

UNIVERSIDADE CATÓLICA DOM BOSCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM
CIÊNCIAS AMBIENTAIS E SUSTENTABILIDADE AGROPECUÁRIA

AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA DAS CALDEIRAS DE USINAS
SUCROALCOOLEIRAS E DESTILARIAS AUTÔNOMAS DE
MATO GROSSO DO SUL

Autor: Paulo Pereira de Souza
Orientadora: Marney Pascoli Cereda
Co-orientador: Denilson de Oliveira Guilherme



Campo Grande
Mato Grosso do Sul
Novembro – 2017

UNIVERSIDADE CATÓLICA DOM BOSCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM
CIÊNCIAS AMBIENTAIS E SUSTENTABILIDADE AGROPECUÁRIA

AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA DAS CALDEIRAS DE USINAS
SUCROALCOOLEIRAS E DESTILARIAS AUTÔNOMAS DE
MATO GROSSO DO SUL

Autor: Paulo Pereira de Souza
Orientadora: Marney Pascoli Cereda
Co-orientador: Denilson de Oliveira Guilherme

"Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E SUSTENTABILIDADE AGROPECUÁRIA, no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Ciências Ambientais e Sustentabilidade Agropecuária da Universidade Católica Dom Bosco - Área de concentração: "Sustentabilidade Ambiental e Produtiva Aplicada ao Agronegócio e Produção Sustentável".



Campo Grande
Mato Grosso do Sul
Novembro – 2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Biblioteca da Universidade Católica Dom Bosco – UCDB, Campo Grande, MS, Brasil)

S729a Souza, Paulo Pereira de
Avaliação de eficiência das caldeiras de usinas sucroalcooleiras e destilarias autônomas de Mato Grosso do Sul / Paulo Pereira de Souza; orientadora Marney Pascoli Cereda; coorientador Denilson de Oliveira Guilherme -- 2017
81 f. + anexos

Dissertação (mestrado em ciências ambientais e sustentabilidade agropecuária) – Universidade Católica Dom Bosco, Campo Grande, 2017.
Inclui bibliografias.

1. Biomassa 2. Energia renovável 3. Granulometria 4. Sílica I. Cereda, Marney Pascoli II. Guilherme, Denilson de Oliveira

CDD: 662.689



**AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA DAS CALDEIRAS DE USINAS
SUCROALCOOLEIRAS E DESTILARIAS AUTÔNOMAS DE MATO
GROSSO DO SUL**

Autor: Paulo Pereira de Souza

Orientadora: Profa. Dra. Marney Pascoli Cereda

Coorientador: Prof. Denilson de Oliveira Guilherme

TITULAÇÃO: Mestre em Ciências Ambientais e Sustentabilidade Agropecuária

Área de Concentração: Sustentabilidade Ambiental e Produtiva

APROVADO em 05 de setembro de 2017.

Profa. Dra. Marney Pascoli Cereda - UCDB
(Orientadora)

Prof. Dr. Denilson de Oliveira Guilherme – UCDB
(Coorientador)

Prof. Dr. Mauro Conti Pereira - UCDB

Profa. Dra. Fabiana Pereira de Sousa - UFMS

“Aprendi a viver contente em toda e qualquer situação, quando honrado ou humilhado, em escassez ou fartura de pão. Posso todas as coisas naquele que me fortalece”.

Apostolo Paulo – Filipenses 4.11-13

*Aos meus pais, Ítalo (in memória) e Aurea,
mulher guerreira, a quem devo muito do que conquistei.*

*À minha família,
Kátia, esposa, companheira e amiga de todos os momentos,
Priscila, Júnior e João Gabriel; Paulo Ricardo, Lorena e Emily;
Ana Caroline e Valentina, razão da minha vida,*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A minha orientadora Professora Dra. Marney Pascoli Cereda, pela orientação, apoio e dedicação.

Ao Professor Dr. Denilson de Oliveira Guilherme, pela co-orientação das análises estatísticas.

Aos Professores do Curso de Pós-graduação Agroambiental, pelos ensinamentos durante a realização do Mestrado.

Aos funcionários dos Laboratórios do CeTeAgro, Demeciano, Jéssica e Poliana, do Laboratório de Biosaúde, Natália, e da Secretaria do Curso de Pós-graduação Agroambiental, Daiane e Silvia, que no desenvolvimento das suas atividades, possibilitaram a realização deste trabalho.

A Universidade Católica Dom Bosco – UCDB, através da Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-graduação – PROP, por meio do Programa Permanente de Capacitação Docente, proporcionou o apoio financeiro para a realização deste trabalho.

Às Coordenações e Professores dos cursos de Engenharia de Controle de Automação, Computação, Elétrica e Mecânica, da UCDB, pelo apoio e estímulo na realização deste trabalho.

A todos os amigos do CeTeAgro, que entre um café, almoço e janta, me deram ideias, apoio e alegrias.

Ao Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI, que me proporcionou as condições necessárias para a realização deste trabalho.

Às indústrias sucroalcooleiras participantes do projeto, que disponibilizaram as amostras necessárias para o desenvolvimento das análises da pesquisa.

A Dra. Marli da Silva Garcia, pela intermediação junto às unidades sucroalcooleiras, obtenção e envio das amostras para a realização das análises.

A todos aqueles que participaram de forma direta ou indireta na construção deste trabalho.

SUMÁRIO

	Página
INTRODUÇÃO	17
OBJETIVO GERAL	19
Objetivo específico	19
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
Setor sucroalcooleiro.....	20
Morfologia da cana-de-açúcar.....	25
Bagaço de cana-de-açúcar	27
Composição do bagaço.....	29
Determinação da densidade.....	30
Determinação da granulometria	31
Determinação de silício do bagaço e das cinzas.....	32
Análise das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar	32
Caldeiras	33

Caldeira flamotubular	35
Caldeira aquatubular	36
Combustão	39
Eficiência térmica de caldeiras	45
Metodologia.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
CAPÍTULO I: Cinzas como parâmetro de eficiência para queima de bagaço em caldeira aquatubular.....	61
APÊNDICES.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição do bagaço.....	30
Tabela 2. Composição das cinzas do bagaço de cana	33

CAPÍTULO I

Tabela 1. Teor de umidade das amostras de Bagaço de cinco unidades sucroalcooleiras do Mato Grosso do Sul, comparadas com as amostras de Cinzas da Fornalha.....	69
Tabela 2. Densidade aparente das amostras de Bagaço, de cinco unidades sucroalcooleiras do Mato Grosso do Sul, comparadas com as amostras de Cinza da Fornalha.....	70
Tabela 3. Teor de cinzas como parâmetro de eficiência das amostras de Cinza do Bagaço comparadas com Cinzas da Fornalha em (g de cinzas 100g ⁻¹ em massa seca), após queimadas a 550°C por 5 horas.	72
Tabela 4. Teor de sílica como indicativo de eficiência das amostras de Cinzas do Bagaço comparadas com Cinzas da Fornalha em (mg de sílica 1000g ⁻¹ em massa seca), após queimadas a 550°C por 5 horas.	73
Tabela 5. Caracterização das amostras do Bagaço, das cinco unidades sucroalcooleira do Mato Grosso do Sul, pelo Diâmetro de Sauter (em mm), comparadas as amostras de Cinzas da Fornalha.	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa das regiões produtoras de cana-de-açúcar no Brasil.	21
Figura 2: Gráfico da Evolução Acumulada do PIB e do Consumo de Energia no Brasil.....	21
Figura 3: Oferta de Potência de Geração Elétrica – 2016.	22
Figura 4: Gráfico da Evolução da produção de cana-de-açúcar na região Centro-sul e Brasil safra 05/96 a 16/17.....	23
Figura 5: Gráfico da Evolução da produção de cana-de-açúcar.....	23
Figura 6: Mapa da localização das unidades produtoras de cana-de-açúcar no MS.....	24
Figura 7: Morfologia externa do colmo de cana-de-açúcar.....	25
Figura 8: Corte transversal do entrenó.	26
Figura 9: Composição química da cana-de-açúcar.	27
Figura 10: Etapas da colheita de cana-de-açúcar, moagem e bagaço.	28
Figura 11: Acréscimo anual de capacidade instalada pela biomassa, 2002-2019, Brasil (MW).....	29
Figura 12: Esquema de funcionamento de uma caldeira.....	34
Figura 13: Desenho esquemático de funcionamento de uma caldeira flamotubular.	36
Figura 14: Esquema de funcionamento de uma caldeira aquatubular	36

Figura 15: Desenho esquemático de funcionamento de uma caldeira aquatubular de usina sucroalcooleira com esteira rotativa.....	38
Figura 16: Evolução das Caldeiras aquatubulares de usinas sucroalcooleiras.	39
Figura 17: Esquema simplificado dos estágios de combustão dos sólidos.	41
Figura 18: Esquema do processo de aquecimento e secagem.....	41
Figura 19: Esquema de um processo de pirólise em uma partícula sólida.	43
Figura 20: Pontos de perdas de calor	47
Figura 21: Fluxograma para localização e especificação das caldeiras	51
Figura 22: Fluxograma da análise da eficiência da combustão.....	52

CAPÍTULO I

Figura 1. Imagem de desenho esquemático de caldeira aquatubular.....	65
Figura 2. Curvas de distribuição granulométrica das Cinzas da Fornalha e do Bagaço das unidades sucroalcooleiras A, B, D e E.....	76
Figura 3. Curvas de distribuição granulométrica das Cinzas da Fornalha e do Bagaço da unidade sucroalcooleira C.	77

LISTA DE ABREVIATURAS

APE	- Autoprodutores de Energia
Biosul MS	- Associação dos Produtores de Bioenergia de Mato Grosso do Sul
BRL	- Brazilian Real (ISO 4217 – Padrão internacional que define códigos de três letras para moedas correntes em todo o mundo).
CETESB	- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CIBO	- Council of Industrial Boiler Owners
CNT	- Confederação Nacional do Transporte
CONAB	- Companhia Nacional de Abastecimento
CONAMA	- Conselho Nacional do Meio Ambiente
c_{Par}	- calor específico médio do ar entre T _{CH} e T _R , [kJ/kg °C].
c_{Pa}	- calor específico da água no estado líquido, [kJ/kg o C]; e
c_{pv}	- calor específico médio do vapor entre as temperaturas T _{CH} e T _{Ref} [KJ/kg °C]
CV	- coeficiente de variação
D _s	- diâmetro de sauter [mm]
E.S.T	- extrato seco total
EPE	- Empresa de Pesquisa Energética
GEE	- Gases de Efeito Estufa
H	- entalpia total [Kj/kg]
h	- entalpia específica [kJ/kg]
h _a	- entalpia da água de entrada [kJ/kg]
h _v	- entalpia do vapor produzido [kJ/kg]
h _{lv}	- entalpia de vaporização da água na entalpia de referência [kJ/kg]
INPM	- Instituto Nacional de Pesos e Medidas
IPCC	- Intergovernmental Panel on Climate Change
K	- representa a somatória de todas as perdas associadas ao combustível, exceto as perdas pela chaminé.
\dot{m}_c	- vazão mássica de combustível [kg/s]

m_{GS}	- vazão mássica dos gases de combustão, [kg/kg de comb.];
m_p	- vazão média de água purgada, [kg/kg de comb.];
\dot{m}_v	- vazão mássica de vapor [kg/s]
m_c	- massa de carbono presente nas cinzas, [kg/kg de comb.]
m'_v	- vazão mássica de vapor formado na combustão e presente no combustível [kg/kg de comb.]
m_R	- massa de cinza obtida pela massa de combustível, [kg/kg de comb.]
MME	- Ministério de Minas e Energia
MW	- Megawatt
NR13	- Norma Regulamentadora 13
η	- eficiência térmica
η_{MD}	- eficiência pelo método direto
η_{MI}	- perdas totais
P	- energia perdida por unidade de combustível [kJ/kg]
PC	- poder calorífico do combustível [kJ/kg]
PCS	- poder calorífico superior [kJ/kg]
PCI	- poder calorífico inferior [kJ/kg]
P_{GS}	- perda de calor pela chaminé
pH	- potencial de hidrogênio iônico
P_p	- perda por purga
P_{TC}	- perda associada a temperatura das cinzas
P_{CC}	- perda associada ao combustível não convertido presente nas cinzas
Qu	- calor útil [kW]
Q_f	- calor fornecido pelo combustível [kW]
q_u	- calor útil (kW)energia útil por unidade de combustível [kJ/kg]
q_f	- energia fornecida pelo combustível por unidade de combustível [kJ/kg]
$R_{Teórica}$	- Relação estequiométrica ar-combustível [kg ar / kg GC]
SIN	- Sistema Integrado Nacional
s	- Desvio Padrão
T_{CH}	- Temperatura dos gases na chaminé, [°C]
T_p	- Temperatura de saturação da água na pressão da caldeira, [°C]
$T_{Ref.}$	- Temperatura de referência adotada, [°C]
UNICA	- União da Indústria de Cana de Açúcar
λ	- Coeficiente de excesso de ar na combustão.

RESUMO

Para sustentar o crescimento econômico projetado, estima-se que o Brasil necessitará de investimentos superiores a R\$ 380 bilhões no setor de geração de energia elétrica até 2022. O aumento da capacidade instalada deverá ocorrer não somente para suprir a demanda por energia futura, mas também para aumentar a segurança do sistema. Existe uma forte tendência mundial para que o aumento da demanda de energia seja atendida cada vez mais por fontes renováveis, portanto é esperado que parte considerável do aumento da capacidade instalada venha de fontes renováveis de biomassa. As agroindústrias brasileiras são grandes consumidoras de energia, em especial, vapor d'água saturado, usado para o processamento de matérias-primas de produtos industrializados. O vapor também é usado na cogeração de energia, sendo o complexo sucroalcooleiro brasileiro um grande gerador e consumidor de energia renovável, para a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, açúcar e energia. A produção de vapor neste setor se dá através de equipamentos chamados de "Caldeiras", também designados "Geradores de Vapor", que funcionam por meio da queima do bagaço da cana-de-açúcar, resíduo do processo de produção de açúcar e etanol. Para produzir vapor, o bagaço é aproveitado sendo queimado na fornalha da caldeira, onde são geradas cinzas, que indicam a condição real da usina e o desempenho da caldeira, que se operar sem eficiência adequada irá produzir resíduos não queimados. Portanto, a caracterização das cinzas pode ser um fator importante para estabelecer parâmetros de eficiência do aproveitamento dessa queima do bagaço. Este trabalho foca na avaliação de eficiência das caldeiras de usinas sucroalcooleiras e destilarias autônomas de Mato Grosso do Sul, produtoras de açúcar, etanol e energia. Três tipos de amostras foram coletadas em cinco unidades sucroalcooleiras de Mato Grosso do Sul. Foram amostras de cinzas da fornalha, cinzas do filtro úmido, e de bagaço, que foram analisadas em laboratório, também queimando-as em um forno mufla, e depois comparando as análises dessas novas cinzas obtidas. Os resultados da pesquisa foram organizados em forma de artigo ao final.

Palavras-chave: biomassa, cinzas, densidade, granulometria, sílica, umidade.

ABSTRACT

In order to sustain the projected Brazilian economic growth, there will be an estimated need of investments over of R\$ 380 billion in the electric power generation sector by 2022. The increase in installed capacity should occur not only to meet the demand for future energy, but also to increase system safety. There is a strong global trend to generate energy using renewable sources, so it is expected that a large part of the increase in installed capacity will come from renewable sources of biomass. Brazilian agribusinesses are large energy consumers, specially saturated water steam, used for raw materials processing in industrialized products. Steam is also used in energy cogeneration, with the Brazilian sugar-alcohol sector being both a large generator and consumer of renewable energy, used in the production of ethanol, from sugarcane and energy. This steam production occurs through "Boilers", also known as "Steam Generators", equipments that work by burning the sugarcane bagasse, a waste from the production of sugar and ethanol. To produce steam, the bagasse is burned in the furnace, generating ash, which indicates the actual condition of the plant and the boiler's performance, which may be operating with low efficiency, generating unburned waste. Therefore, ash characterization can be an important factor to establish efficiency parameters for the use this burning. This research targets the efficiency assesment five sugarcane plants in the state of Mato Grosso do Sul, which can produce sugar, ethanol and energy. From theirs boilers were collected and analyzed samples of furnace ash, wet filter ash and bagasse, which were later burned in a lab muffle furnace, comparing the analysis of their new obtained ashes. The results of this research organized as an article at the end.

Keywords: biomass, ash, density, granulometry, silica, humidity.

INTRODUÇÃO

As agroindústrias brasileiras consomem grande quantidade de vapor d'água saturado para o processamento de matérias-primas de produtos industrializados, e cogeração de energia. Entre os principais demandantes de vapor, estão os setores de processamento de alimentos e bebidas, celulose, sucroalcooleiro, petroquímico, entre outros.

A produção de vapor se dá através de equipamentos denominados “Caldeiras” também designadas “Geradores de Vapor”, que funcionam por meio da queima de combustíveis sólido, líquido e gasoso, sendo que as caldeiras mais utilizadas são movidas a biomassa. Outros modelos de caldeira utilizam energia elétrica e recuperação de energia.

O complexo sucroalcooleiro brasileiro é um grande gerador e consumidor de energia renovável, para a produção de etanol, açúcar e energia, sendo considerado mundialmente como o mais moderno. O setor tem um potencial muito grande para suprir as necessidades da demanda por energia no Brasil.

A cana-de-açúcar tem um papel indiscutível no agronegócio brasileiro. A solução brasileira da utilização do etanol carburante é especial para um país com grandes áreas agriculturáveis planas e clima adequado, o que motivou a expansão da cultura da cana no país, dirigida a três produtos: açúcar, álcool e energia elétrica.

A valorização e reconhecimento mundial da utilização do etanol como uma das principais fontes de energia limpa e renovável levou o país assumir a liderança mundial na produção de etanol.

O bagaço de cana é um dos subprodutos gerados na usina, mais estudados, composto por resíduos de açúcar, celulose, hemicelulose e lignina. Em todas as usinas e nas destilarias autônomas, o bagaço embora com cerca de 50% de umidade é queimado como combustível nas caldeiras, sendo que o tipo mais empregado de equipamento é a “Caldeira Aquatubular” para gerar energia elétrica para autoconsumo.

Atualmente as usinas se preparam para também queimar a palha, coproduto gerado na colheita mecanizada, agora obrigatória com o objetivo de complementar o bagaço para injetar energia na rede do Sistema Interligado Nacional (SIN).

Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (MME), o consumo per capita de energia no Brasil aumentará cerca de 45% em relação à atual, para alcançar 3.561 MW/ano em 2020. Para sustentar o crescimento econômico projetado, estima-se que o Brasil necessitará de investimentos superiores a R\$ 380 bilhões no setor de geração de energia elétrica até 2022 (BRAZILENERGY, 2015).

O aumento da capacidade instalada deverá ocorrer não somente para suprir a demanda por energia futura, mas também para aumentar a segurança do sistema. Existe também uma forte tendência mundial para que o aumento da demanda de energia seja atendida cada vez mais por fontes renováveis. Portanto, é compreensível que parte considerável do aumento da capacidade instalada virá de fontes renováveis, em especial de biomassa não aproveitada para a geração de energia.

Investir no aumento da capacidade e produtividade de equipamentos/usina, no aumento da eficiência e rendimento, no aumento da sustentabilidade, sinergia e integração, com produtos de maior valor agregado da cana e da usina de cana e estabelecer fatores que intervêm na eficiência das caldeiras aquatubulares, são importantes alternativas para as soluções energéticas brasileiras.

As cinzas geradas quando da queima do bagaço nas caldeiras, refletem as condições reais das usinas, mas uma caldeira de bom desempenho pode ainda assim operar sem eficiência adequada, gerando resíduo não queimado.

Por essa razão a caracterização das cinzas das usinas pode ser um fator importante para estabelecer a eficiência do aproveitamento do bagaço.

OBJETIVO GERAL

Caracterizar as cinzas de caldeiras de usinas e destilarias em condições reais de funcionamento como base para estabelecer fatores que intervêm na eficiência das caldeiras aquatubulares.

Objetivo específico

Caracterizar amostras de bagaço, cinza da fornalha, a cinza do filtro úmido e da queima do bagaço em condições reais de funcionamento de usinas de Mato Grosso do Sul, como base para encontrar o que intervém na eficiência das caldeiras aquatubulares.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica tem como objetivo apresentar fundamentos teóricos relacionados ao setor sucroalcooleiro, aos tipos de caldeiras, aos sistemas de combustão de caldeiras e ao estudo laboratorial da queima e análise das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, considerando especificamente os aspectos que levam ao mau aproveitamento do calor gerado nas caldeiras .

Este capítulo não tem a pretensão de esgotar o assunto, mas de apresentar trabalhos e conceitos relevantes sobre o tema, de modo a fornecer suporte teórico ao desenvolvimento deste trabalho.

Setor sucroalcooleiro

Historicamente a cana-de-açúcar está intrinsecamente ligada ao desenvolvimento do Brasil, e tem conhecido um grande desenvolvimento agrônomo e industrial.

Desde que foi trazida para o Brasil, a cana-de-açúcar tem desempenhado importante papel na economia nacional, que se caracteriza como o maior produtor do mundo, seguido pela Índia (CanaOnline, 2015).

Esta importância se deve ao fortalecimento do preço do açúcar no mercado mundial, a valorização de subprodutos resultantes da fabricação de etanol e açúcar e a necessidade de fornecimento de energia, favoreceram a cana-de-açúcar no Brasil e levaram a expansão, a modernização e a melhoria contínua do setor sucroalcooleiro.

A Figura 1 apresenta o mapa das regiões produtoras de cana-de-açúcar do Brasil.

