional material**. p.764-766, 2007.

GUHANATAHN, S.; SAROJA, Devi M.; MURUGESAN, V. 2001. Effect of coupling agents on the mechanical properties of fly ash/polyester particulate composites. **Journal applied polymer science**. v.82,p.1755-1761. 2001.

HPB SISTEMAS DE ENERGIA LTDA. Disponível em <http://www.hpbenergia.com.br/produtos/>. Acesso em: 5 jul. 2018.

HWANG, J. Y.; SUN, X.; LI, Z. Unburned carbon from fly ash for mercury adsorption: I. **Journal of minerals & materials characterization & engineering**. v.1,n.1.p.39-60, 2002.

JAFARI, Mohammad Javad; GHASEMI, Roohollah; MEHRABI, Yadollah; YAZDANBAKHSI, Ahmad Reza. Influence of liquid and gas flow rates on sulfuric acid mist removal from air by packed bed tower. **Iranian J Environ Health Sci Eng**. v.9. 2012.

JALA, S.; GOYAL, D. Fly ash as a soil ameliorant for improving crop production - a review. **Bioresour technol**. v.97, p. 1136-1147, 2006.

KLASON, Torbern. **Modelling of Biomass Combustion in Furnaces**. Doctoral Thesis. Division of fluid mechanics. Department of energy science Lund Institute of Technology. Lund. Sweden. 2006.

KUMAR, K. V.; RAMAMURTHI, V.; SIVANESAN, S. Modeling the mechanism involved during the sorption of methylene blue onto fly ash. **Journal of colloid and interface science**. v.284, p.14-21. 2005

LIMA, Sofia Araujo; SALES, Almir; MORETTI, Juliana Peterman. Resumos do VI Congresso Internacional sobre patologia e reabilitação de estruturas. 2010.

LIU, Zhijia; JIANG, Zehui; HU, Wanhe; MI, Bingbing. Investigating combustion behaviors of bamboo, torrefied bamboo, coal and their respective blends by thermogravimetric analysis. **Renewable Energy**. v.87,p.346-352. 2016.

LORA, Electo Eduardo Silva; NASCIMENTO, Marco Antonio Rosa. Geração termelétrica - planejamento, projeto e operação. 2004, v. 1 e 2.

LORA, Electo Eduardo Silva; ANDRADE, Rubenildo Vieira. Renewable and Sustainable Energy Reviews. **Energy Policy**. v.13, p.703-932, 2009.

LYND, L.R.; VAN, Zyl W.H.; McBRIDE, J.E.; LASER, M. Consolidated bioprocessing of cellulosic biomass: an update. **Current Opinion in Biotechnology**. v.16, p.577-583, 2005.

MACASKILL, C.; SEXTON, M.J.; GRAY, B.F. A reaction-diffusion model of stored bagasse. **The Anziam Journal**. v. 43,p.13-34, 2001.

MACEDO, Pamela Camargo. Dissertação de mestrado - **Avaliação do desempenho de argamassas de cinza de bagaço de cana-de-açúcar**. Universidade Estadual Paulista - UNESP - Faculdade de engenharia de Ilha Solteira SP. 2009.

MADANAYAKE, Buddhike Neminda; GAN, Suyin; EASTWICK; NG, Hoon Kiat. Thermochemical and structural changes in *Jatropha curcas* seed cake during torrefaction for its use as coal co-firing feedstock. **Energy**. v.100,p.262-272. 2016.

MAKELA, Mikko; BENAVENTE, Verónica; FULLANA, Andrés. Hydrothermal carbonization of industrial mixed sludge from a pulp and paper mill. **Bioresource Technology**. v.200,p.444-450. 2016.

MEGEN. SERTÃOZINHO SAO PAULO BRASIL. Disponível em:<  
<https://megen.com.br/comercio-tratamento-caldo-evaporacao>>. Acesso em: 25 maio. 2018.