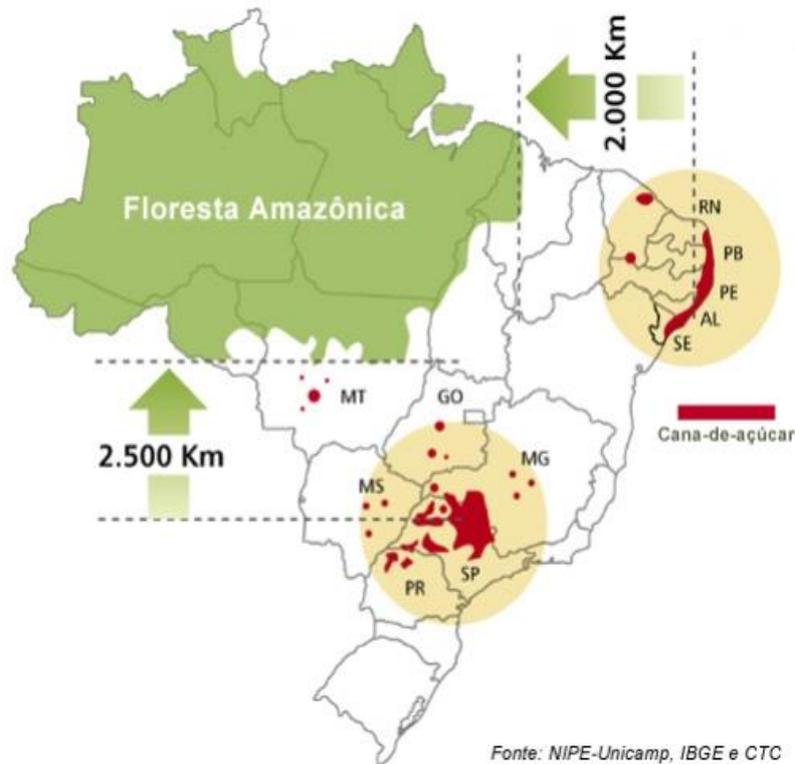


Figura 1: Mapa das regiões produtoras de cana-de-açúcar no Brasil.

Fonte: UNICA, (2015).

Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (MME), o consumo per capita de energia no Brasil aumentará cerca de 45% em relação ao atual, alcançando 3.561 MW/ano em 2020. Para sustentar o crescimento econômico projetado, estima-se que o Brasil necessitará de investimentos superiores a R\$380 bilhões no setor de geração de energia elétrica até 2022 (BRAZILENERGY, 2015).

O gráfico da Figura 2 nos permite avaliar a ampliação do fornecimento de energia elétrica, para suprir a demanda futura.



Figura 2: Gráfico da Evolução Acumulada do PIB e do Consumo de Energia no Brasil.

Fonte: BRAZILENERGY, (2015).

O gráfico da Figura 3 ilustra a matriz de oferta de potência de energia elétrica brasileira, onde fontes renováveis participaram com 81,4%, e desse total a biomassa participou com 9,1%. Através da capacidade instalada de geração elétrica de 399 usinas, o bagaço de cana participou com 7,3%, totalizando 10.903 (MW). Nesse mesmo período o setor sucroalcooleiro apresentou um superávit, gerando 144% acima do consumo próprio (110% em 2013), e participou com 35,5% na geração elétrica total de Autoprodutores de Energia (APE) (MME, 2017).

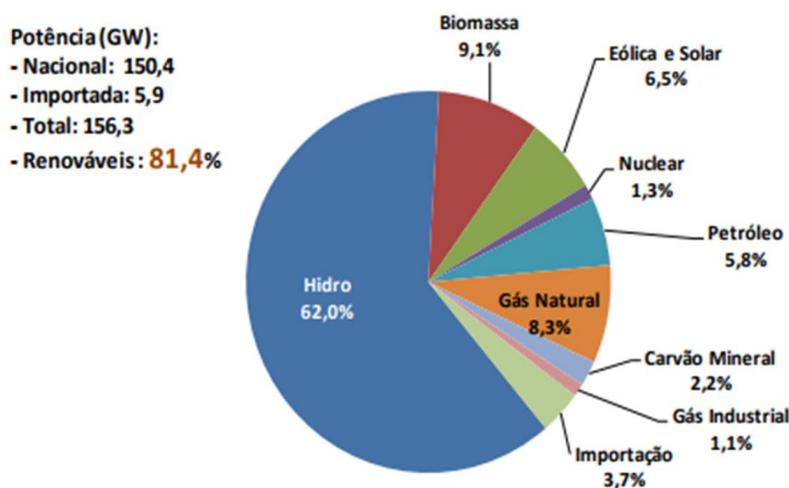


Figura 3: Oferta de Potência de Geração Elétrica – 2016.

Fonte: Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético EPE, (BRASIL, MME 2017).

O complexo sucroalcooleiro brasileiro é considerado o mais moderno do mundo, sendo o Brasil o segundo maior produtor global de Etanol (ranking liderado pelos Estados Unidos). Na safra 2016/2017, o volume produzido atingiu 27,8 bilhões de litros.

O interesse mundial pelos biocombustíveis a partir de 2004 proporcionou grandes oportunidades e grandes desafios para o Brasil. Com a publicação do relatório científico do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) em 2008, se faz necessário a tomada de medidas para a redução da emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera, que aceleraram na última década, segundo o qual o GEE é um dos principais causadores do aquecimento global (ARIEDI, 2013).

O setor sucroalcooleiro é um dos mais relevantes da economia brasileira, seja em termos de emprego, produto ou qualquer outro indicador que se considere, como, por exemplo, sua contribuição para o setor externo. Os principais produtos do

setor são o etanol, o açúcar e, a cogeração de energia elétrica, cujo excedente é vendido para companhias de energia elétrica. Este setor tem um papel importante na formação econômica e até na consolidação da ocupação geográfica de algumas regiões do Brasil (ARIEDI, 2013).

O gráfico da Figura 3 apresenta a evolução da produção de cana-de-açúcar, no Brasil e região Centro-Sul, nas safras de 05/06 a 16/17 já o gráfico da Figura 4 apresenta a evolução de cana-de-açúcar na região Centro-Oeste nas safras de 05/06 a 16/17.

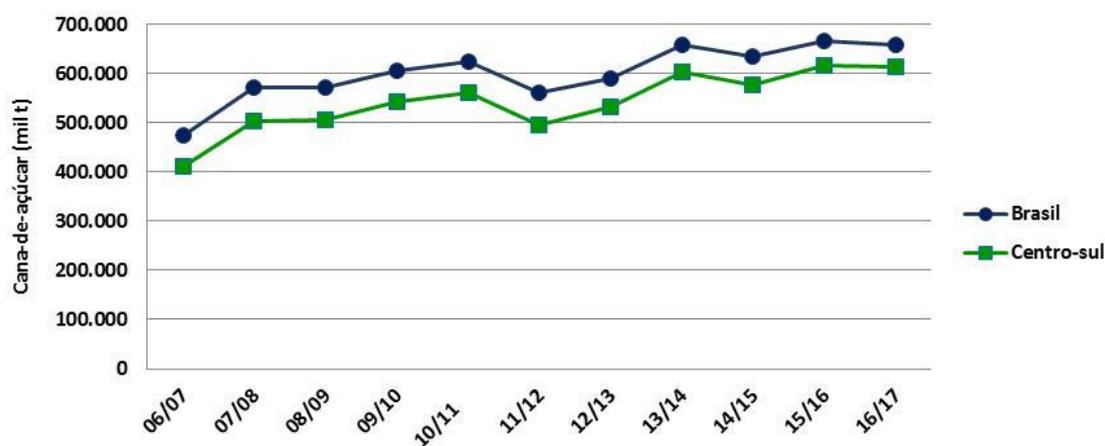


Figura 4: Gráfico da Evolução da produção de cana-de-açúcar na região Centro-sul e Brasil safra 05/96 a 16/17.

Fonte: CONAB, (2017), adaptado pelo autor.

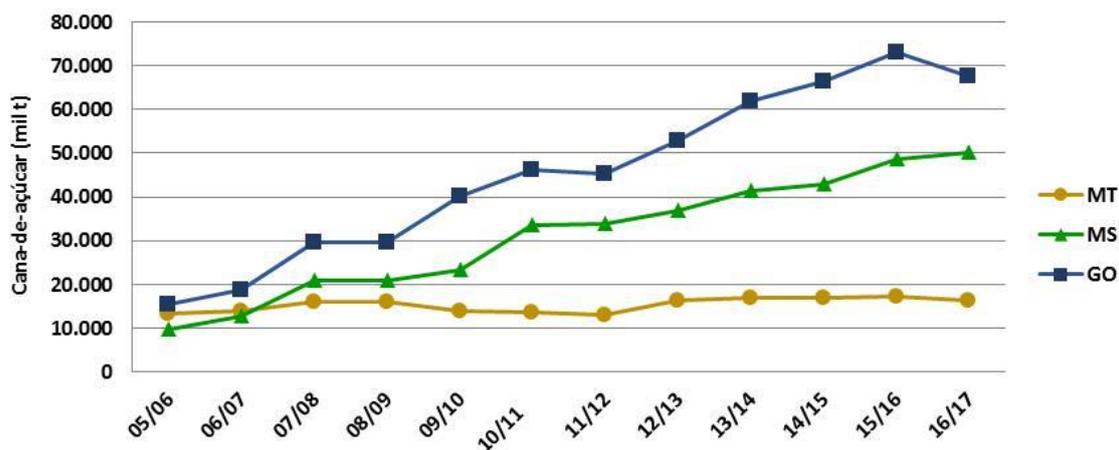


Figura 5: Gráfico da Evolução da produção de cana-de-açúcar na região Centro-Oeste safra 05/96 a 16/17.

Fonte: CONAB, (2017), adaptado pelo autor.

Em Mato Grosso do Sul, são 22 unidades produtoras em atividade, gerando mais de 22 mil empregos formais diretos. Na safra 2015/2016, a área total plantada e colhida foram mais de 619 mil hectares, processaram 48,7 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, produzindo 1,3 milhões de toneladas de açúcar, 2,8 bilhões de litros de etanol Anidro e Hidratado e 2.685 (GWh) de energia (BioSul MS, 2017).

A Figura 6 apresenta o mapa da localização das unidades produtoras de cana-de-açúcar no Estado de Mato Grosso do Sul.



Figura 6: Mapa da localização das unidades produtoras de cana-de-açúcar no MS.
Fonte: Biosul, (2016).

Morfologia da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar pertence à família Poaceae, segundo a nova classificação, e ao gênero *Saccharum*, de gramíneas altas provenientes do Sudeste Asiático, recebendo o nome científico *Saccharum officinarum*. As variedades cultivadas no Brasil e no mundo são híbridos multiespecíficos (SANTOS 2012).

As principais características dessa família são a inflorescência em forma de espiga, o crescimento do caule em colmos, as folhas com lâminas de sílica em suas bordas e a bainha aberta (SANTOS 2012).

Apresenta elevadas taxas fotossintéticas e são eficientes na utilização e resgate de CO₂, se adapta à alta intensidade luminosa, altas temperaturas e escassez de água, e para suprir suas necessidades hídricas, uma vez que 30% de sua massa total é representada pela matéria seca e, 70% pela água, dependendo do estágio fenológico (MARAFON 2012).

A cana se desenvolve em forma de touceira (moita), possui uma parte subterrânea composta raízes e rizomas, sua parte aérea é formada por colmos (caule típico de gramíneas), folhas, inflorescências e frutos (SEGATO 2006).

A Figura 7 apresenta a morfologia externa do colmo, que é a parte de grande interesse industrial, o colmo é cilíndrico, reto, fibroso e constitui-se num reservatório de sacarose, pois dele é extraído o caldo e o bagaço. É caracterizado por nós bem marcados e entrenós distintos que ficam acima do solo (SEGATO 2006).

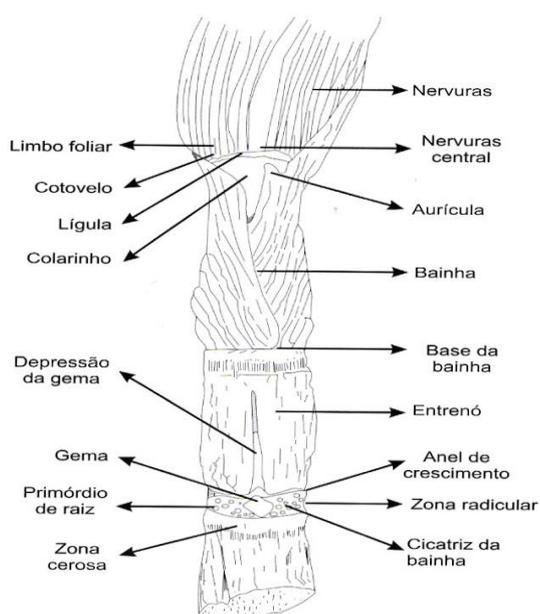


Figura 7: Morfologia externa do colmo de cana-de-açúcar.

Fonte: Instituto do Açúcar e do Alcool - IAA/PLANALSUCAR, (1983).

As Figuras 8 e 9 apresentam o esquema da estrutura do colmo de cana-de-açúcar.



Figura 8: Foto do colmo da cana-de-açúcar.
Fonte: Coopercitrus, (2015).

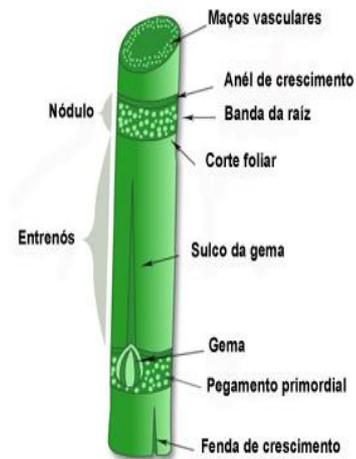


Figura 9: Esquema do colmo de cana-de-açúcar.
Fonte: Agricultura em foco, (2011).

Em um corte transversal do colmo de cana são reconhecíveis a casca dura, a polpa interna, mais macia, e as fibras. A casca é formada por várias camadas de células lignificadas que fortalecem o colmo e protegem os tecidos internos. As fibras são feixes vasculares, os vasos (xilema e floema) dispostos nos feixes vasculares se estendem da raiz até a extremidade da folha (IAA 1983).

A Figura 10 apresenta um corte transversal do entrenó.

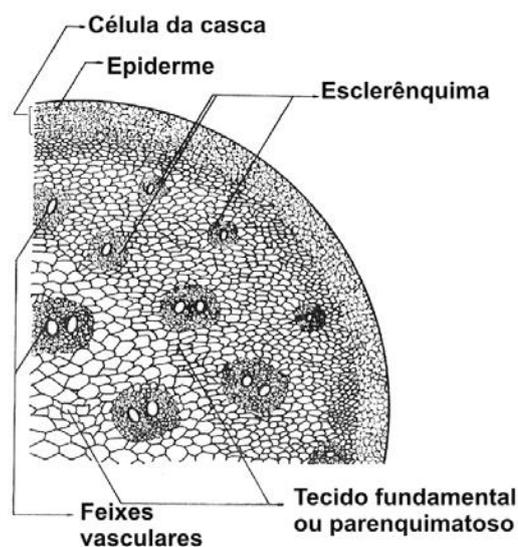


Figura 8: Corte transversal do entrenó.

Fonte: LENÇO, (apud. Fernandes 1984).

O rendimento médio mundial da cultura é de 53 ton.ha⁻¹ de colmos, com teores de sacarose de 10 a 18% e 11 a 16% de fibra (SANTOS 2012).

Segundo Castro e Kluge (Apud LENÇO 2010) a composição da cana-de-açúcar é de 86 a 92% de caldo e de 8 a 14% de material fibroso, ou seja materiais insolúveis em água. Reins, 2007 (apud LENÇO 2010), afirma que os colmos contêm 13g de material fibroso para cada 100g de colmo.

A composição da cana-de-açúcar que chega nas usinas, varia conforme os diversos fatores além da composição do colmo: variedade, quantidade de pontas e folhas, maturação, período de colheita, além de fatores climáticos.

A composição química da cana-de-açúcar depende da interação de: clima, solo (propriedades físicas e químicas), adubação, irrigação, florescimento, sistema de despalha (manual, fogo, mecanização), tempo decorrido após a última colheita, condições e tempo de armazenamento.

Uma referência da composição química da cana-de-açúcar está apresentada na Figura 11.

FIBRA	10,0 - 16,0%
CALDO	84,0 - 90,0%
Água	75,0 - 82,0%
Sólidos Solúveis	18,0 - 25,0%
Açúcares	15,5 - 24,0%
Sacarose	4,5 - 24,0%
Glicose	0,2 - 1,0%
Frutose	0,0 - 0,5%
Não açúcares	1,2 - 2,5%
Orgânicos	0,8 - 1,8%
Aminoácidos, gorduras, ceras, materiais corantes, ácidos, etc.)	
Inorgânicos	0,2 - 0,7%
(Sílica, potássio, fósforo, cálcio, magnésio, sódio, ferro, enxofre e cloro)	

Figura 9: Composição química da cana-de-açúcar.

Fonte: Oliveira, (apud ERNESTO, 2009).

Bagaço de cana-de-açúcar

Bagaço de cana gerado na usina é consumido para produção própria de energia por meio da cogeração. Pode servir também como matéria-prima para

produção de etanol de segunda geração, outro tipo de combustível que pode ser comercializado (Elektro, 2015).

O bagaço da cana-de-açúcar, considerado como subproduto, é gerado no processo de extração do caldo, obtido por meio de difusor ou moenda. É um material fibroso, composto principalmente de água (de 48% a 52%) e sacarose.

O bagaço da cana-de-açúcar é utilizado na indústria como combustível das caldeiras, para gerar energia nas unidades processadoras de cana, apresenta-se no momento, como uma grande alternativa associada à palha de cana para gerar bioeletricidade (GOES 2008).

A Figura 12 apresenta as etapas de colheita da cana-de-açúcar, moagem e armazenagem do bagaço para utilização na queima nas caldeiras.



Legenda: (1) Colheita mecanizada da cana-de-açúcar; (2) Alimentação da moagem; (3) Armazenagem junto a caldeira; (4) Fibras do bagaço

Figura 10: Etapas da colheita de cana-de-açúcar, moagem e bagaço.

Fonte: CANAMIX, JORNAL DA CANA, CICLO VIVO, (2015), adaptado pelo autor

A participação da biomassa como fonte renovável na matriz energética em 2016 foi de 1,4%. Neste período das 535 usinas termelétricas instaladas no Brasil, 399 eram de bagaço de cana-de-açúcar, com uma potência instalada de 10.909.920 KW, equivalendo a 26,5 % das usinas termelétricas (ANEEL 2017).

A fonte de biomassa responde por 9,2% da capacidade instalada de geração de energia elétrica do Brasil, num total de 14.040 (MW), com uma evolução da capacidade instalada de 4,5%. O bagaço da cana-de-açúcar, uma das principais fontes de biomassa, representa 78,2% do total, o setor florestal vem em segundo com 20% e outras fontes de biomassa 1,8% (MME 2017).

O setor sucroenergético detém hoje 7% da potência concedida no Brasil, sendo a terceira fonte de geração da matriz elétrica nacional em capacidade instalada, atrás somente da fonte hídrica e das termelétricas com gás natural (MME 2017).

O gráfico da Figura 13 apresenta o acréscimo anual de capacidade instalada de biomassa no período de 2002 a 2020.

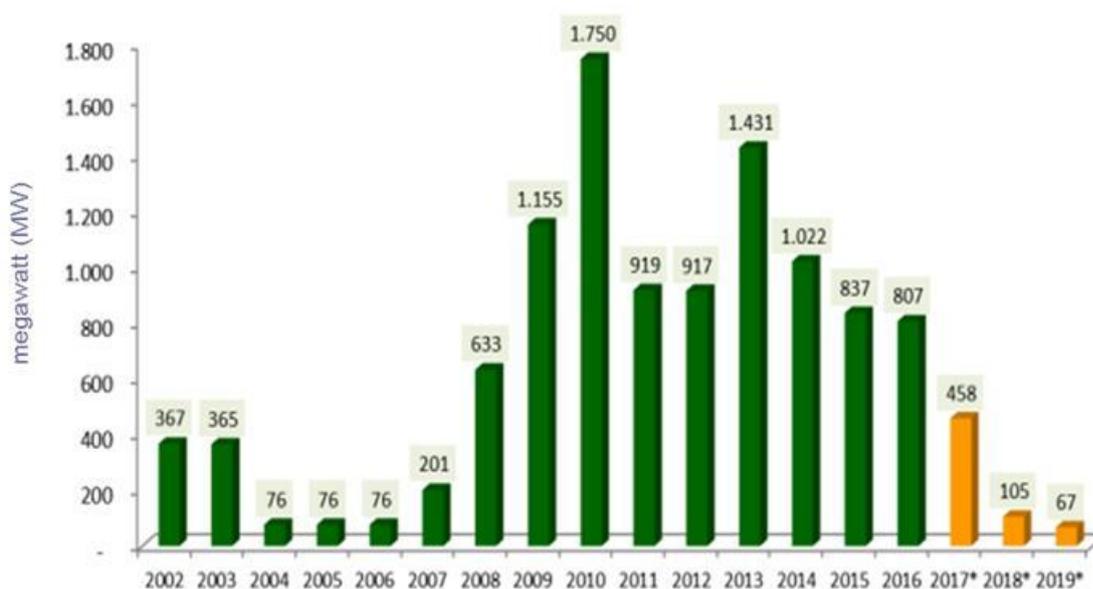


Figura 11: Acréscimo anual de capacidade instalada pela biomassa, 2002-2019, Brasil (MW).

*Previsão, incluindo projetos com restrição para entrada em operação.

Fonte ÚNICA (2017), dados básicos da ANEEL (2017), adaptado pelo autor.

Composição do bagaço

O bagaço de cana-de-açúcar é uma mistura complexa de celulose, hemicelulose e lignina que compõe as células das paredes dos feixes vasculares da cana-de-açúcar (REIN, 2007 apud LENÇO)

A quantidade de fibra nos colmos depende do comprimento e do diâmetro dos colmos. Os números de nós, e da distância entre os nós, influenciam a quantidade de fibras na extração (LENÇO, 2010).

As características físicas e químicas do bagaço de cana influenciam nos resultados desejados e na eficiência das caldeiras. Segundo SANTOS (2012, p. 517), o bagaço é heterogêneo tanto no que diz respeito a tamanho e forma de suas partículas como no que se refere à composição destas nos três componentes predominantes: celulose, hemicelulose e lignina.

A Tabela 1 apresenta o potencial do bagaço como fonte de açúcares redutores a partir da celulose e hemicelulose nele presente.

Tabela 1. Composição do bagaço

Componentes	(%) base seca
Glicose	19,50
Xilose	10,50
Arabinose	1,50
Galactose	0,55
Lignina	9,91
Organosolúveis	2,70
Açúcares redutores	1,85
Ácidos urônicos	1,91
Cinzas	1,60
Umidade	50,00
Hexoses totais	20,04
Pentoses totais	12,00

Fonte: SANTOS 2012.

Determinação da densidade

A densidade de uma biomassa qualquer pode ser medida de três maneiras distinta, densidade a granel; densidade real ou absoluta e densidade aparente. O método mais comum de se obter é a densidade a granel, definido como a razão entre a massa das partículas pelo volume ocupado, dado em kg/m³. De acordo com Lenço (2010, p. 38):

Na literatura a densidade a granel do bagaço de cana é caracterizada por um valor não homogêneo. Isso é bem compreensível, pois as variações das características do bagaço são determinadas por muitas condições, tais como a umidade, a granulometria, influência do tipo de moenda ou difusor, e todas as demais variáveis vistas anteriormente.

De acordo com Rein (apud LENÇO, 2010, p. 38):

A medida mais comum para o bagaço de cana-de-açúcar é a densidade a granel da fibra seca (massa por unidade de volume do bagaço) é uma medida relativamente constante, desde que a fibra seja bem fragmentada ou picada, não compacta, mas a fibra pode absorver de 5 a 6 vezes a sua massa sem alterar o volume a granel.

Segundo Murry (apud LENÇO, 2010, p 39), “a densidade a granel” do bagaço de cana seco e picado pode variar de 55 kg/m³ até 66 kg/m³.

Segundo Rein (apud LENÇO, 2010, p39):

A densidade a granel em fibras finas com novos métodos padrão podem variar de 90 kg/m³ e com fibras grossas pode ser de até 75 kg/m³. Se o bagaço é armazenado úmido e em grandes pilhas está em torno de 200 kg/m³

Determinação da granulometria

A técnica largamente empregada de caracterização granulométrica por peneiramento mecânico é de baixo custo e simples, porém, é necessário atenção quanto à metodologia empregada no processo de separação e na apreciação dos resultados obtidos.

Segundo LENÇO (2010, p. 42):

Esse método mecânico é o mais empregado para separação de partículas com grande dispersão de tamanho. A separação das diferentes frações é feita usando peneiras padronizadas pela abertura de furos. Essas peneiras são dispostas umas sobre as outras, na sequência do topo para a base em ordem decrescente, ou seja, da maior para a menor malha de interesse. As malhas da série Tyler são as mais usadas, sua malha é padronizada em função do número de furos pela área que esses furos ocupam e numeradas em uma escala própria. O processo de peneiramento é realizado quando uma amostra é cuidadosamente pesada e colocada na peneira de maior malha no topo da bateria de peneiras, que são colocadas num dispositivo vibratório, por um tempo pré-determinado. Assim as partículas de maior dimensão ficam retidas e subsequentemente as malhas capturam as partículas menores que a anterior e maiores que a malha, retendo-as e deixando passar as partículas menores que a malha, assim se obtém uma classificação das partículas em função das dimensões.

De acordo com Rasul et al. (1999) apud JORDAN et al. 2016, p. 111-112):

A separação do bagaço por peneiramento é uma técnica pouco confiável, pelo fato de este tipo de técnica não responder adequadamente quando

aplicado a materiais com grande disparidade de dimensões, sendo, assim, mais recomendada para classificações de materiais na forma de pó. Entretanto, diferentemente do apontado pelos autores, ficou evidenciado nos experimentos realizados que a não confiabilidade, ou a ineficiência da técnica de peneiramento de materiais com alto grau de disparidade de dimensões, pode não estar diretamente relacionada ao método de classificação por peneiramento, mas, em grande parte, pela metodologia empregada na condução dos ensaios de peneiramento e no tratamento dado aos resultados obtidos. Em vista dos desvios obtidos junto às médias, ficou evidente que os métodos para a determinação do tamanho característico não podem ser aplicadas separadamente, principalmente nos casos em que se encontram presentes duas (ou mais) populações distintas de diâmetros característicos no mesmo material.

Segundo JORDAN et al. (2016):

Diante das limitações e características do processo de classificação via peneiras padronizadas, ficou evidenciado que as conduções de ensaios de granulometria de materiais com alto grau de polimorfismo (disparidade de tamanhos) demandam atenção especial quanto às metodologias empregadas (processo de separação e análise dos resultados), uma vez que as conduções de técnicas inapropriadas podem acarretar em resultados não fidedignos, podendo assim comprometer o funcionamento de equipamentos e os rendimentos dos processos de conversão considerados.

Determinação de silício do bagaço e das cinzas

De acordo com Konder, Pereira e Nolla (2004, p. 16):

O processo de extração de silício na planta é feito através da oxidação da matéria orgânica, isto é, eliminação do carbono do tecido vegetal com água oxigenada (digestão). O hidróxido de sódio adicionado à solução digestora tem a finalidade de melhorar a eficiência do oxidante (H_2O_2) e aumentar o pH da solução visando manter o silício do tecido vegetal em solução. O procedimento de análise e determinação de silício no tecido vegetal foi descrito por Elliott et al. (1991).

Análise das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar

As cinzas são os resíduos gerados nas caldeiras quando da combustão do bagaço. Podem ser arrastadas bem como depositadas em todas as superfícies de transferência de calor, mas especialmente em tubos transversais situados nas passagens de convecção das caldeiras (MILES et al., 1996)

Cinzas provenientes de combustão de biomassa dividem-se em dois componentes: as partículas maiores, que caem através da grelha durante a combustão e são recolhidas como cinzas de fundo, e as partículas muito finas que são transportadas nos gases de combustão e são conhecidas como cinzas volantes. (BRAUNBECK et al 1999).

As cinzas têm origens diversas, tendo em vista os elementos metálicos e não metálicos que estão presentes na estrutura molecular do bagaço de cana-de-açúcar, podendo ocorrer que fragmentos de argila, areia e solo sejam misturados ao bagaço, quando da manipulação (LENÇO 2010).

Segundo Miles et al. (2016) existem três principais efeitos indesejáveis dos depósitos de cinzas, a saber:

1. depósitos retardam a transferência de calor e conduzem a um eventual declínio na eficiência e capacidade da caldeira se não puderem ser removidos de acordo com os pressupostos do projeto para a caldeira;
2. os depósitos podem crescer na medida em que o fluxo através da caldeira é restrito, muitas vezes atravessando tubos e feixes de tubos e causando danos mecânicos;
3. os depósitos estão associados à corrosão. Depósitos menos tenazes e facilmente removidos (por exemplo, por soprador de fuligem), representam um problema menor para os operadores de instalações do que aqueles que são difíceis de remover e exigem desligar a caldeira para limpeza.

A tabela 2 apresenta a composição das cinzas do bagaço de cana.

Tabela 2. Composição das cinzas do bagaço de cana

Referências	Rein, 2007	Camargo et al., 1992	Jenkins et al. 1998	Turn et al., 1997	Gabra, 2001	Manya e Arauzo, 2008
SiO ₂	75,20	46,00	46,61	41,87	72,30	64,29
Al ₂ O ₃	2,70	2,80	17,69	22,25	8,00	3,44
Fe ₃ O ₃	2,60	3,00	14,14	20,90	6,20	3,69
Ti ₃ O ₂	0,01	0,53	2,63	3,87	0,60	1,25
BaO	sd	0,13	sd	sd	sd	0,70
P ₂ O ₅	1,46	sd	2,72	1,13	0,90	2,89
CaO	6,90	5,40	4,47	3,50	4,20	4,84
MgO	1,70	0,79	3,33	1,45	2,30	1,33
Na ₂ O	0,60	0,50	0,79	0,26	1,00	0,31
K ₂ O	5,10	23,00	0,15	2,59	4,50	14,34
SO ₃	2,70	sd	2,08	0,90	sd	0,97
MnO ₂	0,02	7,30	3,33	sd	0,10	0,54
outros elementos	0,92	10,55	2,06	1,28	- 0,10	1,41
Total	99,91	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: LENÇO, (2010).

Caldeiras

Definição

Caldeiras, também designadas geradores de vapor, são equipamentos destinados à produção de vapor sobre pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refeedores, trocadores de calor,

caldeiras que utilizam fluido térmico e não vaporizam, serpentinas de fornos ou de vasos de pressão que aproveitam o calor residual para gerar ou superaquecer o vapor (SANTOS 2013).

O vapor é gerado em uma caldeira pela transferência do calor dos gases quentes para a água. Quando a água absorve quantidade suficiente de calor, muda da fase líquida para a de vapor. A energia para gerar o vapor pode ser obtida da combustão de combustíveis ou da recuperação de calor residual de processo (ELEKTRO, 2015).

A Figura 14 apresenta o esquema de funcionamento de uma caldeira.

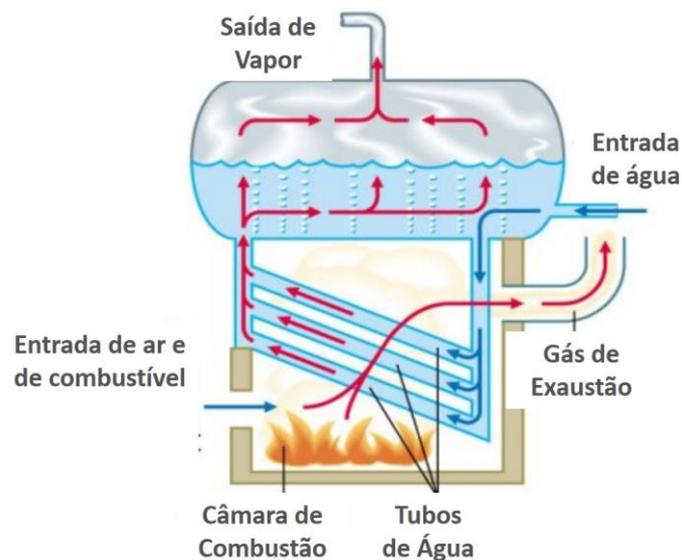


Figura 12: Esquema de funcionamento de uma caldeira.

Fonte: Encyclopedia of Alternative Energy, (2015).

Na caldeira, a transferência de calor entre os gases quentes e a água é efetuada nas superfícies de troca térmica (geralmente um conjunto de tubos). Após a geração do vapor, o efeito da pressão faz o vapor fluir da caldeira para o sistema de distribuição (ELEKTRO, 2015).

As caldeiras podem ser classificadas de acordo com os seguintes parâmetros:

- Quanto à posição dos gases quentes e da água: Flamotubulares (Fogotubulares, Piro tubulares); Aquatubulares (Aqutubulares); Mistas e Elétricas (MTE, 2014).
- Quanto à classe de pressão, as caldeiras são classificadas segundo a Norma Regulamentadora NR-13 – Parágrafo 13.1.9 em:

- Caldeiras de Categoria A – são aquelas cuja pressão de operação é igual ou superior a 1960 KPa (19,98 Kgf/cm²);
- Caldeiras de Categoria C – são aquelas cuja pressão de operação é igual ou inferior a 588 KPa (5,99 Kgf/cm²) e o volume interno é igual a 100 litros;
- Caldeiras Categoria B – São aquelas caldeiras que não se enquadram nas categorias A e C (MTE, 2014).

De acordo com o grau de automação, as caldeiras podem ser classificadas em: manuais, semiautomáticas e automáticas.

De acordo com o tipo de energia empregada, elas podem ser de combustíveis: sólidos, líquidos, gasosos e caldeiras de recuperação (BRASIL/MTE, 2014).

Mas basicamente predominam dois tipos de caldeiras industriais: caldeiras flamotubulares (*fire-tube*) e aquotubulares (*water-tube*). As aquotubulares produzem vapor sob alta pressão, sendo um dos principais combustíveis utilizados, a biomassa de bagaço de cana-de-açúcar, resíduo este gerado no processo de moagem da cana das indústrias sucroalcooleiras (CIBO 1997).

Caldeira flamotubular

Nas caldeiras flamotubulares, os gases quentes da combustão circulam no interior de tubos que atravessam o reservatório de água a ser aquecida para produzir vapor. Esse tipo de caldeira, geralmente de pequeno porte, apresenta baixa eficiência e é utilizada apenas para pressões reduzidas. Esta é muito utilizada, em razão do baixo valor de investimento e facilidade de manutenção. Utiliza qualquer tipo de combustível, líquido, sólido ou gasoso. É muito comum o seu uso com óleo e gás (ELEKTRO, 2015).

A Figura 15 apresenta um desenho esquemático do princípio de funcionamento de uma caldeira flamotubular.

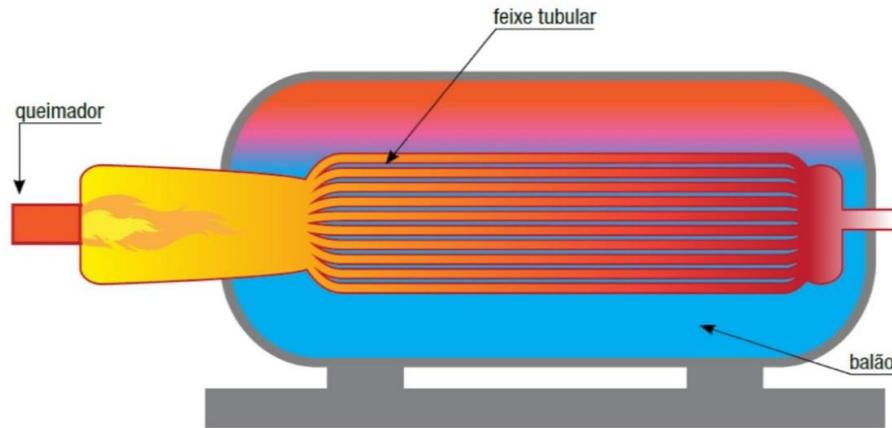


Figura 13: Desenho esquemático de funcionamento de uma caldeira flamotubular.
Fonte: ELEKTRO, (2015).

Caldeira aquatubular

Nas caldeiras aquatubulares, a água a ser aquecida passa pelo interior de tubos que, por sua vez, são envolvidos por gases de combustão. Os tubos podem estar organizados em feixes, como nos trocadores de calor e as caldeiras que os contêm apresentam a forma de um corpo cilíndrico – ou em paredes de água, como nas caldeiras maiores (ELEKTRO, 2015).

A Figura 16 apresenta um desenho esquemático do princípio de funcionamento de uma caldeira aquatubular.



Figura 14: Esquema de funcionamento de uma caldeira aquatubular
Fonte: ELEKTRO, (2015).

Caldeira a vapor tipo “*spreader stoker*” é o modelo mais utilizado no Brasil para a queima do bagaço de cana-de-açúcar. De acordo com Teixeira (2005, p. 55):

Um mecanismo distribuidor introduz o bagaço para dentro da fornalha, e a combustão se realiza parcialmente em suspensão e parcialmente na grelha. Esta caldeira possui uma fornalha totalmente coberta por paredes de água,

composta por tubos com membranas soldadas. Em geral, a grelha é do tipo basculante. Na saída da fornalha, no sentido de escoamento dos gases, tem-se uma fileira de tubos evaporadores, denominada 'screen', e o superaquecedor. Mais adiante está o feixe convectivo, que une o balão superior e o inferior. Nos dutos verticais tem-se o pré-aquecedor de ar e o economizador. A caldeira possui um separador de particulados, que além de reduzir as emissões de particulados, reduz também a intensidade da erosão no exaustor de gases localizado à jusante (ponto mais baixo) do separador de particulados e antes da chaminé. O ar primário, fornecido por baixo da fornalha, é pré-aquecido até 334 °C. O ar secundário é fornecido pelas paredes frontal e traseira da fornalha, visando a combustão dos voláteis, além de ajudar na secagem e ignição do combustível.

Vantagens:

- Pressões da ordem de até 100 bar (Ex.: Caldeira com 90 bar);
- Maior produção de vapor (Ex.: 190 t/h, existem caldeiras com até 750 t/h vapor);
- Possibilidade de trabalho em altas temperaturas (Ex.: 490°C);
- Partida rápida devido ao pequeno volume de água relativo à superfície de aquecimento;
- Pode ser alimentada por todos os tipos de combustível;
- Apresentam facilidade de adaptação de equipamentos, tais como superaquecedor, economizador de ar e pré-aquecedor;
- Apresentam a possibilidade de colocação de tubos de água nas paredes da fornalha, que além de protegerem o refratário, auxiliam na produção de vapor;
- Possuem grande flexibilidade de operação.

Desvantagens

- Custo de implantação elevado (Ex.: Brazilian Real – BRL 5000,00/kW ou BRL 258.650.000,00, para uma potência da usina de 51,73 MW), (INPUT, 2015);
- Exigem profissionais qualificados para a sua operação (Ex.: BRL 3.912.000,00 Mão-de-obra/ano – para contratação de 40 funcionários com salário de BRL 5000,00 mais encargos);
- Custo de manutenção elevado (Ex.:1% do custo de implantação), ;
- Exigem tratamento de água adequado e rigoroso, para remoção de elementos nocivos para a aplicação (remoção da dureza e sólidos totais);

- São de construção mais complexa que as flamotubulares;
- Exigem sempre alvenaria.

A Figura 17 apresenta um desenho esquemático do princípio de funcionamento de uma caldeira aquatubular com grelha rotativa utilizadas em usinas (ELEKTRO, 2015).

Os distribuidores existentes na caldeira alimentam a fornalha com combustível sólido para ser queimado, a transferência de calor no interior da caldeira se dá através de duas formas: por radiação direta da chama nos tubos de água e por convecção forçada, quando da troca térmica dos gases quentes que se deslocam da câmara de combustão, atravessando o feixe de tubos do superaquecedor e da ligação dos tubulões de vapor e de água.

Os gases de exaustão da caldeira antes de saírem pela chaminé trocam calor com o economizador, aquecendo a água de alimentação da caldeira e com o préaquecedor de ar, que aquece o ar da combustão.

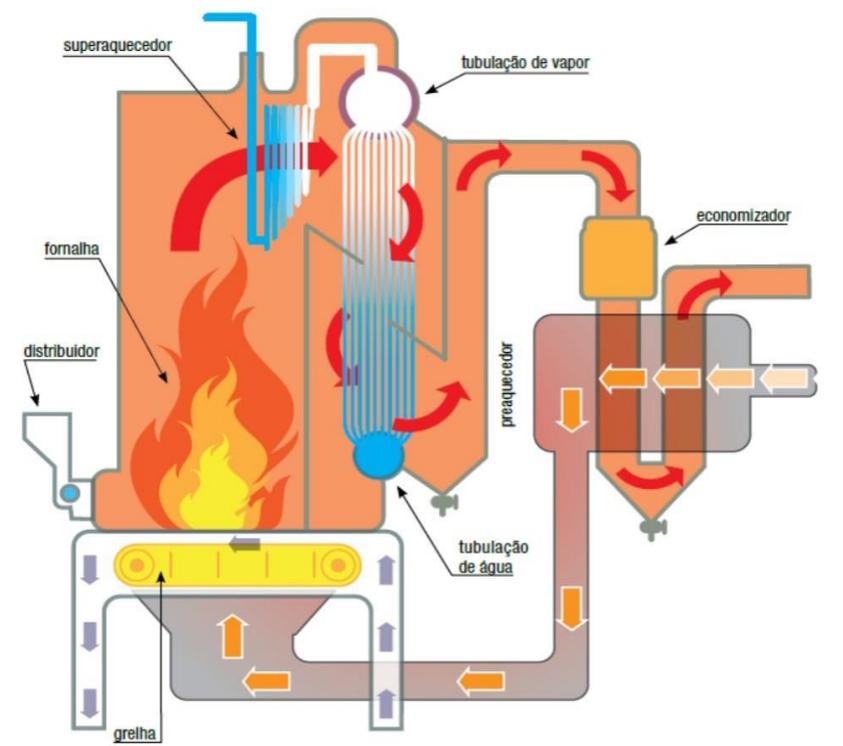


Figura 15: Desenho esquemático de funcionamento de uma caldeira aquatubular de usina sucroalcooleira com esteira rotativa.

Fonte: ELEKTRO, (2015).

No quadro da Figura 18, apresentamos a evolução tecnológica de caldeiras aquatubulares utilizadas em usinas sucroalcooleiras.

Evolução TECNOLÓGICA DE CALDEIRAS		
Parâmetros	Convencional	Leito Fluidizado
Emissões de NOx	>250 ppm	<150 ppm
Emissões de CO	>200 ppm	<100 ppm
Possibilidade de queima de biomassa com alta umidade	48 a 53%	48 a 65%
Eficiência de combustão	95 a 97%	99,50%
Excesso de ar médio em operação	35 a 50%	25 a 30%
Velocidade dos gases na fornalha	11 a 12 m/s	6 a 7 m/s
Potencial de incêndio na parte traseira da caldeira por não queimados	Maior	Menor
Flexibilidade de uso de várias biomassas	não	sim
Níveis de emissões atmosféricas	Atende padrões nacionais	Atende padrões nacionais e internacionais

F
Figura 16: Evolução das Caldeiras aquatubulares de usinas sucroalcooleiras.

Fonte: PERDONÁ - Odebrecht Agroindustrial, (2016).

Combustão

Dentro do processo de combustão, estas podem ser qualificadas como completas e incompletas.

Na combustão completa: o reagente irá queimar em presença de oxigênio, produzindo um número limitado de produtos. Quando um combustível composto apenas por C e H queimam em atmosfera de oxigênio são gerados apenas dióxido de carbono (CO_2) e água. Quando elementos como nitrogênio, enxofre e ferro são queimados, os resultados serão os óxidos mais comuns. Nitrogênio irá gerar dióxido de nitrogênio (NO_2). Enxofre irá gerar dióxido de enxofre (SO_2). Ferro irá gerar óxido de ferro III (Fe_2O_3). A combustão completa é normalmente impossível de atingir, a menos que a reação ocorra em situações cuidadosamente controladas, como, por exemplo, em um laboratório (ELEKTRO, 2015).

Combustão incompleta ocorre quando não há o suprimento de oxigênio adequado para que ela ocorra de forma completa. O reagente irá queimar em presença de oxigênio, mas poderá produzir inúmeros produtos. Neste caso, a queima de um combustível poderá gerar: dióxido de carbono, monóxido de carbono, água e vários outros compostos, como óxidos de nitrogênio. Também há liberação

de átomos de carbono sob a forma de fuligem. Como a maioria dos processos de combustão não são incompletos, há perdas de energia, dissipadas por meio de subprodutos não aproveitados no processo de queima ou no mal aproveitamento do meio (comburente) em que o combustível está sendo queimado (ELEKTRO, 2015).