MONTAKARNTIWONG, Kawee; CHUSILP, Nuntachai; TANGCHIRAPAT, Weerachart; JATURAPITAKKUL, Chai. Strength and heat evolution of concretes containing bagasse ash from thermal power plants in sugar industry. **Material and Design**. v.49. p.414–420. 2013

NATH, D.; BANDYOPADHYAY, S.; YU, A.; ZENG, Q.; DAS, T.; BLACKBUM, D.; & WHITE, C. Structure-property interface correlation of fly ash-isotactic polypropylene composites. **Journal of material science**. v.44, p.6078-6089, 2009.

NDIBE, C.; MAIER, J.; SCHEFFKNECHT, G. Combustion, cofiring and emissions characteristics of torrefied biomass in a drop tube reactor. **Biomass Bioenergy**. v.79, p.105-115, 2015.

NOVACANA.COM. Etanol, processo de fabricação do etanol. Disponível em <https://www.novacana.com/etanol/fabricacao>. Acesso em: 6 out. 2017.

ONDREY, Gerald. The path to biorefineries. **Chemical Engineering**. v.113, pp.27. 2006.

ORANG, Nas; HONGHY, Tran. Effect of feedstock moisture content on biomass boiler operation. **Tappi Journal**, v.14, p.629-637, 2015.

PAULINO, Janaina; ZOLIN, Cornélio A.; BERTONHA, Altair; FREITAS, Paulo S. L.; FOLEGATTI, Marcos V. Estudo Exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo II. Características da cana de açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.15, n.3; p.244-249. 2011.

PETRUCCI, Eladio G. R. 2001. **Concreto de cimento Portland**. 2001.

QUANG-VU, B.; KHANH-QUANG, T.; SKREIBERG, O. Accelerating wet torrefaction rate and ash removal by carbon dioxide addition. **Fuel Processing Technology**. v.140, p.297-303. 2015.

RAGAUSKAS, Arthur; WILLIAMS, Charlotte K.; DAVISON, Brian H.; BRITOVSEK, George. The path forward for biofuels and biomaterials. **Science**. v.311, p.484-489, 2006.

RAAD, Jardim T.; PINHEIRO, P.C.C.; YOSHIDA, M.I. Equação geral de mecanismos cinéticos da carbonização do Eucalyptus. **Cerne**, Lavras, v.12, n.2, p.93-106, 2006.

RAJ, N.Thilak; INIYAN, S.; GOIC, Ranko. 2011. A review of a renewable energy based cogeneration technologies. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**. v.15, p.3640-3648, 2011.

RENDEIRO, Gonçalo. Combustão e gaseificação de biomassa sólida. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. **Soluções energéticas para a Amazônia**. 193 p., 2008.

REZAYAIAN, John; CHEMERINOFF, Nicholas .P. Cheremisinoff. Gaseification technologies - A primer for engineers and scientists. **CRC Press, Taylor & Francis**. 2005.

RODRIGUEZ, Edgar Fernando Cortés. 2014. **Determinação de eficiência de caldeiras de bagaço de cana de açúcar: identificação de oportunidades de melhoramento**. Tese de mestrado em energia. Santo André SP : Universidade Federal do ABC, 2014.

ROHATGI, Pradeep K.; MATSUNAGA, Takuya; GRUPTA, Nikhil. Compressive and ultrasonic properties of polyester/fly ash composites. *Journal of material science*. v.44, p.1485-1493. 2009.

SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E. A.; DEMIIRBAS, A.; HOSSAIN, M. S.; MECHILEF, S. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and sustainable energy reviews**. v. 15, p.2262-2289. 2011.

SANDIP, Langade; GILKE, Nandkumar; PATIL, Kashinath. Bagasse Ash for Manufacturing Construction Products. *Materials Today: Proceedings*. v.5, p.19954-19962. 2018.

SANTOS, Fernando Alves. **Análise da aplicação da biomassa como fonte de energia elétrica**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo USP. Departamento de engenharia de energia e automação elétricas. São Paulo : Dissertação mestrado, 2012.

SANTOS, M. R.;FORMAGINI, S. 2008. Resumos da international ACI/CANMENT Conference on high performance concrete structures and materials. 2008.

SCHETTINO, Myrian Aparecida S.; HOLANDA, José Nilson F. Characterization of sugarcane bagasse ash waste for Its Use in Ceramic Floor Tile. **Procedia Materials Science**. v.8, p.190-196. 2015.