Conhecendo-se a composição do combustível e com base na estequiometria da reação, consegue-se calcular a quantidade de ar necessária para a queima eficiente do Combustível. Esta quantidade de ar que fornece o teor de oxigênio teoricamente suficiente para a combustão completa do combustível é denominada de “ar teórico” ou “ar estequiométrico”. Na prática é muito difícil obter uma boa combustão apenas com o ar estequiométrico, sendo necessário recorrer a um percentual seguro de excesso de ar para evitar a combustão incompleta. (SALUM 2011)

Combustão de sólidos

A combustão de combustíveis sólidos depende de diversos parâmetros que influenciam na operação, diferente da combustão de líquidos e gases.

Segundo Tillman (apud LENÇO, 2010, p. 52): “A combustão de sólidos é inerentemente mais complexa que a combustão de líquidos e gases”.

Segundo Ushima (apud LENÇO, 2010, p. 52):

Na combustão de gases, os parâmetros mais importantes são a temperatura e a mistura entre gases ou vapores reagentes. Na de Líquidos, o diâmetro de gotas também passa a ser um parâmetro relevante. Na combustão de sólidos além dos citados anteriormente outros parâmetros assumem importância, como umidade, teor de voláteis, geometria (forma), porosidade da partícula, velocidade relativa gás-sólido etc.

Mecanismos de combustão de sólidos

Os mecanismos de combustão de combustível sólidos variam conforme as suas características. Segundo Lenço (2010): “Todo combustível sólido quando disposto em um ambiente oxidante à alta temperatura, passa por etapas de aquecimento com regiões de secagem, pirólise, combustão simultânea dos gases volatizados e do carbono fixo residual”.

A Figura 19 apresenta um desenho esquemático simplificado dos estágios da combustão de sólidos (LENÇO, 2010).



Figura 17: Esquema simplificado dos estágios de combustão dos sólidos.

Fonte: LENÇO (2010), adaptado pelo autor

Em qualquer fornalha em condições ambientes, o combustível sólido contém alguma umidade na sua estrutura. A secagem da partícula é uma limitação do processo de transferência de calor. Segundo LENÇO (2010, p53):

Para uma partícula de biomassa com teores de umidade e de voláteis elevados, todas as etapas apresentadas são importantes. Os teores de umidade, voláteis, carbono fixo e cinza de um combustível sólido são determinados a partir da análise imediata ou termogravimetria. O aquecimento e a secagem e a pirólise são processos endotérmicos, governados pela transferência de calor e pela quantidade de energia necessária em função do combustível sólido utilizado e da umidade contida no mesmo. A secagem da partícula é uma limitação do processo de transferência de calor e as taxas de secagem da partícula dependem de inúmeras variáveis, incluindo a temperatura média da fornalha, que depende do tipo de fornalha, se é de leito fixo, leito fluidizado, queima em grelha, queima em suspensão ou outro tipo de fornalha. A secagem depende também do tamanho e forma da partícula do combustível sólido, com especial atenção às de menor dimensão. Depende, fundamentalmente, da umidade das partículas, sendo que quanto maior a umidade, maior a quantidade de energia necessária para a evaporação da umidade contida na partícula.

A Figura 20 apresenta um desenho esquemático de combustível sólido.

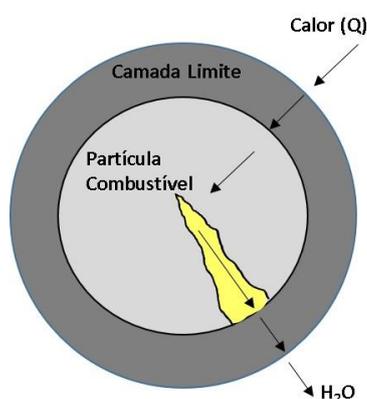


Figura 18: Esquema do processo de aquecimento e secagem.

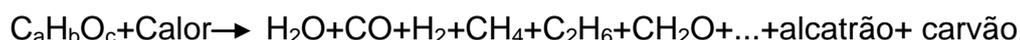
Fonte: Tillman, (apud, LENÇO, 2010, p. 53), adaptado pelo autor

Outra limitação do processo de transferência de calor é a porosidade da partícula. Segundo LENÇO (2010, p. 54):

A porosidade da partícula é outro fator de dependência, pois refere-se à capacidade de transportar o vapor da partícula para o ambiente da fornalha. A secagem da partícula em grande medida é análoga à pirólise. Uma reação distinta ocorre na partícula de combustível no processo de secagem quando a frente de temperatura excede os 105°C (Tillman, 1991), em que a umidade é convertida em vapor e move-se através dos poros para a camada limite da partícula e para o ambiente da fornalha. O processo que ocorre no interior da partícula é o mecanismo de transferência de calor por condutividade, ou seja, o calor é transferido para a partícula tanto por radiação como por convecção do ambiente da fornalha, e conseqüentemente é transferido por condução para a umidade presente no interior da partícula, que evapora. Esse vapor relativamente frio entre 120° a 175°C vai para a superfície da partícula e para o ambiente da fornalha realizando a secagem da partícula. Para que o processo de secagem se complete é necessário que a temperatura no centro da partícula atinja pelo menos 120°C (Tillman, 1991). Segundo Alves e Figueiredo (1988), quando a temperatura dos gases em contato com o sólido está acima de 400°C, a velocidade de secagem depende principalmente da transferência de calor. A difusão de vapor d'água pela partícula, importante em processos de secagem a baixa temperatura, passa a ter um papel secundário.

Processo de pirólise para uma partícula sólida

Pirólise pode ser definida como a degradação térmica do material orgânico na ausência parcial ou total de oxigênio. Segundo LENÇO (2010, p.54), pode ser representada pela equação:



Os produtos principais da pirólise são os voláteis, o alcatrão e o carbono fixo ou carvão. Segundo LENÇO (2010, p. 55):

Os voláteis são os produtos que não são condensáveis em condições ambientais normais, no entanto são gases compostos e combustíveis. O alcatrão é uma mistura de hidrocarbonetos pesados e oxigenados, substâncias com uma distribuição atômica $H/C > 1,0$. O alcatrão, para toda a finalidade prática, pode ser tratado como um produto da pirólise. O carbono fixo é geralmente rico em carbono sólido com uma menor fração de hidrogênio, oxigênio e heteroatômicos presentes no combustível ou resíduo.

Segundo Ushima (apud, LENÇO, 2010, p.55):

Para biomassas, a temperatura de início de pirólise, à pressão de 1 bar, é de cerca de 200 °C. Os gases e vapores liberados durante a pirólise também caminham em sentido contrário ao fluxo de calor, de forma semelhante ao vapor d'água de secagem, também contribuindo para o retardamento do aquecimento da partícula. A temperatura de reação e a temperatura da região de pirólise não são a mesma temperatura distribuída

pela partícula e a frente de pirólise move-se em função do gradiente de temperatura na partícula.

A Figura 21 apresenta a localização específica de onde estão ocorrendo as reações de termo degradação, chamada de região de pirólise, Tillman (apud, LENÇO, 2010, p. 56)

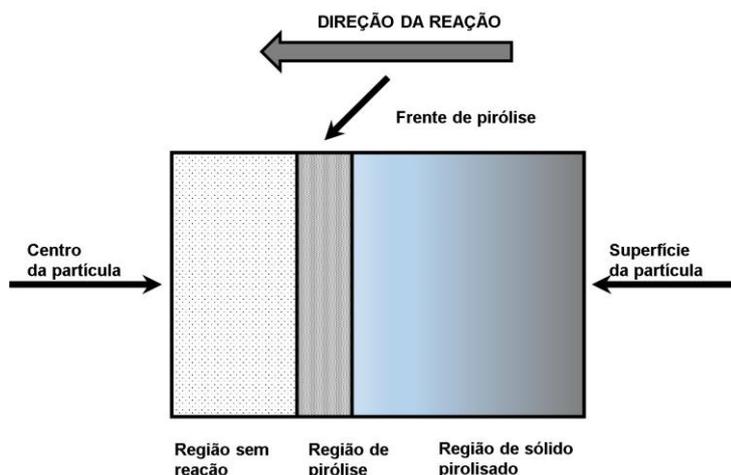


Figura 19: Esquema de um processo de pirólise em uma partícula sólida.

Fonte: Tillman, (apud, LENÇO, 2010, p. 53), adaptado pelo autor

Oxidação do carvão

O processo de queima ou oxidação do carvão é facilmente encontrado em operações industriais ou plantas de geração de energia. Segundo LENÇO (2010, p.56):

A maior preocupação no ambiente da fornalha é a difusão do oxigênio sobre a superfície da partícula. Essa difusão acelera o mecanismo de combustão que a partir do fim da etapa da pirólise, quando os fluxos de gases e vapores de dentro para fora da partícula se reduzem drasticamente, permitem o oxigênio e outros gases reagentes presentes no lado externo penetrem no interior do resíduo carbonoso e reajam com os componentes sólidos.

Perdas de calor na combustão

Mesmo na combustão completa, há perdas de calor nos gases de exaustão, sejam eles produtos secos ou com vapor d'água, essas perdas podem ou não ser inerentes ao processo de combustão.

A primeira perda deve-se do vapor d'água nos gases de exaustão (perda do calor contido vapor d'água presente nos gases de exaustão), formado a partir da

água contida no combustível e daquela gerada pela queima do hidrogênio. A segunda corresponde à perda nos gases seco da exaustão, quando contiverem ar em excesso e saírem com uma temperatura maior que a ambiente. (ELETROBRÁS/PROCEL, 2001).

Equipamentos para combustão

Nas caldeiras aquatubulares de usinas sucroalcooleiras, os equipamentos utilizados são queimadores para combustíveis sólidos de tal modo que para uma combustão eficiente, a mistura ar/combustível deve ser tal que haja ar suficiente ao redor de todas as partículas. Esses equipamentos requerem atenção especial no monitoramento da umidade do combustível, reduzindo-a ao menor nível possível.

Os tipos de queimadores mais utilizados são:

- **Grelhas**, que podem ser aplicadas para todos os combustíveis sólidos. O combustível é colocado sobre um leito rígido, onde recebe o ar de combustão. Embora de baixo rendimento, é o equipamento mais adequado para caldeiras de pequeno porte.
- **Leito Fluidizado**, neste tipo de equipamento as partículas sólidas ficam em suspensão pela ação do fluxo ascendente de ar e combustível, que é injetado na parte inferior da câmara de combustão. O objetivo é homogeneizar a mistura através da turbulência gerada e pela grande velocidade de ar no interior da câmara. As principais vantagens são: maior relação entre o ar e o combustível, possibilitando uma mistura com menor excesso de ar; fácil manuseio do combustível, na alimentação e retirada, por conta do projeto; possibilidade de admitir alto teor de materiais inertes no combustível podendo trabalhar com até 95%; baixo nível de poluição, podendo-se adicionar calcário ou dolomita ao combustível para diminuição de SO₂.

A principal desvantagem é o porte do ventilador, que deve ser mais potente do que o que seria utilizado na queima convencional. (ELETROBRÁS/PROCEL, 2001)

Eficiência térmica de caldeiras

No processo de operação de uma caldeira, se faz necessário o monitoramento constante da eficiência do equipamento, recorrendo inevitavelmente aos balanços de massa e energia para a obtenção de indicadores que devendo-se recorrer inevitavelmente aos balanços de massa e energia para a obtenção dos indicadores que revelam o rendimento da caldeira (ELETROBRÁS/PROCEL, 2001).

A eficiência térmica pode ser dada pela equação (1):

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_f} \quad (1)$$

onde:

η : eficiência térmica

Q_u : calor útil (kW)

Q_f : calor fornecido pelo combustível (kW)

Considerando que os valores de calor fornecido e útil são diretamente proporcionais à vazão em massa do combustível utilizado, e que a diferença entre esses valores indica a perda de energia sistema, podemos escrever a equação (2) como (ELETROBRÁS/PROCEL, 2001):

$$\eta = \frac{q_u}{q_f} \quad (2)$$

ou

$$\eta = 1 - \frac{p}{q_f}$$

onde:

q_u : calor útil (kW) energia útil por unidade de combustível (kJ/kg)

q_f : energia fornecida pelo combustível por unidade de combustível (kJ/kg)

p : energia perdida por unidade de combustível (kJ/kg)

O valor de q_f pode ser considerado, de maneira aproximada, igual ao poder calorífico do combustível. Desta maneira, percebe-se que o valor da eficiência varia dependendo de qual valor adota-se o poder calorífico: o superior ou o inferior (ELETROBRÁS/PROCEL, 2001).

Método direto

O Método Direto registra os fluxos de energia de entrada e saída. Embora simples, a desvantagem desse método, é a de não fornecer dados sobre as principais perdas do sistema (ELETROBRÁS/PROCEL, 2001).

A eficiência pela aplicação do método direto é dada pela equação (3):

$$\eta_{MD} = \frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_a)}{\dot{m}_c \cdot q_f} \quad (3)$$

onde:

η_{MD} : eficiência pelo método direto

\dot{m}_v : vazão mássica de vapor (kg/s)

\dot{m}_c : vazão mássica de combustível (kg/s)

h_v : entalpia do vapor produzido (kJ/kg)

h_a : entalpia da água de entrada (kJ/kg)

q_f : energia fornecida pelo combustível por unidade de combustível (kJ/kg)

Método indireto

O método Indireto: consiste no cálculo da eficiência a partir do registro das principais perdas existentes em uma caldeira, conforme abaixo descrito (ELETROBRÁS/PROCEL, 2001):

- ✓ Perdas relacionadas à combustão ineficiente.
- ✓ Perda de calor por radiação e convecção;
- ✓ Perda de calor na purga (descarga de fundo)
- ✓ Perda de calor na saída nos gases da chaminé

A Figura 22 apresenta os pontos de perda de calor na combustão, geração, distribuição e utilização do vapor.

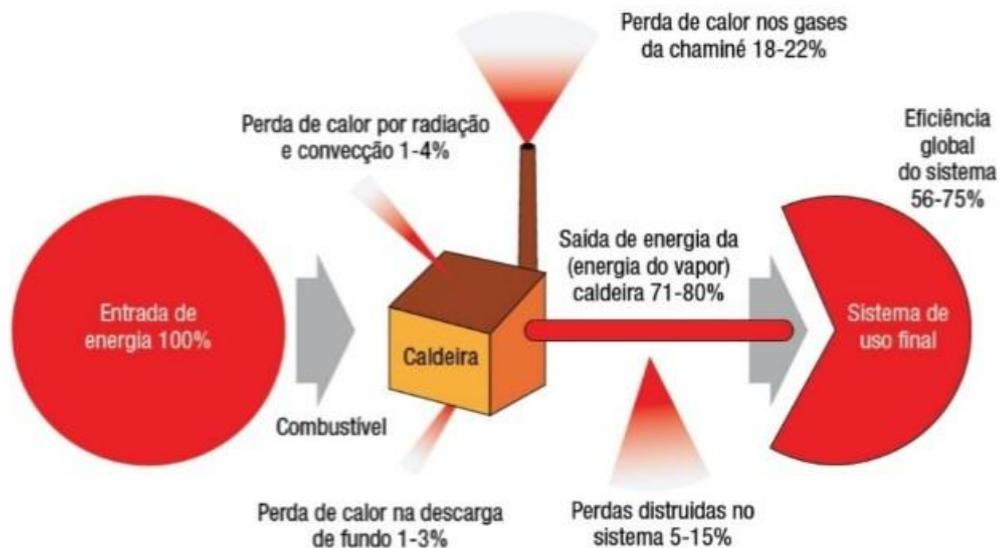


Figura 20: Pontos de perdas de calor

Fonte: Elektro 2015

Perdas pela chaminé

As perdas de calor do combustível pelos gases da chaminé podem ser divididas em duas parcelas principais: associadas aos gases secos formados na combustão; e as associadas ao vapor presente na chaminé. Em cálculos práticos e considerando que grande parte dos gases é constituída de nitrogênio atmosférico, a equação (4) pode ser substituída, sem incorrer em grandes erros, por (ELETROBRÁS/PROCEL, 2001):

$$p_{GS} = m_{gs} \cdot c_{par} (T_{CH} - T_{Ref}) \quad (4)$$

onde:

m_{GS} : vazão mássica dos gases de combustão, ([kg/kg de comb.]);

c_{Par} : calor específico médio do ar entre T_{Ch} e T_{Ref} , (kJ/kg °C).

T_{Ch} : Temperatura dos gases da chaminé (°C); (kJ/kg °C).

T_{Ref} : Temperatura de referência adotada (°C)

Outra forma alternativa de calcular a perda, em termos percentuais, quando não se conhece o valor da vazão dos gases da combustão, é através da equação (5) a seguir (ELETROBRÁS/PROCEL, 2001):

$$P_{GS} = 100 \cdot \frac{[28,8 \cdot \lambda \cdot (1-a) \cdot (1+w) \cdot k] \cdot c_{Par} \cdot (T_{Ch} - T_{Amb.})}{PC} \quad (\%) \quad (5)$$

onde:

λ : Coeficiente de excesso de ar

a: fração em massa de umidade presente no combustível (valor entre 0 e 1)

w: fração em massa de umidade presente no ar (valor entre 0 e 1)

T_{Ch} : Temperatura dos gases da chaminé ($^{\circ}C$);

$T_{Amb.}$: Temperatura ambiente ($^{\circ}C$)

PC: Poder calorífico do combustível (kJ/kg $^{\circ}C$).

O parâmetro k é função da composição do combustível e é dado pela equação (6):

$$K = 4,7 \left[\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S-O}{32} \right] \quad (6)$$

onde:

C: Fração em massa de Carbono presente no combustível

H: Fração em massa de Hidrogênio presente no combustível

O: Fração em massa de Oxigênio presente no combustível

S: Fração em massa de Enxofre presente no combustível.

As perdas associadas à presença de vapor na chaminé podem ser calculadas por duas parcelas: uma associada ao fato do vapor d'água estar acima da temperatura ambiente equação (7) e a outra relacionada com o calor latente de vaporização da água equação (8) (ELETROBRÁS/PROCEL, 2001):

$$p_{VS} = m_v \cdot c_{pv} \cdot (T_{CH} - T_{Ref}) \quad (7)$$

$$p_{VL} = m'_v \cdot h_{iv} \quad (8)$$

onde:

m_v : vazão mássica total de vapor (kg/kg de combustível)

c_{pv} : calor específico médio do vapor entre as temperaturas T_{CH} e T_{Ref}

(KJ/kg°C)

m'_v : vazão mássica de vapor formado na combustão e presente no combustível (kg/kg de combustível)

h_{iv} : entalpia de vaporização da água na entalpia de referência (kJ/kg)

Perdas por radiação e convecção

A determinação das perdas por radiação e convecção pelo costado das caldeiras é, geralmente, complexa, devido às diversas e complexas medições necessárias para sua obtenção. De maneira geral, adota-se que estas perdas variam entre 1% a 4% da energia fornecida (ELETROBRÁS/PROCEL, 2001).

Perdas por purgas

Esta parcela está relacionada à perda de energia causada pelo fluxo de água retirada na purga, sendo dada pela equação (9) (ELETROBRÁS/PROCEL, 2001):

$$p_p = m_p \cdot c_{pa} (T_p - T_{Ref}) \quad (9)$$

onde:

m_p : vazão média de água purgada, ([kg/kg] de combustível);

c_{pa} - calor específico da água no estado líquido, [kJ/kg °C]; e

T_p - temperatura de saturação da água na pressão da caldeira, (°C).

Perdas associadas à temperatura das cinzas

Na queima de combustíveis sólidos, a saída de cinzas implica perdas que, a rigor, devem ser calculadas para cada caso específico. Na prática, este valor pode ser estimado pela equação (10) abaixo descrita (em kJ/kg de combustível), na qual o valor 1170 representa um valor médio aproximado da entalpia sensível das cinzas.

$$P_{TC} = m_R \cdot 1170 \quad (10)$$

onde:

m_R - massa de cinza obtida pela massa de combustível, ([kg/kg] de comb.)

Perdas associadas ao combustível não convertido misturado com as cinzas

Para obter-se o valor exato desta perda seria necessário realizar um ensaio para determinar o poder calorífico da mistura de cinzas e de combustível não convertido. Como na maioria das vezes isto não é possível, costuma-se realizar a análise da quantidade de carbono sem queimar nas cinzas, que é determinada de maneira mais simples. A partir deste valor, estima-se esta perda (em kJ/kg de combustível) pela equação (11), na qual o valor 33.780 representa um fator de correção.

$$P_{CC} = m_c \cdot 33.780 \quad (11)$$

onde:

m_c - massa de carbono presente nas cinzas, ([kg/kg] de comb.)

Perdas totais

Após a determinação das perdas, se estas forem obtidas em valores absolutos, a eficiência pelo método indireto pode ser dada pela equação (12):

$$\eta_{MI} = 1 - \frac{\sum \text{Perdas}}{q_f} \quad (12)$$

Esta equação (13) pode também ser apresentada da seguinte forma :

$$\eta_{MI} = 1 - \left[K + \frac{(\lambda a/c + 1) c_p \cdot (T_{CH} - T_{Ref})}{PC} \right] \quad (13)$$

onde:

K: Representa a somatória de todas as perdas exceto as perdas pela chaminé, correspondendo a menor parcela das perdas.

λ : Coeficiente de excesso de ar na combustão, relacionando o ar real fornecido com o ar teórico requerido pelo combustível;

PC – Poder calorífico do combustível.

Se as perdas forem obtidas em termos percentuais, a eficiência é obtida através da equação (14), (ELETROBRÁS/PROCEL, 2005):

$$\eta_{MI} = 1 - \sum \text{Perdas} \quad (14)$$

Metodologia

Procedimento de aquisição de dados

Dentro do objetivo do trabalho proposto, foi elaborado um passo a passo para obter informações das usinas sucroalcooleiras e das especificações técnicas dos modelos de caldeiras.

A Figura 23 apresenta o fluxograma das etapas para obtenção das informações.

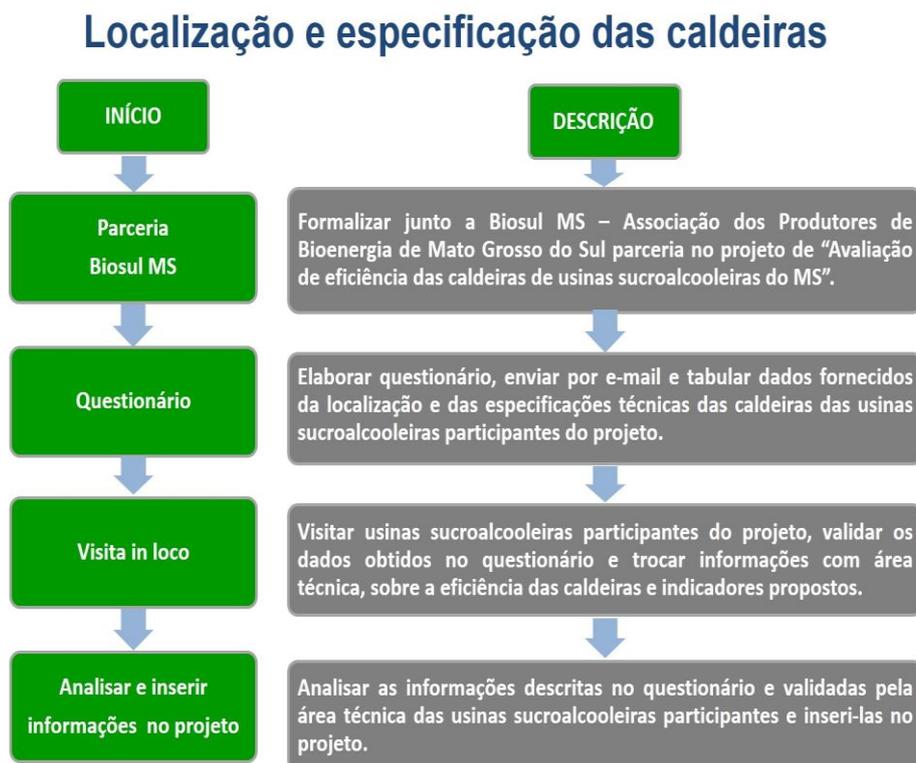


Figura 21: Fluxograma para localização e especificação das caldeiras

Análise da eficiência da combustão

Para a realização do estudo laboratorial da queima do bagaço de cana-de-açúcar, pretendeu-se estabelecer uma referência para a análise da eficiência da

combustão do bagaço coletado.

Foi elaborado um passo a passo para a coleta das amostras de bagaço de cana-de-açúcar, cinzas da fornalha e cinzas do filtro.

A Figura 24 apresenta o fluxograma das etapas da análise da eficiência da combustão.

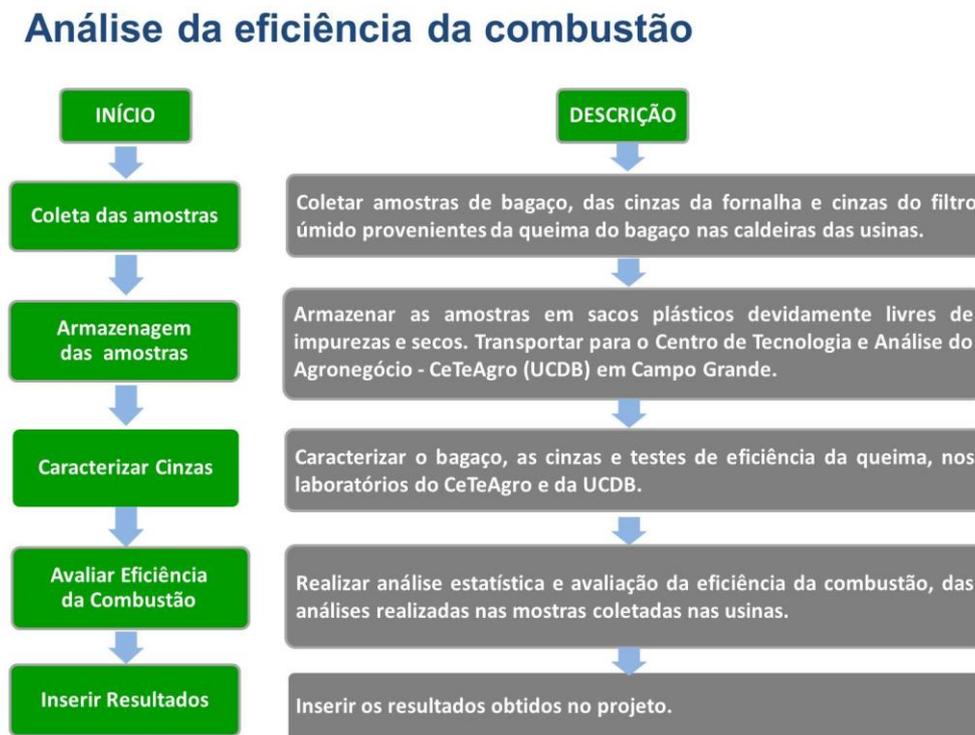


Figura 22: Fluxograma da análise da eficiência da combustão.

Local da pesquisa

A pesquisa foi desenvolvida no Centro de Tecnologia e Análise do Agronegócio da Universidade Católica Dom Bosco (CeTeAgro/UCDB) em Campo Grande, Estado do Mato Grosso do Sul com visitas às unidades sucroalcoleiras após autorização das empresas.

Substrato

Foram utilizadas como amostras, o bagaço e cinzas das fornalhas e dos filtros das caldeiras provenientes da queima do bagaço. Estas cinzas foram coletadas junto às usinas sucroalcooleiras de Mato Grosso do Sul participantes do projeto.

Os Resultados e a Discussão são apresentados no formato de artigo conforme as normas do Programa, o que explica a existência de Tabelas e Figuras com o mesmo número daquelas no corpo da Dissertação. A Metodologia também foi incluída no artigo (embora esteja apresentada na íntegra no Apêndice A), que foi formatado para a revista **Engenharia Agrícola Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering**, cujas normas encontram-se no Apêndice B.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agricultura em foco. **Botânica: Morfologia**. Imagem disponível em <http://agriculturainfoco.blogspot.com.br/2011/12/cana-de-acucar_06.html>. Acesso em: Jul. 2016

AOAC, Journal of OAC Internacional. **Evaluation of Brazilian Sugarcane Bagasse Characterization: An Interlaboratory Comparison Study**. Acesso pago disponível em <<http://www.ingentaconnect.com/content/aoac/jaoac/2016/00000099/00000003/art00001>>. Acesso em: Out. 2016.

APHA; AWWA; WPCF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21 th ed. Washington: American Public Health Association, 2005.

ARIEDI, V. R. J.; MIRANDA, J. R. **Combustão do Bagaço da Cana-de-açúcar, Autossuficiência Energética e Carbono Neutro**. VII Workshop Agroenergia 05 a 06 de junho de 2013 – Ribeirão Preto. Disponível em BRASIL, EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/monitoramento-por-satelite/busca-de-publicacoes/-/publicacao/972239/combustao-do-bagaco-da-cana-de-acucar-autossuficiencia-energetica-e-carbono-neutro>>. Acesso em: Ago. de 2015.

BARCELOS, S. T. **Caracterização das cinzas das caldeiras provenientes da queima do bagaço e palha em usinas de cana-de-açúcar no Estado de Mato Grosso do Sul**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Católica Dom Bosco (UCDB). Campo Grande – MS. 2015.

BIOSUL MS. **Mapa das unidades associadas em operação**. 1 ilustração, Disponível em <<http://www.biosulms.com.br>>. Acesso em: Abr. 2015.

BIOSUL MS. **Primeira Estimativa – Safra 2016/2017**. Disponível em <http://www.biosulms.com.br/_arquivos/resultado/203864646572229f24c06e8.02103586.pdf>. Acesso em: Jul. 2017.

BOCCI, E.; DI CARLO, A.; MARCELO, D. **Power plant perspectives for sugarcane mills**. Energy, v.34 p. 689-698, 2009

BRAUNBECK, O.A.; BAUEN, A.; ROSILLO-CALLE, F.; CORTEZ, L.A.B. **Prospects for green cane harvesting and cane residue use in Brazil**. Biomass and Bioenergy, Oxford, v.17, n.6, p.495-506, 1999.

BRASIL, Agência Embrapa de Informação Tecnológica - Ageitec. **Torta de Filtro**.

Imagem disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_108_22122006154841.html>. Acesso em: Out. 2015

BRASIL, Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais do 4º trimestre de 2016**. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+4%C2%BA+trimestre+de+2016/2cc14375-3e1c-9dfe-f6a6-a5a1fd69f021>>. Acesso em: Jul. 2017

BRASIL, Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais do 1º trimestre de 2017**. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+1%C2%BA+trimestre+de+2017/798691d2-990b-3b36-1833-c3e8c9861c21>>. Acesso em: Jul. 2017

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA. **Zoneamento Agroecológico da cana-de-açúcar**. Brasília, outubro de 2009.

BRASIL, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. **Anuário estatístico da agroenergia 2014: statistical yearbook of agrienergy 2014** / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Produção e Agroenergia. Bilingue. – Brasília: MAPA/ACS, 2015. Acesso em: Mai. 2015.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia – MME, Secretaria de Energia Elétrica | Departamento de Monitoramento do Sistema Elétrico. **Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico, maio 2017**. <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/4475726/Boletim+de+Monitoramento+do+Sistema+El%C3%A9trico+-+Maio+-+2017.pdf/1aa65ba9-deeb-4359-83de-a40d749f0a92>> Acesso em: Jul. 2017.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia – MME, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. **Resenha Energética Brasileira. Exercício de 2016, Edição: Junho de 2017**. Disponível em <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+-+Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+2017+-+ano+ref.+2016+%28PDF%29/13d8d958-de50-4691-96e3-3ccf53f8e1e4?version=1.0>>. Acesso em Jul. 2017.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia – MME, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024**. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2015.

BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego – MTE. **Norma Regulamentadora NR13 – Caldeiras e vasos de pressão**. PORTARIA N.º 594, DE 28 DE ABRIL DE 2014.

BRAZILENERGY. **Evolução acumulada do PIB e do consumo de energia elétrica no Brasil**.1 Gráfico, Disponível em <<http://brazilenergy.com.br/quem-somos/perfil-do-setor/>>. Acesso em Abr. 2015.

CANAMIX. **Colheita Mecanizada**. Imagem disponível em: <<http://www.canamix.com.br/conteudo/colheita-mecanizada-ja-supera84-da-area-de-cana-plantada-em-sao-paulo>>. Acesso em: Set. 2015.

CanaOnline. **Torta de filtro**. Imagem disponível em: <<http://www.canaonline.com.br/conteudo/os-beneficios-da-turfa-para-a-cana-de-acucar.html#.Vk8OR3arTIU>>. Acesso em: Out. 2015.

CHIEPPE JÚNIOR, J. B. **Tecnologia e fabricação do álcool**. Inhumas: IFG; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012. 74 p.

CanaOnline. **Brasil – líder mundial na produção de cana e tecnologia sucroenergética**. Disponível em <<http://www.canaonline.com.br/conteudo/brasil-lider-mundial-na-producao-de-cana-e-tecnologia-sucroenergetica.html#.WCwoD7IrLIU>>. Acesso em: Nov. 2016.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS, FUPAI/EFFICIENTIA. **Eficiência energética no Uso de Vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005. 196p.

CICLOVIVO. **Brasileiro descobre que bagaço de cana-de-açúcar pode purificar água**. Imagem disponível em: <<http://ciclovivo.com.br/noticia/brasileiro-descobre-que-bagaco-de-cana-de-acucar-pode-purificar-agua/>>. Acesso em: Set. 2015.

COOPERCITRUS – Cooperativa de Produtores Rurais. **Corte nos recursos do Prorenewa deve limitar renovação da cana**. Imagem Disponível em <<http://www.coopercitrus.com.br/?pag=noticias&act=detalhes¬icia=3287>>. Acesso em: Jul. 2016

COOPERCITRUS – Cooperativa de Produtores Rurais. **SEMINÁRIO DISCUTE SOBRE O USO VERSÁTIL DA PALHA NA CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR**. Imagem disponível em: <<http://coopercitrus.com.br/?pag=noticias&act=detalhes¬icia=2085&categoria=>>>. Acesso em: Set. 2015.

Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira cana-de-açúcar**, v. 1 – Safra 2014/15, n.3 – Terceiro Levantamento, Brasília, p. 1-27, dez. 2014.

Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB. **Séries históricas**. Disponível em <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&Pagina_objcmsconteudos=2#A_o_bjcmsconteudos>. Acesso em: Jul. 2017.

CORDEIRO, C.C.; FAIRBAIRN, M.E.R.; FILHO, R.T. **Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios**. Química Nova, Vol. 32, No. 1, 82-86, 2009.

COUNCIL OF INDUSTRIAL BOILERS OWNERS - CIBO. **Energy efficiency handbook**. Edited by Ronald A. Zeitz. Burke: CIBO 1997. 64 p.

CRUZ, C.H. DE BRITO. **Bioenergia da cana-de-açúcar no Brasil: sustentabilidade, redução de emissões e segurança energética**. In: CORTEZ, L.A.B. [Coord.]. **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade**. São Paulo, SP: Blucher. 2010. p. XXVIII-XXIX.

CTBE, Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol. **CTBE divulga estudo que padroniza a caracterização do bagaço da cana-de-açúcar.** Disponível em <http://ctbe.cnpem.br/pt-br/ctbe-divulga-estudo-padroniza-caracterizacao-bagaco-cana-acucar/>>. Acesso em: Out. 2016.

DIRECT INDUSTRY. **Caldeira Flamotubular.** Imagem disponível em: <http://www.directindustry.com/prod/byworth-boilers/product-25820-128175.html>>. Acesso em: Nov. 2015

ELETROBRÁS/PROCEL. **Conservação de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos.** Itajubá, MG: FUPAI, 2001. 2ª ed.

ELEKTRO. **Manuais Elektro de eficiência energética – Segmento industrial – Geração de Vapor e Calor.** Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL/ELETROBRÁS. Coordenação geral: Pense Eco Consultoria. São Paulo – SP, p. 3-36. 100p. Disponível em http://www.elektro.com.br/Media/Default/DocGalleries/Eficientiza%C3%A7%C3%A3o%20Energ%C3%A9tica/GERACAO_DE_VAPOR_E_CALOR.pdf>. Acesso em: Ago. 2015.

ENCYCLOPEDIA OF ALTERNATIVE ENERGY. **Boiler.** 1 ilustração, color. Disponível em http://www.daviddarling.info/encyclopedia/B/AE_boiler.html>. Acesso em Abr. 2015.

ERNESTO, Vívian A. R. T. **Caracterização Térmica do Bagaço da cana – de-açúcar Visando Aproveitamento Energético.** 115 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2009.

FERNANDES, A. J. **Manual da cana-de-açúcar.** Piracicaba: Livroceres, 1984.196 p.

FUTUROBIO Energias Renováveis. **CTC lança tecnologia para recolhimento e aproveitamento sustentável da palha da cana-de-açúcar.** Imagem disponível em: <http://www.futurobio.com.br/ctc-lanca-tecnologia-para-recolhimento-e-aproveitamento-sustentavel-da-palha-da-cana-de-acucar/>>. Acesso em: Set. 2015.

GOES, T.; MARRA, R.; SILVA, G. S. Setor sucroalcooleiro no Brasil. Situação atual e perspectiva. **Revista de política agrícola**, São Paulo – SP, Ano XVII. n.2, Abr/Maio/Jun 2008.

GONÇALVES, J.E. 2006. Caracterização química e energética de bagaço de cana-de-açúcar produzidos com rejeitos de resíduos sólidos humanos e madeira *Eucalyptus grandis*. Botucatu, 2006.

Instituto do Açúcar e do Alcool - IAA/PLANALSUCAR. **Superintendência Geral, Piracicaba, SP. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil;** coordenação: José Orlando Fº. Piracicaba, 1983. 369p. ilustr.

Instituto acende Brasil - Iniciativa Para o Uso da Terra – INPUT. **Avaliação do potencial de geração de eletricidade a partir de madeira no Brasil - Outubro de 2015.** Disponível em < <http://www.inputbrasil.org/wp->

content/uploads/2017/08/Relatorio_Avaliacao-do-potencial-de-geracao-de-eletricidade-a-partir-da-madeira-no-Brasil.pdf>. Acesso em: Out. 2016.

JENKINS, B.M.; THY, P.; TURN, S.Q. **Composition and microstructure of ash deposits from co-firing biomass and coal**. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/242546186_COMPOSITION_AND_MICROSTRUCTURE_OF_ASH_DEPOSITS_FROM_CO-FIRING_BIOMASS_AND_COAL>. Acesso em: Jun. 2017

JORDAN, R. A.; JUNIOR, R. B.; CORTEZ, L. A. B.; MOTOMIYA, A. V. A. **Caracterização granulométrica de biomassa polidispersa pelo método de peneiramento mecânico**. Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering. Disponível <<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n1p102-113/2016>>. Acesso em: Jul. 2017.

JORNAL DA CANA. **Moagem é antecipada em SP**. Imagem disponível em: <<https://www.jornalcana.com.br/moagem-da-cana-e-antecipada-em-sp/>>. Acesso em: Set. de 2015.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício no solo, planta e fertilizante / Gaspar**. Uberlândia, 2004. (GPSi-ICIAG-UFU. Boletim técnico ; 02) 50f.

GONDIN, M. A. **Mapa político-administrativo de Mato Grosso do Sul**. 1 ilustração, color. Disponível em <<http://pt.slideshare.net/mgondim/geografia-do-mato-grosso-do-sul-economia-blog-do-prof-marco-aurlio-gondim-wwwmgondimblogspotcom>>. Acesso em: Abr. 2015.

MARAFON, Anderson Carlos. **Análise quantitativa de crescimento em cana-de-açúcar: uma introdução ao procedimento prático**./ Anderson Carlos Marafon. – Aracaju : Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2012. 29 p. (Documentos / Embrapa Tabuleiros Costeiros. Disponível em <http://www.cpatc.embrapa.br/publicacoes_2012/doc_168.pdf>. Acesso em: Mai 2017.

MARINO, E.. **Desempenho de Caldeiras com Palha de cana-de-açúcar**. Seminário Stab – FENASUCRO Agroindustrial. Sertãozinho-SP. Disponível em <http://www.stab.org.br/sem_stab_fena_agroind_2014/ericson.pdf>. Acesso em: Set. 2015.

MATSUOKA, S.; BRESSIANI, J. A.; Maccheroni, W; FOUTO, I. **Bioenergia de cana**. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/302932714_Bioenergia_de_Cana>. Acesso em: Set. 2016.

MILES, T. R.; BAXTER, L. L; BRYERS, R. W.; ODEN, L.L. **Alkali deposits found in biomass power plants. A preliminary investigation of their extent and nature**. Sandia National Laboratory and the National Renewable Energy Laboratory are part of the National Laboratory System of the U.S. Department of Energy. Vol. 2 Fev. 1996.

PERDONÁ, R. C. **Aproveitamento energético de resíduos e biomassa**. São Paulo: Odebrecht Agroindustrial. Disponível em <http://www.crq4.org.br/sms/files/file/aproveitamento_biomassa_perdona_odebrecht.pdf>. Acesso em: Mai. 2016.

PROQUE, A. L. **Externalidades do setor sucroalcooleiro: Inserção de centrais cogeneradoras a bagaço de cana**. Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade |vol. 6, n.3, p. 446 - 468 | jul - dez 2014.

ROCCO, C. D.; MORABITO, R. **Um modelo de otimização para as operações de produção de vapor em caldeiras industriais**. Gestão & Produção, São Carlos, v. 19, n.2, p.273-286, 2012.

SANTOS, A. N. S.; PAIXÃO, Z. T. **Curso: NR 13- Segurança na operação de caldeiras**. Campo Grande-MS: SENAI/MS, 2013. 152 p.

SALUM, A. D. **Eficiência energética em sistemas de combustão de caldeiras**. Salvador: Dissertação (Mestrado) Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica. Programa de Pós Graduação em Engenharia Industrial – PEI. 2011

SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. **Cana-de-açúcar: Bioenergia, Açúcar e Etanol. Tecnologias e Perspectivas**. – 2ª ed. Ver. e ampl. – Viçosa, MG : Os Editores, 2011

SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. H. de; COLODETE, J.L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. G.; REZENDE, S. T. **Potencial da palha de cana-de-açúcar para a produção de etanol**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, Brasil. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v35n5/a25v35n5.pdf>>. Acesso em: Nov. 2015.

SEGATO, S. V.; PINTO, A. S. P.; JENDIROBA, E. **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO – ESALQ/USP. Piracicaba: CP 2, 2006.

SILVA, J. S. V.; ABDON M. M. Delimitação do pantanal brasileiro e suas sub-regiões. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v.33, nº especial, p.1703-1711, Brasília, Out. 1998.

SOARES, M. M. N. S.; POGGIALI, F. S. J.; BEZERRA, A. C. S.; FIGUEIREDO R. B.; AGUILAR, M. T. P.; CETLIN, P. R. **The effect of calcination conditions on the physical and chemical character, Maristics of sugar cane bagasse ash**. Rem: Rev. Esc. Minas [online]. 2014, vol.67, n.1, pp.33-39.

WYLEN, G. J.; SONTAG, R.; BORGNACKE, C. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. Tradução da 4ª ed. norte-americana. São Paulo: ed. Edgard Blücher, 2013.

SOSA ARNAO, J. H. **Caldeiras aquatubulares de bagaço – Estudo do sistema de recuperação de energia**. Campinas 2007. 231 f. Tese (Doutorado) Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. 30 Out. 2007.

SOUZA, Z. J. de, AZEVEDO, P. F. de. **Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas**. Rev. Econ. Sociol. Rural [online]. vl.44, n.2, p. 179-199, 2006.

SOUZA, G. N.; FORMAGINI, S.; CUSTÓDIO, F. O.; SILVEIRA, M. M. **Desenvolvimento de Argamassas com Substituição Parcial do Cimento Portland por Cinzas Residuais do Bagaço de Cana-de-açúcar**. 2007. In: 49º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON. Anais... Bento Gonçalves, Brasil: IBRACON. CD- ROM.

STROBEL, C. **Termodinâmica técnica** [livro eletrônico]. Curitiba; InterSaberes, 2016.