SEYE, Omar; CORTEZ, Luis Augusto Barbosa; GÓMEZ, Edgardo Olivares. Estudo cinético da biomassa a partir de resultados termogravimétricos. **Enc. Energ. Meio Rural**. 2003.

SENGUPTA, Shubhalakshmi; RAY, Dipa; MUKHOPADHYAY, Aniruddha. Sustainable materials: value-added composites from recycled polypropylene and fly ash using a green coupling agent. **Sustainable chemical engineering**. v.6, p.574-584. 2013.

SERMATEC. Evoluindo com o Brasil. Disponível em <[http://media.sermatec.com.br/uploads/produtos\\_arquivo/2\\_catalogo\\_sermateczanini\\_energia\\_2.pdf](http://media.sermatec.com.br/uploads/produtos_arquivo/2_catalogo_sermateczanini_energia_2.pdf)>. Acesso em: 8 jul. 2018.

SHAH, Abdul Karim; ALI, Zeenat Muhammad; LAGHARI, Abdul Jabbar; SHAH, Syed Farman Ali. Utilization of fly ash as low-cost adsorbent for the treatment of industrial dyes effluents - a comparative study. **Journal of engineering and technology**. v.2, 2013.

SILVA, Rosana Vilarim. 2003. Compósito de resina poliuretano derivada de óleo de mamona e fibras vegetais. Silva. Tese apresentada à Área interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Ciências e Engenharia de Materiais, São Carlos SP . 2003.

SMAR. SOLUÇÕES PARA INDÚSTRIAS. Disponível em: <<http://www.smar.com/brasil/industria/acucar-e-etanol>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

STUCHI, Gabriel Augusto Domingos; TACONELLI, Maurício; LANGHI, Vitor Augusto Bertollo. **Geração termelétrica: principais componentes e tipos de centrais termelétricas**. São Carlos : USP Escola de engenharia de São Carlos, 2015.

TEIXEIRA, Silvio Rainha; DE SOUZA, Agda Eunice; SANTOS, Gleyson Tadeu de Almeida; PENÃ, Angel Fidel Viche; MIGUEL, Álvaro Gil. Sugarcane bagasse ash as a potencial quartz replacement in the ceramic. **Journal of american ceramic society**. v.91, p.1883-1887. 2008.

UNICA. União da Indústria de cana de açúcar. Conquistas do setor sucroenergético na matriz energética brasileira. Disponível em:<<http://www.unica.com.br/faq>>. Acesso em: 5 fev. 2017.

UNICA. União das indústrias de cana-de-açúcar. Disponível em:<<http://www.unica.com.br/faq/maior produtor de cana-de-açúcar>>. Acesso em: 5 fev. 2017.

USP. EDISCIPLINAS USP. EXTRAÇÃO DO CALDO DE CANA-DE-AÇÚCAR. MOAGEM E DIFUSÃO. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4114464/mod\\_resource/content/1/a5\\_Extra%C3%A7%C3%A3o\\_caldo.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4114464/mod_resource/content/1/a5_Extra%C3%A7%C3%A3o_caldo.pdf). Acesso em: 12 maio. 2018.

KATARE, Vadusha Dattatraya; MADURWAR, M. V. Mangesh. Experimental characterization of sugarcane biomass ash – A review. **Construction and building materials**. v.152, p.1-15.2015.

VINSON, J. R.; SIERAKOWSKI, R. L. The behavior of structures composed of composite materials: Springer, Dordrecht. p.367. 2006.

WERPY, T.A.; HOLLAWAY, J.E.; WHITE, J. F.; PETERSON, G.; BOZZEL, J.; ADEN, A.; MANHEIM, A. Top value added chemicals from biomass. **Oral Presentation, the 27th symposium on biotechnology for fuels**. 2005.