TEIXEIRA, F. N. **Caracterização e controle das emissões de óxidos de nitrogênio e material particulado em caldeiras para bagaço**. Universidade Federal de Itajubá – Instituto de Engenharia Mecânica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Tese de Doutorado. Itajubá/MG Mar. 2005.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Fotografia do setor sucroenergético no Brasil**. Disponível em: <file:///C:/Users/Paulo%20Pereira/Downloads/2f253574533bf5841df311d0e1f2e58e.pdf>. Acesso em: Out. 2015.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Moagem de cana-de-açúcar e produção de etanol – safra 2014/2015**. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/pdfHPM.php?idioma=1&tipoHistorico=4&idTabela=1617&produto=&safra=2014/2015&safralni=&safraFim=&estado=RS,SC,PR,SP,RJ,MG,ES,MS,MT,GO,DF,BA,SE,AL,PE,PB,RN,CE,PI,MA,TO,PA,AP,RO,AM,AC,RR>. Acesso em: Out. 2015.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **A Bioeletricidade da cana em números – Setembro de 2016**. Disponível em: <http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=42227670>. Acesso em: Out. 2015.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **BOLETIM: A Bioeletricidade da Cana em Números – Junho de 2017**. Disponível em <www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=759106>. Acesso em: Jul. 2017.

VIEIRA, Maria Célia Azeredo. **Setor sucroalcooleiro brasileiro: Evolução e perspectivas**. Rio de Janeiro: BNDES Banco Nacional de Desenvolvimento. p. 209-245. Jun. 2007.

Zanini Indústria e Montagens Ltda. **Empreendimentos**. Disponível em <http://www.sermatec.com.br/empreendimentos/>. Acesso em: Set. 2016.

CAPÍTULO I: Cinzas como parâmetro de eficiência para queima de bagaço em caldeira aquatubular

Paulo Pereira de Souza¹, Jeferson Lucas Salvador da Silva² e Marney Pascoli Cereda³.

1 Universidade Católica Dom Bosco/Centro de Tecnologias e Estudos do Agronegócio (CeTeAgro/UCDB), Campo Grande, MS, Brasil, e-mail: paulopsouza01@gmail.com

2 Universidade Católica Dom Bosco/Centro de Tecnologias e Estudos do Agronegócio (CeTeAgro/UCDB), Campo Grande, MS, Brasil, e-mail: lucas2011.salvador@hotmail.com

3 Universidade Católica Dom Bosco/Centro de Tecnologias e Estudos do Agronegócio (CeTeAgro/UCDB), Campo Grande, MS, Brasil, e-mail: cereda@ucdb.br

CINZAS COMO PARÂMETRO DE EFICIÊNCIA

PARA QUEIMA DE BAGAÇO EM CALDEIRA AQUATUBULAR

RESUMO: Na busca de um parâmetro de eficiência para a queima de bagaço em caldeira aquatubular, foram coletadas e analisadas amostras de cinco unidades sucroalcooleiras de Mato Grosso do Sul, em julho/2016 e maio/2017. O artigo apresenta os resultados da caracterização de Cinzas da Fornalha e Cinzas do Filtro Úmido, obtidas de caldeiras aquatubulares de alta pressão. Para fins de comparação foram também coletadas e analisadas amostras de bagaço nas mesmas unidades. O melhor parâmetro de eficiência das caldeiras foi a massa de cinzas obtidas quando as amostras foram queimadas em mufla em temperatura de 550°C por 5 horas, considerando-se como mais eficientes as unidades cujas amostras resultaram em menor quantidade de cinzas. As cinzas das diferentes unidades sucroalcooleiras apresentaram parâmetros diferentes, mas o teor de sílica não se mostrou um bom parâmetro como indicador de eficiência. A análise granulométrica da Cinza da Fornalha em função da distribuição mássica apresentou-se como um bom indicador da eficiência, assim como a densidade das cinzas obtidas em laboratório. Por sua facilidade de obtenção e baixo custo, mostraram-se elementos complementares à determinação da massa de cinzas em mufla.

PALAVRAS-CHAVE: biomassa, cinzas, densidade, granulometria, sílica, umidade.

ABSTRACT: In order obtain an index for bagasse burning efficiency of an *water-tube* boiler, ash samples from five sugar cane alcohol plants from the state of Mato Grosso do Sul, in July/2016 and May/2017. This paper presents the characterization results from Furnace Ashes and Wet Filter Ashes, obtained from high pressure aquatubular boilers, as well as bagasse samples from the same plants, for comparison purposes. The best boilers efficiency parameter was the mass of ash obtained when the samples were burned in a muffle at 550 ° C for 5 hours, considering as the most efficient the units whose samples resulted in the least amount of ash. The ashes from the different plants resulted in different parameters, but the silica content was not a good parameter as an indicator of

25 efficiency. The particle size distribution of the furnace ash as a function of the mass distribution
26 was a good indicator of efficiency, as well as the ash density obtained in the laboratory. Due to its
27 ease of production and low cost, additional elements were shown to determine the mass of ash in
28 muffle.

29 **KEY-WORDS:** biomass, ash, density, grain size, silica, moisture.

30 **INTRODUÇÃO**

31 Segundo a Empresa de Pesquisa e Energia (EPE), a evolução da matriz de capacidade
32 instalada de energia elétrica no Brasil através da fonte de biomassa no período de Mai/2016 -
33 Mai/2017, foi de 4,5%, de 13.432 (MW) para um total de 14.040 (MW). Biomassa, corresponde a
34 9,2% da capacidade instalada de geração de energia elétrica do Brasil. Entre essas biomassas o
35 bagaço de cana-de-açúcar, representou 78,2% do total, seguido pela biomassa florestal com 20% e
36 de outras biomassas com 1,8% (MME 2017).

37 O bagaço é gerado no processo de extração do caldo de cana-de-açúcar, em difusor ou
38 moenda, é material fibroso embebido de água (de 48% a 52%) contendo resíduos de sacarose. Goes
39 (2008) lembra que essa biomassa, é porosa e polidispersa, com grande variedade de partículas, que
40 são geométrica e dimensionalmente diferentes, bem como apresenta características físico-químicas
41 distintas. Nas unidades processadoras de cana é utilizado como combustível das caldeiras, para
42 gerar energia.

43 O bagaço pode ser o associado à palha, na alternativa para gerar eletricidade (GOES 2008).
44 Para Jordan, (2016), conhecer as características das partículas do bagaço é muito importante, pois o
45 adequado funcionamento e operação de um processo de geração de energia e a busca de eficiência
46 estão diretamente relacionados às características do combustível utilizado. A variação da umidade
47 do bagaço é um dos itens que influenciam a eficiência da combustão e o aumento do consumo de
48 combustível. Secá-lo com os próprios gases de escape pode melhorar a eficiência energética na
49 produção de vapor.

50 O bagaço tem despertado interesse devido ao seu baixo custo de obtenção e seu potencial
51 calorífico, que chega a 4000 kcal/kg em condições ideais, em contraste com o potencial calorífico
52 do carvão mineral que é 6000 kcal/kg. No Brasil aproximadamente 95 % do bagaço gerado é
53 utilizado como combustível em fornalhas (CACURO, 2015), Os equipamentos utilizados para a
54 geração de energia nas usinas são denominados caldeiras, equipamentos destinados à produção de
55 vapor com pressão superior à atmosférica, que podem utilizar diferentes fontes de energia
56 (SANTOS 2013). Predominam dois tipos de caldeiras industriais, as flamotubulares (*fire-tube*) e as
57 aquatubulares (*water-tube*). As aquatubulares produzem vapor superaquecido, sob alta pressão e
58 utilizam principalmente o bagaço como combustível. Por outro lado CACURO, (2015) lembra que
59 a utilização do bagaço gera como resíduos a fuligem, partículas muito finas resultantes da
60 combustão incompleta que se depositam na caldeira, as cinzas geradas na caldeira (cinza pesada ou
61 cinza de fundo) e as cinzas volantes (*fly ash*). As cinzas são partículas finas que se elevam com os
62 gases gerados pela combustão e são capturadas nas chaminés, geralmente por filtros hidrostáticos.

63 A composição das cinzas pode variar de acordo com o material de análise, com os parâmetros
64 do processo de incineração e a porcentagem de umidade do material incinerado, configurando-se
65 assim como um material de composição e morfologia heterogênea. A média de cinzas gerada na
66 combustão é de 2,4 % em massa e as partículas de dióxido de silício (SiO_2) compõe cerca de 60%
67 das cinzas (CACURO, 2015).

68 Segundo Lenço (2010) a concentração de dióxido de silício (SiO_2) nas cinzas do bagaço de
69 cana-de-açúcar varia de 40 a mais de 80 % (CAMARGO et al., (1992); TURN et al., (1997);
70 JENKINS et al., (1998); GABRA (2001); REIN, (2007); MANYA e ARAUZO, (2008); PAULA,
71 (2008).

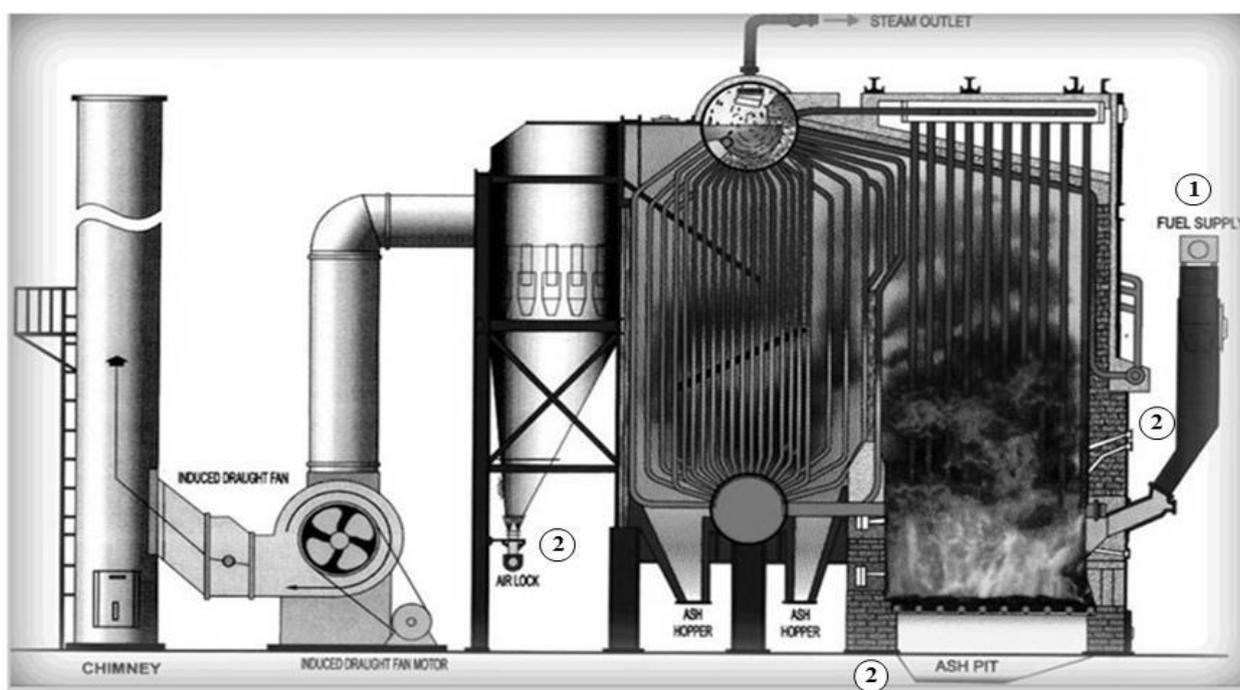
72 Segundo Castro (2016), os valores da concentração de dióxido de silício (SiO_2), podem estar
73 relacionados com as diferenças de solos onde a cana é cultivada, métodos de fertilização do solo,
74 métodos de queima do bagaço entre outros.

75 O artigo foca as cinzas para estabelecer um parâmetro para avaliar a eficiência da combustão
76 do bagaço no processo de queima na fornalha para produção de energia.

77 MATERIAIS E MÉTODOS

78 As amostras de cinza da fornalha foram coletadas na entrada e saída da fornalha e nos
79 trocadores de calor, no período médio de duas safras, julho/2016 e maio/2017. As amostras de
80 bagaço foram coletadas na esteira de alimentação que passa sobre o alimentador mecânico da
81 caldeira aquatubular.

82 A Figura 1 apresenta o desenho esquemático de uma caldeira aquatubular de grande porte,
83 com a indicação dos pontos de coleta das amostras de Bagaço (1) e Cinzas da Fornalha (2).



84 Legenda: (1) Ponto de coleta de Bagaço de cana-de-açúcar na esteira de alimentação;
85 (2) Pontos de coleta de Cinzas da Fornalha.

86 Figura 1. Imagem de desenho esquemático de caldeira aquatubular.

87 Fonte: BALIYAN, (2016), adaptada pelo autor.

88 Por questão de segurança, as cinzas da fornalha passam por um canal de água corrente para
89 redução da temperatura, o que só permite coletar o material insolúvel em água das cinzas. Outro
90 momento de coletar amostras é durante o processo de parada da caldeira para realização de

91 manutenção.

92 As amostras foram coletadas em sacos plásticos secos e livres de impurezas. No laboratório
93 uma parcela das amostras em sua umidade e granulometria original foi separada para análises e o
94 restante foi disposta em bandejas plásticas revestidas com filme de papel tipo Kraft e secas em
95 estufa com renovação e circulação de ar Marconi, modelo MA 037, à temperatura de 50°C, por um
96 período de 48h para Cinza da Fornalha e Bagaço, permitindo estabelecer a umidade inicial. As
97 amostras secas foram acondicionadas em frascos de vidro de 500 mL, tampadas e identificadas,
98 permanecendo em local ao abrigo da luz até o final das análises.

99 **CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS COLETADAS**

100 Todas as análises foram realizadas em triplicata, exceto a densidade, que foi feita em
101 quadruplicata.

102 **DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE**

103 Para determinar a densidade aparente das amostras, o volume de 300 mL da amostra foi
104 determinada em proveta de vidro de 1000 mL com graduação de (+/-10 ml), previamente pesada. A
105 massa foi obtida , em balança de precisão modelo BEL SSR 600 Classe II com capacidade máxima
106 de 600 g e mínima de 200 mg, com divisão de 10 mg.

107 **DETERMINAÇÃO DA GRANULOMETRIA**

108 O perfil granulométrico das amostras foi determinado com jogo de peneiras da marca
109 Abronzinox (formato circular, em aço inox e 2” de altura) de malha quadrada de abertura de: 4000
110 µm, 2800 µm, 1700 µm, 1000 µm, 850 µm, 425 µm, 180 µm, 90 µm, 53 µm e 45 µm. Após dez
111 minutos de agitação em frequência de 98 Hz, a massa retida em cada peneira foi estabelecida em
112 balança de precisão modelo BEL SSR 600 Classe II com capacidade máxima de 600 g e mínima de
113 200 mg e divisão de 10 mg.

114 O diâmetro médio das partículas das amostras foi determinado usando o método do Diâmetro
115 de Sauter (Ds) e a representação gráfica da Função de Densidade de Distribuição Mássica (FDDM).

116 O cálculo do Diâmetro de Sauter foi determinado através da equação [eq. (1)] (JORDAN,
117 2016).

$$D_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^7 (\Delta x_i / D_{pi})} \quad (1)$$

118 Em que,

119 D_s - Diâmetro de Sauter

120 Δx_i - Fração Mássica

121 D_{pi} - Diâmetro Médio

122 Para a determinação do diâmetro médio das partículas, foram empregados os seguintes
123 parâmetros: Fração Mássica (Δx_i), que é razão entre a massa retida na peneira e a massa total da
124 amostra; Diâmetro Médio (D_{pi}) a média aritmética da abertura da referida peneira e a
125 imediatamente superior; Fração Peneirada (x_i) fração do material que passou pela referida peneira;
126 Fração Retida (y_i) fração do material que ficou retida na referida peneira; Razão ($\Delta x_i / D_{pi}$) entre a
127 Fração Mássica e o Diâmetro Médio (JORDAN, 2016).

128 **TEOR DE UMIDADE**

129 Foi utilizado cadinho de porcelana, previamente seco e tarado, com aproximadamente 3g de
130 amostra, pesadas com exatidão em balança analítica marca Shimadzu, posteriormente dispostas na
131 estufa a 105°C durante 8 horas. As amostras foram resfriadas a temperatura ambiente em
132 dessecador, pesadas e os cálculos foram feitos segundo a metodologia descrita na American
133 Association of Agricultural Chemists (AOAC, 2016) e expressas em porcentagem.

134 **TEOR DE CINZAS**

135 Os cadinhos de porcelana previamente secos e tarados contendo três (3) gramas de amostra
136 seca foram levados colocados em forno mufla a 550°C, onde permaneceram por s 5 horas. Após,
137 foram resfriados em dessecador e pesados. Os cálculos seguiram a metodologia descrita na
138 American Association of Agricultural Chemists (AOAC, 2016) e foram expressos em g de cinzas
139 100^{-1} em massa seca.

140 **TEOR DE SÍLICA**

141 A determinação de sílica nas amostras previamente secas, seguiu a metodologia de
142 Korndörfer et al. (2004, p. 16 a p. 20), por técnica espectrofotométrica em Espectrofotômetro UV
143 Visível no comprimento de onda de 410 nm. Para a análise 0,10 g de amostra foram pesadas em
144 tubos de polipropileno de 60 mL, usando balança de precisão (0,0001g) Shimadzu AUY 220.
145 Adicionou-se 2 mL de H₂O₂ a 500 g L⁻¹ e agitou-se em Vortex marca Phoenix Luterco AP 56 por 5
146 segundos, adicionou-se 3 mL de NaOH 500 g L⁻¹ e procedeu-se a nova agitação no mesmo Vortex.
147 Após, a amostra foi colocada a 95°C em banho-maria marca Frisotom por aproximadamente 1 hora,
148 sob agitação. Quando a amostras não liberaram mais gases, os tubos foram tampados e
149 acondicionados na autoclave vertical marca Phoenix Luterco modelo AV por 1h à 123°C (1,5 atm).
150 Após esfriados, foram adicionados 45 mL de água destilada em cada tubo e o extrato transferido
151 para um frasco plástico identificado. Os frascos foram deixados em repouso até que os resíduos
152 fiquem depositados no fundo do tubo. Para a determinação, uma alíquota de 1 mL do sobrenadante
153 do extrato foi colocado em copo plástico de 50 mL. Acrescentou-se 19 mL de água destilada e 1 mL
154 de HCl 500 g L⁻¹ + 2 mL de molibdato de amônio a 50% de concentração. Agitou-se levemente a
155 amostra A cor amarela apareceu nas amostras contendo Si, proporcional à concentração. Decorridos
156 5 minutos, adicionou-se 2 mL de ácido oxálico, agitando levemente a solução e após 2 minutos fez-
157 se a leitura em Espectrofotômetro UV Visível marca FENTO modelo 600 plus, no comprimento de
158 onda de 410 nm. A cor amarela é pouco estável, permanecendo assim por apenas 15 min. Para
159 estabelecer a concentração de sílica da amostra, os resultados foram analisados por comparação
160 com uma curva padrão.

161 **ANÁLISE ESTATÍSTICA**

162 Dos resultados com distribuição normal foram estabelecidos a Média e Desvio Padrão (σ). As
163 médias foram comparadas entre si por teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade utilizando o
164 programa *Statistica data analysis software system version 7.0* (STASOFT INC., 2008).

165 **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

166 Com a decisão das usinas e destilarias de injetar energia elétrica na rede nacional, aumentou a
 167 preocupação com a eficiência da queima do bagaço, o que não ocorria quando as unidades
 168 processadoras apenas produziam para sua autossuficiência, como forma de garantir maior
 169 quantidade de energia utilizando o mesmo volume de combustível (SOUZA, 2006).

170 Com esse novo enfoque, a hipótese deste estudo é de que as cinzas representam a eficiência
 171 da queima do bagaço, na medida em que quanto maior eficiência, pouca biomassa residual de
 172 bagaço não queimado ocorre na amostra, e conseqüentemente pode-se afirmar que houve maior a
 173 eficiência da combustão.

174 **CARACTERIZAÇÃO FÍSICO QUÍMICA DAS AMOSTRAS COLETADAS.**

175 A Tabela 1 apresentam os teores de umidade (% na massa seca) iniciais das amostras quando
 176 coletadas na mesma unidade e no mesmo dia (Média de três determinações), de cinco unidades
 177 sucroalcooleiras do Mato Grosso do Sul.

178 Tabela 1 Teor de umidade das amostras de Bagaço de cinco unidades sucroalcooleiras do Mato
 179 Grosso do Sul, comparadas com as amostras de Cinzas da Fornalha.

Teor de umidade ($\text{g } 100\text{g}^{-1}$ em massa seca)		
Unidades sucroalcooleiras	Bagaço	Cinza da Fornalha
A	52,01 \pm 0,71 A*	2,99 \pm 0,03 A
B	47,83 \pm 1,63 AB	0,48 \pm 0,36 B
C	46,30 \pm 3,24 AB	8,43 \pm 0,76 A
D	16,08 \pm 1,89 C	0,76 \pm 0,75 B
E	45,25 \pm 1,02 B	0,03 \pm 0,01 B
Desvio Padrão (s)	14,44	3,49

180 * As médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente em nível
 181 de 5% de probabilidade entre si pelo teste Tukey $p < 0,05$.

182 Os valores do teor de umidade do bagaço estiveram próximos dos valores encontrados na
 183 literatura de aproximadamente 50% (SANTOS, 2011). A umidade encontrada para a unidade A foi
 184 a maior, diferindo das unidades para as unidades A, B , D, e D. A exceção foi a unidade C, que
 185 apresentou um valor muito baixo, próximo de 16%.

186 Bagaço com menor porcentagem de umidade favorece a combustão e é um dos indicadores da
 187 variação da eficiência energética e do consumo de bagaço de cana, mas na prática, isso não
 188 acontece nas usinas, outros fatores influenciam nos padrões de eficiência.

189 Na Tabela 2, estão descritos os valores que caracterizaram a densidade aparente em (kg/m³)
 190 do Bagaço e da Cinza da Fornalha (média de 4 determinações), de cinco unidades sucroalcooleiras
 191 do Mato Grosso do Sul.

192 Tabela 2. Densidade aparente das amostras de Bagaço, de cinco unidades sucroalcooleiras do Mato
 193 Grosso do Sul, comparadas com as amostras de Cinza da Fornalha.

Densidade aparente das amostras (kg/m ³)		
Unidade sucroalcooleira	Bagaço	Cinza da Fornalha
A	102,67 ± 4,52 A*	762,25 ±43,51 B
B	91,52 ±9,6 A	356,88 ±45,52 D
C	80,30 ±5,86 A	157,71 ±7,06 E
D	81,24 ±3,22 A	624,43 ±9,57 C
E	85,71 ±3,46 A	877,14 ±1,86 A
Desvio Padrão (s)	9,18	295,23

194 * As médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente em
 195 nível de 5% de probabilidade entre si pelo teste Tukey p<0,05.

196 A densidade aparente das amostras de Bagaço das cinco unidades estatisticamente são iguais,
 197 a Cinza da Fornalha todas estão diferentes.

198 Como eficiência de queima, espera-se que as unidades sucroalcooleiras mais eficientes

199 apresentem cinzas mais densas (maior densidade aparente). Por esse critério a unidade
200 sucroalcooleira E seria a mais eficiente, as unidades A, B e D estatisticamente são iguais e a
201 unidade C apresentou a menor densidade de Cinzas da Fornalha, portanto a pior eficiência para esse
202 fator.

203 A coleta de cinzas em uma unidade sucroalcooleira pode resultar em um índice de mais fácil
204 coleta periódica e a disponibilidade de um forno mufla no laboratório pode permitir a avaliação da
205 eficiência de queima como um procedimento simples e de baixo custo, a ser repetida de forma
206 periódica e segura, mas para isso é necessário constatar se essas cinzas de laboratório constituem
207 um bom índice de eficiência.

208 A média de cinzas gerada de bagaço é de 24 g de cinzas para cada quilograma de bagaço
209 queimado (CACURO 2015) e neste sentido, uma amostra com 100% de cinzas representaria uma
210 queima total da biomassa.

211 Nas amostras de bagaço coletadas as umidades variaram significativamente (Tabela 1), sendo
212 a mais alta na unidade A (52,01%), as unidades B, C e E não diferiram (45,25 a 47,83%), ambas
213 abaixo dos valores relatados na literatura, mas o menor valor foi obtido na unidade D (16,08%). Os
214 valores médios para umidade de bagaço, citados na literatura variam de 47 a 52% (LENÇO, 2010).

215 Quando ocorre a combustão, o volume do combustível apresenta redução, compatível com
216 seu conteúdo de material inflamável, ficando reduzido as suas cinzas, de menor volume, mas de
217 maior densidade. Os resultados obtidos para a densidade das amostras coletadas confirma essa
218 premissa. A densidade das amostras coletadas do bagaço (Tabela 2) variou de 80,30 a 102,67
219 kg/m^3 , enquanto as amostras de cinzas, mesmo não correspondendo ao mesmo bagaço, variaram
220 157,71 a 877,14 kg/m^3 , portanto as cinzas da fornalha foram cerca de 10 vezes mais densas que o
221 bagaço usado como combustível.

222 Com respeito às amostras coletadas nas unidades sucroalcooleiras para estabelecer o grau de
223 eficiência da queima (Cinzas da Fornalha), o mesmo raciocínio deveria ser válido. As amostras de
224 cinzas da fornalha, para os processos de combustão mais eficientes, deverão apresentar maior teor

225 de cinzas, portando menos material remanescente do combustível, o bagaço. Estas deveriam
 226 também apresentar maior densidade e partículas mais finas e finalmente, maior teor de sílica.

227 **CINZAS OBTIDAS EM LABORATÓRIO COMO ÍNDICE DE EFICIÊNCIA PARA**
 228 **QUEIMA DE BAGAÇO EM CALDEIRA AQUATUBULAR**

229 Seguindo a hipótese estabelecida, o primeiro parâmetro avaliado para estabelecer a eficiência
 230 da combustão nas usinas, foi o teor de cinzas presentes nas amostras, após a queima na mufla no
 231 laboratório. Para estabelecer a eficiência das caldeiras das cinco unidades sucroalcooleiras, o teor de
 232 cinzas das amostras coletadas foi comparado ao teor de cinzas também obtido em laboratório, pela
 233 queima das amostras de Bagaço, como apresentados na Tabela 3.

234 Tabela 3. Teor de cinzas como parâmetro de eficiência das amostras de Cinza do Bagaço
 235 comparadas com Cinzas da Fornalha em (g de cinzas 100g^{-1} em massa seca), após queimadas a
 236 550°C por 5 horas.

Teor de cinzas (g de cinzas 100g^{-1} em massa seca)		
Unidades	Cinza	Cinza
sucroalcooleiras	do Bagaço	da Fornalha
A	$9,09 \pm 0,52$ A	$88,77 \pm 7,53$ A
B	$4,91 \pm 0,35$ A	$90,73 \pm 4,44$ A
C	$7,37 \pm 0,60$ A	$25,54 \pm 8,44$ B
D	$6,76 \pm 0,21$ A	$97,42 \pm 0,07$ A
E	$8,81 \pm 0,52$ A	$97,43 \pm 0,61$ A
Desvio Padrão (s)	1,69	30,68

237 * As médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente em
 238 nível de 5% de probabilidade entre si pelo teste Tukey $p < 0,05$.

239 Analisando os dados da Tabela 3, observa-se que ao ser considerado o teor de cinzas obtido
 240 em laboratório como índice de eficiência, as amostras das Cinzas da Fornalha das unidades A
 241 ($88,77$ g), B ($90,73$ g), D ($97,42$ g) e E ($97,43$ g) diferem das cinzas da fornalha da unidade C

242 (25,54 g). As cinzas obtidas em laboratório evidenciam que as amostras das unidades A, B, D e E,
 243 tinham menos material a ser queimado que a da unidade C, portanto a eficiência de combustão
 244 havia sido melhor.

245 A Tabela 4 compara o teor de sílica das amostras coletadas à sílica obtida da amostra de
 246 bagaço.

247 Tabela 4. Teor de sílica como indicativo de eficiência das amostras de Cinzas do Bagaço
 248 comparadas com Cinzas da Fornalha em (mg de sílica 1000g⁻¹ em massa seca), após queimadas a
 249 550°C por 5 horas.

Teor de sílica (mg de sílica 1000g ⁻¹ em massa seca)		
Unidades	Cinza	Cinza
sucroalcooleiras	do Bagaço	da Fornalha
A	1,34 ±0,01 B	3,57 ±0,10 A
B	1,46 ±0,02 B	3,44 ±0,05 A
C	2,72 ±0,02 A	3,50 ±0,05 A
D	2,55 ±0,01 A	3,35 ±0,13 A
E	1,33 ±0,06 B	2,69 ±0,10 B
Desvio Padrão (s)	0,69	0,36

250 * As médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente em
 251 nível de 5% de probabilidade entre si pelo teste Tukey p<0,05.

252 Observa-se estatisticamente que o teor da concentração de sílica não difere entre as cinzas
 253 para as duas amostras. A literatura indica grande dispersão de valores de sílica para o bagaço, de
 254 cana-de-açúcar: 0,7% (Rowel & Keany, 1991), 4,0% (Chen & Hsu, 2002), 2,5% (Romero, 2007) e
 255 variações entre 1,5 e 4,0% (CTC, 2011) (BELINI, 2012).

256 Embora a cana inteira apresente maior quantidade de impurezas minerais do que a cana
 257 picada, a ordem se inverte quanto às cinzas no bagaço. No bagaço de cana picada, o teor de cinzas é
 258 superior àquele do bagaço de cana inteira, atingindo até 14%. Isto ocorre porque normalmente a

259 cana picada não passa pelo processo de lavagem para redução da terra aderida aos colmos, como
260 ocorria com a cana inteira (CTC, 2011) (BELINI, 2012).

261 O teor de sílica de cada biomassa material é uma característica botânica. Na literatura
262 encontramos que as partículas de silicatos, dióxido de silício (SiO_2) compõe cerca de 60% das
263 cinzas CACURO (2016). Em análise da composição química da cinza do bagaço, a porcentagem de
264 sílica foi de 84% (PAULA 2009). A porcentagem de sílica na cinza pesada foi de (57,41%) e a para
265 a cinza volante em um menor grau de sílica 25,82% (CASTRO, 2016).

266 Para averiguar essa hipótese de que o teor sílica não diferiu em função da densidade aparente,
267 foram obtidos os valores que constam da Tabela 2.

268 Comparando os dados da densidade aparente das Cinzas da Fornalha Tabela 2, com os dados
269 do Teor de Cinzas da Fornalha obtidos em Laboratório descritos na Tabela 3, estatisticamente a
270 unidade E é a mais eficiente, seguida das unidades intermediárias (A, D e B) e com menos
271 eficiência a unidade C. A análise da granulometria poderia explicar os resultados obtidos, pois a
272 densidade é explicada em grande parte pelo tamanho das partículas, estabelecidas.

273 A metodologia de determinação do diâmetro médio das partículas por peneiramento é
274 amplamente utilizada, por ser simples e de baixo custo, porém, quando aplicados a materiais
275 heterogêneos como o bagaço (biomassa polidispersa) podem levar a resultados equivocados
276 (JORDAN, 2016).

277 Outro fator que interfere na eficiência da queima são as características físicas das partículas
278 do bagaço, pois no funcionamento de uma caldeira aquatubular, a máxima eficiência, está
279 diretamente relacionada com a característica da matéria-prima. Os aspectos físico-geométricos
280 devem ser o primeiro ponto a ser avaliado (JORDAM, 2016).

281 A Tabela 5 apresenta os resultados de granulometria expressos como Diâmetro de Sauter
282 (D_s), calculado a partir das médias do perfil granulométrico das amostras de Cinzas da Fornalha e
283 do Bagaço.

284 Tabela 5. Caracterização das amostras do Bagaço, das cinco unidades sucroalcooleira do Mato
 285 Grosso do Sul, pelo Diâmetro de Sauter (em mm), comparadas as amostras de Cinzas da Fornalha.

Diâmetro de Sauter (Ds) [mm]		
Unidades Sucroalcooleiras	Bagaço	Cinza da Fornalha
A	1,46 ±0,04 A	0,45 ±0,04 B
B	0,87 ±0,04 C	0,23 ±0,04 C
C	0,99 ±0,04 BC	0,83 ±0,04 A
D	0,87 ±0,04 C	0,14 ±0,04 C
E	1,14 ±0,04 B	0,13 ±0,04 C
Desvio Padrão (s)	0,25	0,29

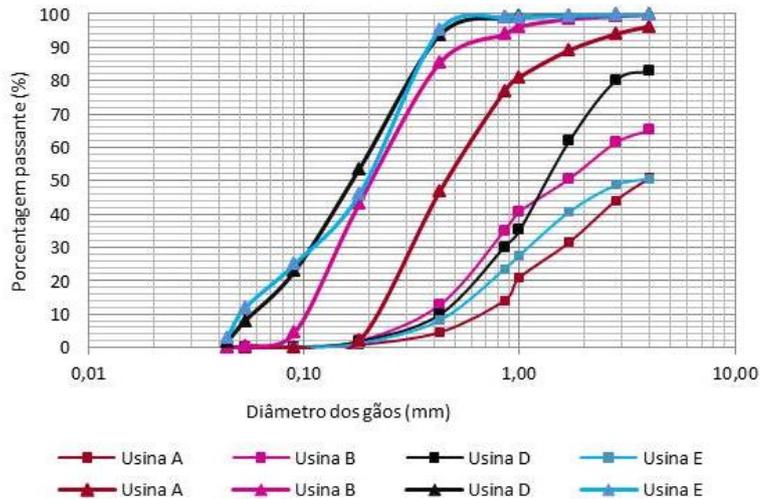
286 * As médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem estatisticamente em
 287 nível de 5% de probabilidade entre si pelo teste Tukey $p < 0,05$.

288 Analisando os resultados da Tabela 5, pelo Diâmetro de Sauter observa-se que as Cinzas da
 289 Fornalhadas unidades sucroalcooleiras B, D e E apresentam valores e comportamento próximo, mas
 290 que são diferentes das unidades A e C. Os valores da Tabela 5 são representados nos gráficos das
 291 Figuras 2 e 3.

292 Analisando o perfil dos gráficos para Cinzas da Fornalha, pelo diâmetro das malhas das
 293 peneiras em (mm), expressados nos gráficos, observa-se que a granulometria do Bagaço das
 294 unidades A, B, C, D e E apresentam valores e comportamentos próximos, mas, a granulometria das
 295 Cinzas da Fornalha das unidades B, D, e E embora de perfis semelhantes, diferiram dos perfis e das
 296 unidades A e C, expressando a maior. O desempenho da combustão do bagaço da unidade E com
 297 base na granulometria, seria o melhor, seguido do desempenho das unidades B, D e A, mantendo a
 298 unidade C como a de menor desempenho.

299 A partir destes resultados, a Figura 2 apresenta as curvas de distribuição granulométrica das
 300 Cinzas da Fornalha com o respectivo perfil das cinzas do Bagaço das unidades sucroalcooleiras A,

301 B, D e E.



Legenda: —■— Bagaço ; —▲— Cinza da Fornalha.

Figura 2. Curvas de distribuição granulométrica das Cinzas da Fornalha e do Bagaço das unidades sucroalcooleiras A, B, D e E.

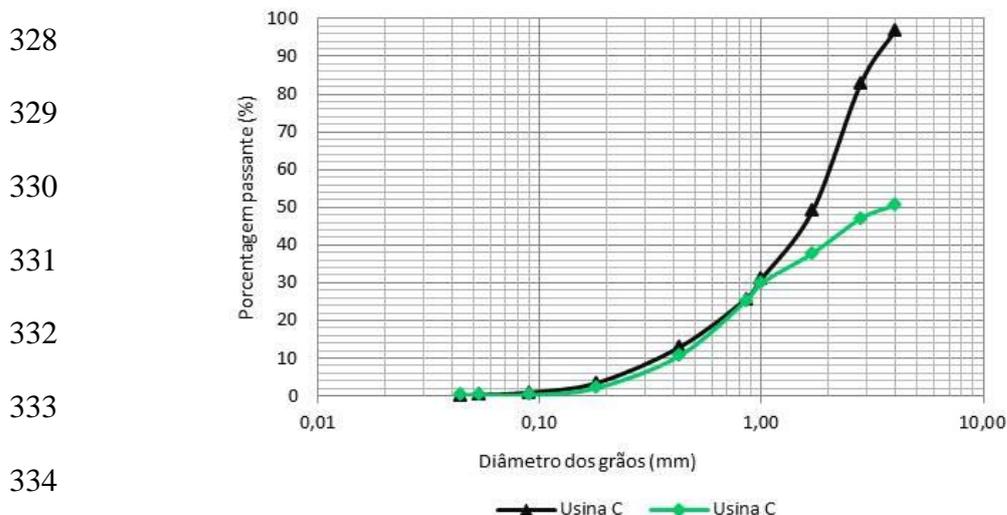
Analisando os dados obtidos e os gráficos da Figura 3, a Fração Mássica (Δx_i) do bagaço das unidades sucroalcooleiras A, B, C e E variou de 35% a 49% no Diâmetro Médio (D_{pi}) de 4,0 mm e, a Fração Mássica (Δx_i) do bagaço da unidade D variou de 20 a 27% com Diâmetro Médio (D_{pi}) de 0,64 e 1,35 mm, demonstrando a predominância de fibras longas no bagaço.

A variação da Fração Mássica (Δx_i) de cinza da fornalha das unidades foi: B (39 e 42%), D (31 e 40%) e, E (21 e 49%) com Diâmetro Médio (D_{pi}) de 0,18 e 0,30 mm, a variação da Fração Mássica (Δx_i) da unidade A (30 e 45%) com (D_{pi}) de 0,30 e 0,64 mm e, a unidade C (34%) com diâmetro 2,25 mm.

Todos os perfis de cinzas de fornalha das unidades A, B, C e E apresentam padrões semelhantes, com picos entre 0,30 a 0,64 mm, menos a unidade C, que foi a de menor eficiência para cinzas, que neste caso apresentou a Diâmetro Médio (D_{pi}) de 2,25 mm.

A Figura 3 permite comparar os perfis granulométricos de Cinzas da Fornalha com o respectivo perfil das Cinzas do Bagaço apenas da unidade sucroalcooleira C, destacada como a menos eficiente.

326 A Figura 3 apresenta as curvas de distribuição granulométrica das Cinzas da Fornalha e do
 327 Bagaço da unidade sucroalcooleira C.



335 Legenda: —■— Bagaço ; —▲— Cinza da Fornalha.

336 Figura 3. Curvas de distribuição granulométrica das Cinzas da Fornalha e do Bagaço da
 337 unidade sucroalcooleira C.

338 Considerando os resultados obtidos pode-se inferir que:

339 ✓ Isso ocorre para todas as coletas de qualquer pesquisa e não diferencia seu trabalho. A
 340 concentração de sílica nas amostras de cinzas obtidas por queima em laboratório não diferiram, o
 341 que a descarta como um bom indicador de eficiência.

342 ✓ Os resultados obtidos da caracterização das Cinza da Fornalha, Cinza do Filtro Úmido
 343 e Bagaço, coletados nas cinco unidades sucroalcooleiras do Mato Grosso do Sul em condições reais
 344 de funcionamento permitem inferir que as cinzas obtidas em laboratório a partir das Cinzas de
 345 Fornalha, poderiam resultar em um parâmetro adequado para estabelecer a eficiência das caldeiras;

346 ✓ A análise granulométrica da Cinza da Fornalha queimada em laboratório, gerada por
 347 peneiramento mecânico é procedimentos de baixo custo e apresentou-se como um bom indicador da
 348 eficiência.

349 AGRADECIMENTOS

350 Ao Professor Dr. Denilson de Oliveira Guilherme do CeTeAgro/UCDB, na orientação da
 351 análises estatísticas.

352 Ao técnico do laboratório do CeTeAgro/UCDB, Demeciano Arce Neto, pela orientação e
353 apoio no desenvolvimento das análises das amostras.

354 A Dra. Marli da Silva Garcia, pela intermediação junto às unidades sucroalcooleiras, obtenção
355 e envio das amostras para a realização das análises.

356 **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

357 American Association of Agricultural Chemists - AOAC, Journal of AOAC Internacional.

358 **Evaluation of Brazilian Sugarcane Bagasse Characterization: An Interlaboratory**

359 **Comparison Study**. Acesso pago disponível em

360 <<http://www.ingentaconnect.com/content/aoac/jaoac/2016/00000099/00000003/art00001>>. Acesso
361 em Out. 2016.

362 BELINI, L., ... [et al.]. **Teor de Sílica em Compósitos Confeccionados com Bagaço de Cana-de-**

363 **açúcar e Eucalipto**. Disponível em <<http://www.floram.org/files/v19n2/v19n2a18.pdf>>. Acesso
364 em Jul. 2017.

365 BRASIL, Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Boletim de Informações Gerenciais do**

366 **1º trimestre de 2017**. Disponível em <

367 <http://www.aneel.gov.br/documents/656877/14854008/Boletim+de+Informa%C3%A7%C3%B5es+Gerenciais+1%C2%BA+trimestre+de+2017/798691d2-990b-3b36-1833-c3e8c9861c21>>. Acesso
368 em Jul. 2017.

370 BRASIL, MME – Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Energia Elétrica | Departamento de

371 Monitoramento do Sistema Elétrico. **Boletim de Monitoramento do Sistema Elétrico, maio 2017**.

372 <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/4475726/Boletim+de+Monitoramento+do+Sistema+El%C3%A9trico+-+Maio+-+2017.pdf/1aa65ba9-deeb-4359-83de-a40d749f0a92>> Acesso em Jul.

374 2017.

375 BRASIL, MME – Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento

376 Energético. **Resenha Energética Brasileira. Exercício de 2016, Edição: Junho de 2017**.

377 Disponível em <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/02+->

- 378 +Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+2017+-+ano+ref.+2016+%28PDF%29/13d8d958-de50-
379 4691-96e3-3ccf53f8e1e4?version=1.0>. Acesso em: Jul. 2017
- 380 BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de**
381 **Expansão de Energia 2024**. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE. Disponível em
382 <[http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/Plano%20Decenal%20de%20Energia%20E2%80%93](http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/Plano%20Decenal%20de%20Energia%20E2%80%9320PDE/MME.aspx)
383 [20PDE/MME.aspx](http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/Plano%20Decenal%20de%20Energia%20E2%80%9320PDE/MME.aspx)>. Acesso em: Jul. 2017
- 384 BALIYAN, G. **Mechanical Engineering – Construction & Maintenance. Types of boilers.**
385 Imagem de caldeira aquatubular Fev.2016. Disponível em
386 <<http://mechanicalfieldexperience.blogspot.com.br/?view=classic>>. Acesso em Jul. 2017.
- 387 CACURO, T. A., WALDMAN, W. R., **Cinzas da Queima de Biomassa: Aplicações e**
388 **Potencialidades**. Revista Virtual de Química. Volume 7, Número 6. Novembro-Dezembro 2015.
- 389 CASTRO, T. H., MARTINS, C. H. **Caracterização das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar**
390 **como material alternativo para a redução de impactos ambientais**. Disponível em
391 <<http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/1291>>. Acesso em Mar. 2017.
- 392 COLEMAN, G. A. J. **Peneira rotativa**. Disponível em
393 <<https://www.google.com/patents/US6305552>>. Acesso em Jun. 2017
- 394 FERREIRA, D. F. **Programa de análise estatística e planejamento de experimentos Sisvar.**
395 DEX/UFLA 2010, versão 5.6 (Build 86). Disponível para Download em
396 <<http://www.dex.ufla.br/~danielff/programas/sisvar.html>>. Acesso em Mar. 2017.
- 397 GARCIA, M. S. **Potencial da Cogeração das Usinas Sucroenergéticas do Mato Grosso do Sul.**
398 Tese (Doutorado) - Universidade Católica Dom Bosco (UCDB). Campo Grande – MS. 05 de
399 Outubro de 2015.
- 400 GOES, T.; MARRA, R.; SILVA, G. S. **Setor sucroalcooleiro no Brasil. Situação atual e**
401 **perspectiva**. Revista de política agrícola, São Paulo – SP, Ano XVII. n.2, Abr/Maio/Jun 2008.
- 402 JORDAN, R. A.; JUNIOR, R. B.; CORTEZ, L. A. B.; MOTOMIYA, A. V. A. **Caracterização**
403 **granulométrica de biomassa polidispersa pelo método de peneiramento mecânico**. Journal of

- 404 the Brazilian Association of Agricultural Engineering. Disponível <[http://dx.doi.org/10.1590/1809-](http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n1p102-113/2016)
- 405 [4430-Eng.Agric.v36n1p102-113/2016](http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n1p102-113/2016)>. Acesso em: Jul. 2017.
- 406 KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício no solo, planta e**
- 407 **fertilizante / Gaspar**. Uberlândia, 2004. (GPSi-ICIAG-UFU. Boletim técnico ; 02) 50f.
- 408 LENÇO, P. C.. **Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar para geração de energia**. 141 p.
- 409 Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Campinas – SP. 26 de
- 410 Agosto de 2010.
- 411 PAULA, M. O., ...[et al.]. **Potencial da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como material de**
- 412 **substituição parcial de cimento Portland**. Disponível em
- 413 <<http://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v13n3/v13n03a19.pdf>>. Acesso em Jun. 2017
- 414 POLONIO, W. L.; GONÇALVES, E. M.; RAZUK, P. C. **Avaliação de meios filtrantes primários**
- 415 **em filtro contínuo de tambor rotativo a vácuo para lodo de caldo de cana**. 2006. Disponível em
- 416 <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v26n1/30108.pdf>>. Acesso em Jul. 2017.
- 417 Prominas Brasil Equipamentos. **PRC - Peneira Rotativa para Cinza**. Imagem Disponível em
- 418 <[http://www.prominasbrasil.com.br/produto/produtos-para-filtragem/filtros-para-usinas-de-acucar-](http://www.prominasbrasil.com.br/produto/produtos-para-filtragem/filtros-para-usinas-de-acucar-e-alcool/prc-peneira-rotativa-para-cin?page=0,1)
- 419 [e-alcool/prc-peneira-rotativa-para-cin?page=0,1](http://www.prominasbrasil.com.br/produto/produtos-para-filtragem/filtros-para-usinas-de-acucar-e-alcool/prc-peneira-rotativa-para-cin?page=0,1)>. Acesso em Jul. 2017.
- 420 SANTOS, A. N. S.; PAIXÃO, Z. T. **Curso: NR 13- Segurança na operação de caldeiras**. Campo
- 421 Grande-MS: SENAI/MS, 2013. 152 p.
- 422 SANTOS, M. L.; LIMA, O. J., NASSAR, E. J.; CIUFFI, K. J.; CALEF, P. S. **Estudo das**
- 423 **condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica**. Disponível em
- 424 <http://www.scielo.br/pdf/qn/v34n3/24.pdf>>. Acesso Ago. 2017.
- 425 SOUZA, Z. J., AZEVEDO, P. F. **Geração de energia elétrica excedente no setor**
- 426 **sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas**. 2006. Disponível em
- 427 <<http://www.scielo.br/pdf/resr/v44n2/a02v44n2.pdf>>. Acesso Jul. 2017.
- 428
- 429

APÊNDICES

APÊNDICE A

Metodologia analítica

Coleta e preparação das amostras

As amostras do bagaço, das cinzas da fornalha e cinzas do filtro, foram coletadas em usinas sucroalcooleiras, durante o período da safra em (julho/2016).