## APÊNDICE A – RELATÓRIO TÉCNICO DE PRODUÇÃO

		RELATÓRIO TÉCNICO PRODUÇÃO					Safra: 2018
							Data: 25/09/2018
							Hora: 08:54 Pág.: 1
Descrição	Unidade	24/09/2018	Semanal	Quinzenal	Mensal	Acumulado	
<b>DADOS DE MOAGEM</b>							
Dias de Safra	-	1	1	9	24	177	
Horas Efetivas Moagem	h	23,500	23,500	136,140	440,830	3.505,340	
Horas Perdidas Moagem	h	0,50	0,50	79,86	135,17	742,66	
Tempo Aprov. Agroindustrial	%	97,92	97,92	63,03	76,53	82,52	
Tempo Aproveitado Indústria	%	97,92	97,92	94,17	94,25	93,07	
Tempo Aproveitado Agrícola	%	100,00	100,00	100,00	95,70	98,80	
Tempo Aproveitado Clima	%	100,00	100,00	68,86	86,59	92,65	
Tempo Perdido Chuva	h	-	-	40,133	40,133	207,201	
Cana Moída Total	t	13.892,160	13.892,160	72.905,760	241.439,300	2.137.940,081	
Cana Moída Hora	wh	591,16	591,16	535,52	547,69	609,91	
<b>SISTEMA DE PALHA</b>							
Tempo Aproveitamento SSP	%	0,00	0,00	6,87	55,76	64,65	
<b>PRODUÇÃO</b>							
Etanol							
Etanol Hidratado	L	1.096.153	1.096.153	6.138.524	21.016.751	121.972.886	
Etanol Anidro	L	391.719	391.719	1.664.461	3.922.709	64.021.044	
Etanol Absoluto	L	1.436.877	1.436.877	7.519.324	23.963.789	180.220.538	
<b>SUBPRODUTOS</b>							
Bagaço Produzido	kg	4.280.174	4.280.174	22.699.634	72.880.749	569.771.014	
Bagaço Sobre	kg	1.212.857	1.212.857	2.320.122	5.583.676	-7.781.181	
Bagaço Consumido	kg	3.067.317	3.067.317	20.379.512	67.297.073	577.552.195	
Torta	kg	0	0	0	0	0	
Potássio na Vinhaca	kg	20.593,27	20.593,27	89.556,24	276.438,80	2.444.855,49	
<b>SAÍDAS</b>							
Álcool							
Saída Etanol Hid. Venda	L	762.941	762.941	3.547.857	9.213.726	91.490.083	
Saída Etanol Hid. Consumo	L	-	-	-	-	-	
Saída Etanol Anidro Venda	L	518.204	518.204	4.042.041	8.681.476	37.670.319	
Saída Total Etanol	L	1.281.145	1.281.145	7.589.898	17.895.202	129.160.402	
<b>ESTOQUE</b>							
Etanol							
Estoque de Etanol Hidratado	L	333.212	333.212	2.590.667	11.803.025	31.636.605	
Etanol Hidratado Remanescente	L	-	-	-	-	1.355.863,00	
Estoque de Etanol Anidro	L	-126.485	-126.485	-2.377.580	-4.758.767	27.476.174	
Etanol Anidro Remanescente	L	-	-	-	-	1.231.610,00	
<b>DADOS DE MATÉRIA - PRIMA</b>							
Pel % Cana - PCTS	%	15,7100	15,7100	15,7113	16,1107	13,5890	
Fibra % Cana - PCTS	%	14,12	14,12	14,16	13,79	12,80	
Pureza % Cana - PCTS	%	87,74	87,74	87,45	87,53	85,11	
ART % Cana - PCTS	%	17,05	17,05	17,06	17,48	14,92	
AR % Cana - PCTS	%	0,5141	0,5141	0,5234	0,5244	0,6032	
ATR Cana - PCTS	kg/t	156,07	156,07	156,12	159,97	135,49	
Impureza Mineral - Total	kg/t	6,36	6,36	10,21	6,65	7,25	
Impureza Vegetal - Total	kg/t	116,30	116,30	104,11	99,97	98,65	
<b>DADOS DE EXTRAÇÃO</b>							
Índ. Preparo - Desfibrador(%)	%	89,69	89,69	89,53	89,46	89,72	
Pel % Bagaço	%	1,5623	1,5623	1,7763	1,5944	1,3220	
Umidade % Bagaço	%	51,62	51,62	51,89	52,02	50,01	
Art % Bagaço	%	1,6957	1,6957	1,9291	1,7308	1,4513	