Por solicitação dos gestores industriais das usinas, as informações repassadas e os dados obtidos nas análises, foram mantidos em sigilo e as usinas identificadas pelas letras “A, B, C, D e E”.

Tendo em vista os riscos na linha de produção e na área da casa de caldeira, os requisitos mínimos estabelecidos pela NR13 visando à segurança e saúde dos trabalhadores (BRASIL-MTE/NR13, 13.1.1) e procedimentos de segurança adotados em cada usina, as coletas das amostras foram realizadas por operadores designados pelos gestores industriais, seguindo as recomendações para manter a integridade das amostras.

As amostras coletadas foram acondicionadas em sacos plásticos devidamente livres de impurezas e secos para o armazenamento e análise no Centro de Tecnologia e Análise do Agronegócio da Universidade Católica Dom Bosco (CeTeAgro/UCDB) .

Foram adotados os seguintes procedimentos para a preparação e conservação das amostras coletadas nas usinas:

- As amostras recebidas no CeTeAgro, foram colocadas em bandejas plásticas revestidas com filme de papel;
- Foram pesadas em balança de precisão modelo Quanta BD – 250 com capacidade de 30kg e divisão de 5g, os pesos e a identificação da origem serão anotados e as bandejas etiquetadas;
- As bandejas foram colocadas em estufa Marconi com renovação e circulação de ar modelo MA 037 a uma temperatura de 50 °C, por um período de 48 a 72h;

- após o período estabelecido, as bandejas foram retiradas da estufa, pesadas e anotado os pesos;
- As amostras foram acondicionadas em frascos de vidro de 500 ml, tampadas e identificadas com etiqueta adesiva.

Estabelecido os procedimentos de preparação das amostras, as mesmas ficam disponíveis para a realização das análises.

A Figura 25 apresenta as etapas de recepção e preparo das amostras (Fotos 1 e 2); secagem em estufa de renovação e circulação de ar a 50 °C (Fotos 3 e 4); e acondicionamento das amostras em potes de vidro de 500 mL (5 e 6).



Figura 1A: Etapas da recepção, preparação e armazenagem das amostras.

Caracterização do bagaço e cinzas de cana-de-açúcar

Determinação da densidade aparente

A densidade de uma biomassa qualquer pode ser medida de três maneiras distintas, tais como densidade a granel; densidade real ou absoluta e densidade aparente. O método mais comum de se obter é a densidade a granel, definido como a razão entre a massa das partículas pelo volume ocupado dado em kg/m^3 .

A densidade das amostras de bagaço e cinzas foi determinada, utilizando proveta de vidro de 1000 ml com graduação de 10 em 5 ml, balança de precisão modelo BEL SSR

600 Classe II com capacidade máxima de 600g e mínima de 200 mg e divisão de 10 mg. As provetas foram taradas na balança de precisão, em seguida, colocou-se a amostra na proveta e mediu-se o volume de 300 ml, e finalmente, pesou-se o conjunto e anotou-se a massa. O processo foi repetido por 4 vezes.

A Figura 26 apresenta as etapas para a determinação da densidade, sendo: Preparo da amostra (1); Medição do volume da amostra (2); Pesagem da amostra (3).

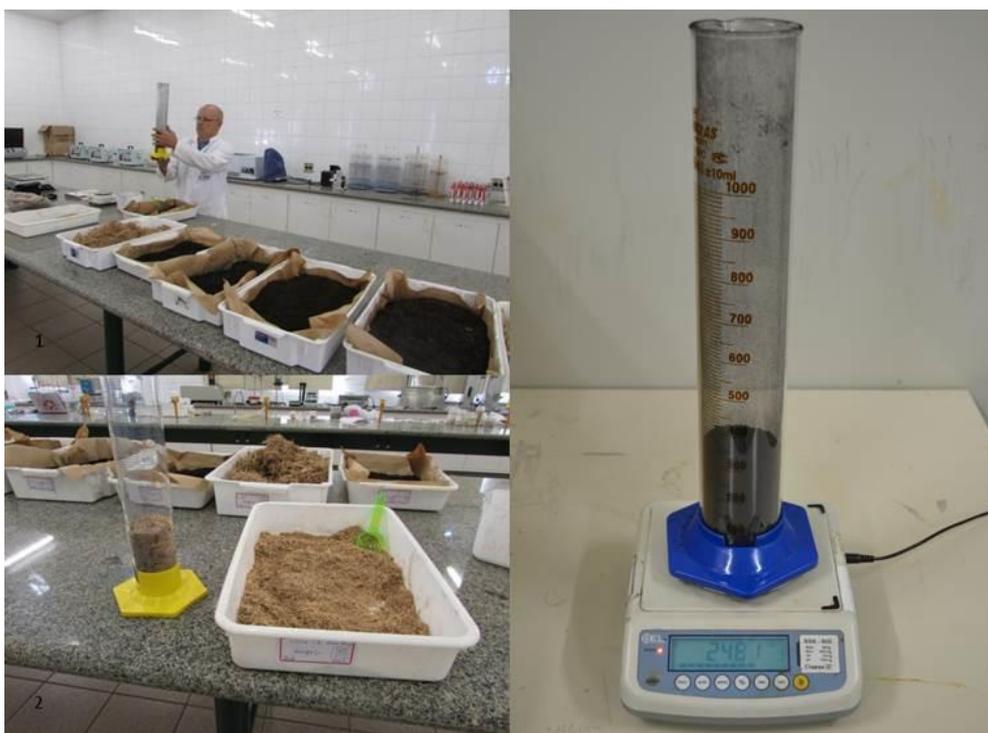


Figura 2A: Etapas para determinação da densidade das amostras.

Determinação da granulometria

O perfil granulométrico do bagaço de cana-de-açúcar, da cinza da fornalha e cinza do filtro, foi determinado em análises realizadas em triplicata, com jogo de peneiras de malha quadrada de abertura de 4000 μm (M5), 2800 μm (M7), 1700 μm (M12), 1000 μm (M18), 850 μm (M20), 425 μm (M40), 180 μm (M80), 90 μm (M170), 53 μm (M270) e 45 μm (M325), com duração de dez minutos e frequência de 98 Hz. A massa total das amostras e a massa retida em cada peneira foram pesadas em balança de precisão modelo BEL SSR 600 Classe II com capacidade máxima de 600 g e mínima de 200 mg e divisão de 10 mg.

A Figura 27 apresenta o equipamento de vibração e as peneiras de análise granulométrica.



Figura 3A: Equipamento de vibração e peneira para determinar a granulometria

Determinação do teor de umidade

Para a determinação do teor de umidade, foram utilizados três cadinhos (triplicata $n=3$), devidamente calcinados em forno mufla convencional a 550 °C conforme metodologia que segue:

Para a determinação do teor de umidade das amostras, serão utilizados 3 cadinhos (triplicata $n=3$) de porcelana, colocados para secar em estufa com renovação e circulação de ar MA 037, marca JProLab à temperatura de 105 °C durante 2 horas. Os cadinhos foram resfriados em dessecador e pesados vazios em balança analítica marca Shimadzu. Em cada cadinho as amostras de bagaço de cana-de-açúcar, cinzas da fornalha e cinzas do filtro, serão pesadas, aproximadamente 3 g, foram dispostas na estufa à 105 °C durante 8 horas. As amostras foram então resfriadas a temperatura ambiente em dessecador e pesadas novamente (AOAC, 2016).

Utilizou-se para o cálculo a equação (15) abaixo descrita:

$$\text{Umidade} = \frac{(\text{Mu} - \text{Ms}) 100}{\text{Mu}} \quad (15)$$

em que:

Mu = massa úmida (g)

MS = massa seca (g)

U = teor de umidade em (%)

Determinação do teor de combustibilidade e cinzas

Para a determinação do teor de combustibilidade e cinzas, as amostras de bagaço de cana-de-açúcar, cinzas da fornalha e cinzas do filtro dispostas nos cadinhos, foram previamente secas e pesadas e calcinadas em forno mufla convencional marca Quimis durante 5 horas, após alcançar 550 °C, a mufla foi desligada até após atingir 200 °C, as amostras serão retiradas e colocadas no dessecador para resfriar a temperatura ambiente e pesadas novamente.

Para a determinação do teor de combustibilidade e cinzas, as amostras de bagaço de cana-de-açúcar, cinzas da fornalha e cinzas do filtro dispostas nos cadinhos, foram previamente secas e pesadas e calcinadas em forno mufla convencional marca Quimis durante 5 horas, após alcançar 550 °C, a mufla foi desligada até após atingir 200 °C, as amostras serão retiradas e colocadas no dessecador para resfriar a temperatura ambiente e pesadas novamente.

O teor de combustíveis (TC) e o teor de cinzas (TCZ) fornecem informações sobre a combustibilidade dos resíduos. Utilizou-se para o cálculo do teor de combustíveis a equação (16) abaixo descrita:

$$\text{TC} = \left(\frac{c - d}{c} \right) 100 \quad (16)$$

donde:

TC = teor de combustíveis (%)

c = peso da amostra antes da queima (g)

d = peso da amostra após a queima (g)

O teor de cinzas (TCZ) é obtido através da equação abaixo:

$$TCZ = 100 - TC \quad (17)$$

donde:

TCZ = teor de cinzas (%)

TC = teor de combustíveis (g)

A Figura 28 apresenta as etapas para determinação da umidade das amostras, sendo: Preparação da amostra e pesagem da amostra em cadinho tarado (Fotos 1 e 2); Secagem das amostras (Fotos 3 e 4); Acondicionar cadinhos em dessecador e pesagem das amostras (Fotos 5 e 6).



Figura 4A: Etapas para determinação da porcentagem da umidade

A Figura 29 apresenta as etapas para determinação da porcentagem do teor de combustíveis e do teor de cinzas das amostras, empregando mufla convencional, sendo: Preparação da mufla e colocação dos cadinhos (Fotos 1 e 2); amostra de bagaço e cinzas da fornalha e cinzas do filtro no cadinho e dessecador (Fotos 3 e 4); pesagem e acondicionamento das amostras (Fotos 5 e 6).



Figura 5A: Etapas para determinação da porcentagem de cinza.

Determinação do teor de silício

Para a determinação do Silício em (mg/L) das amostras de bagaço, cinzas da fornalha e cinzas do filtro previamente secas e pesadas, foram utilizados 3 tubetes plásticos (triplicata n=3), segundo a metodologia apresentada por Korndörfer et al. (2004, p. 16 a p. 20):

Material necessário: Pré-tratamento: Estufa (65 °C) com ar forçado; moinho tipo Willey; compressor de ar; balança de precisão (0,0001 g); destilador (5 a 10 litros por hora); copos plásticos de 50, 100 e 150 mL; balões de 100, 200 e 1000 mL; capela; agitador horizontal com velocidade variável; agitador magnético; banho Maria; autoclave; pipetas volumétricas de 2, 5 e 10 mL; pipetas automáticas reguláveis: 0-5, 0-10 e 0-20 mL; repipetadores de volume variável; espectrofotômetro UV-Visível; Pré-tratamento: - Fazer uma secagem prévia do material vegetal ao ar livre para retirar o excesso de umidade; - Moer o material em moinho tipo Willey (antes de moer, secar o material por mais 30 minutos à 60 °C); - Acondicionar o material moído em sacos ou tubos plásticos. Preparo das soluções: a) Solução Padrão de Si (50 mg L⁻¹): adicionar 25 mL de solução padrão 1000 ppm de Si em balão de 500 mL e completar com água destilada. b) Água oxigenada (H₂O₂) p.a. 300 ou 500 g L⁻¹: (Manter no refrigerador). c) Hidróxido de Sódio (NaOH) 500 g L⁻¹: Dissolver 50 g de NaOH (granulado) em 50 mL de água destilada. Deixar esfriar até temperatura ambiente e acondicionar em frasco plástico.

d) Molibdato de Amônio [(NH₄)₆Mo₇O₂₄.4H₂O]: Dissolver 100g de molibdato de amônio em 500 mL de água destilada e ajustar o Ph para 7,0 a 8,0 usando NaOH 400 g L-1 (4:6). Transferir a solução para balão de 1000 mL e completar com água destilada. Acondicionar a solução em frasco plástico (polietileno) e na geladeira. e) Ácido Clorídrico (HCl) 500 g L-1: Misturar volumes iguais de ácido clorídrico concentrado (12 N) e água destilada. Acondicionar a solução em frasco plástico (polietileno). f) Ácido Oxálico C₂H₂O₄: Dissolver 75 g de ácido oxálico em 200 mL de água destilada. Transferir a solução para balão de 1000 mL e completar com água destilada. g) Ácido Acético 200 g L-1 - Dissolver 20g de ácido acético em 100 mL de água destilada. Usar este ácido na falta de ácido oxálico. Procedimento - Extração / Digestão: - Pesar 0,1000 g do material vegetal moído em tubos de polipropileno de 100 mL; - Adicionar 2 mL de H₂O₂ (300 ou 500 g L-1) com posterior agitação (agitador magnético) por alguns segundos. Esse e os demais procedimentos devem ser efetuados dentro da capela com luvas plásticas; - Adicionar 3 mL de NaOH (500 g L-1) e agitar novamente. Em folhas de arroz e tecido de raízes, ao se adicionar o NaOH o processo de oxidação é intenso e pode vaziar ou derramar para fora do tubo, assim sendo, recomendamos que não se faça a digestão em mais de 3 amostras de uma só vez e assim poder controlar adequadamente o processo. O controle da digestão é feito mediante o uso do agitador para tubos do tipo Vortex; - Colocar os tubos em banho-maria por aproximadamente 1 hora, tendo o cuidado de sempre agitar os tubos quando estes quiserem derramar; - Depois que os extratos/amostras não estiverem mais liberando gases, colocar as tampas e acondicionar os tubos na autoclave por 1h a 253 °F (123 °C) e 1,5 atm. (20 psi)*. Observação: Caso o material (tecido foliar) não tenha sido completamente digerido, acrescentar mais 1mL de H₂O₂ (300 ou 500 g L-1) e recolocar por mais 1h na autoclave. - Adicionar 45 mL de água destilada; - Transferir o extrato para frasco plástico identificado. Deixar em repouso até que os resíduos fiquem depositados no fundo do tubo. Determinação Amostra: Acondicionar uma alíquota de 1 mL do sobrenadante do extrato em copo plástico de 50 mL. Acrescentar 19 mL de água destilada. * Se for usar 2 mL do extrato (amostras com baixos teores de Si), usar 18 mL de água. A soma do extrato + água deve sempre ser igual a 20. Padrões (0, 2, 4, 6 e 8 mg L-1 de Si); - Pipetar 0; 2; 4; 6 e 8 mL da solução padrão de 50 ppm de Si e colocar em balões de 50 mL. Completar o volume dos balões com água destilada; - Pipetar uma alíquota de 20 mL de cada padrão (0, 2, 4, 6 e 8 mg L-1 de Si) e colocar em copo plástico de 50 mL ou copo de cafezinho. Adicionar aos copos plásticos dos padrões e das amostras (extratos digeridos) 1 mL de HCl (1:1 ou 500 g L-1) + 2 mL de molibdato de amônio. Agitar levemente. A cor amarela deve aparecer nas amostras contendo Si. Quanto mais amarelo, maior a concentração de Si na solução. Decorridos 5 a 10 minutos, adicionar 2 mL de ácido oxálico, agitando levemente a solução. Observação: a quantidade de HCl deve ser proporcional ao volume da alíquota retirada do extrato (em pH alcalino não há complexação e portanto não vai haver desenvolvimento da cor). Depois de 2 minutos fazer a

leitura em Espectrofotômetro UV Visível no comprimento de onda de 410 nm (curva padrão apresentada na Figura 3). A cor amarela é pouco estável, permanecendo assim por apenas 15 min. Cálculos:

$$\text{Fator de diluição 1} = \frac{50 \text{ mL extrato}}{0,1000 \text{ g solo}} = 500X$$

$$\text{Fator de diluição 2} = \frac{19 \text{ mL água}}{1 \text{ mL extrato}} = 10X$$

$$\text{Fator de diluição total} = 10000x$$

$$\text{Si (\%)} = [\text{Si na solução} \times (500 \times 20)] / 10.000$$

A Figura 30 apresenta as etapas para determinação do teor de Silício das amostras de bagaço, cinzas da fornalha e cinzas do filtro, sendo: Preparação e pesagem das amostras (1 e 2); pré-tratamento das amostras (3 e 4); colocação dos tubos com amostras no autoclave (Fotos 5 e 6); determinação das amostras e leitura no espectrofotômetro (7 e 8). A principal possibilidade de fonte de erro é o tempo reduzido, para a leitura da Observância da concentração da sílica das amostras, após a dosagem de ácido Oxálico no espectrofotômetro.



Figura 6A: Etapas para determinação da porcentagem de silício

Análise microscópica das cinzas

As amostras coletadas de bagaço, e das cinzas da fornalha e do filtro da caldeira, assim como as submetidas a diversas calcinações, foram avaliadas pelo seu grau de calcinação (ou estabilização das cinzas) por observação em lâminas.

Foram feitos 2 tipos de laminas:

- a. Suspensão das cinzas em água com corante safranina. A fração insolúvel em água permanecerá e as fibras serão coradas em rosa, com solubilização dos componentes solúveis em água;
- b. Suspensão das cinzas em glicerol, que permitirá observar a fração solúvel em água.

As laminas serão preparadas no Laboratório do Bloco de Biosaúde da UCDB, observadas no microscópio Zeiss AX10, utilizando as lentes de 20 e 63x, através da câmera AxioCam ERc5s, as imagens foram capturadas de 3 pontos de cada lâmina e processadas através do software Zen 2.1 (blue edition).

A Figura 31 apresenta os equipamentos descritos para análise microscópica das amostras.

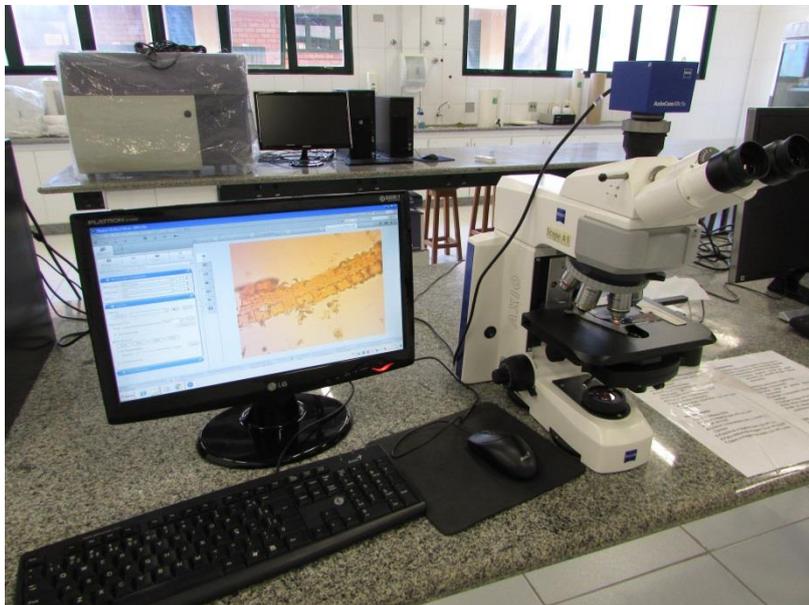


Figura 7A: Microscópio Zeiss AX10; câmera AxioCan ERc5s, laboratório de Biosaúde Bloco Biosaúde – UCDB.

APÊNDICE B

Revista Engenharia Agrícola: Journal of the Brazilian Association of Agricultural
Engineering

INSTRUÇÕES AOS AUTORES

1. Diretrizes Gerais

Os manuscritos podem ser submetidos em português, espanhol e inglês, por meio do Sistema Eletrônico de Editoração de Revistas – SciELO (<http://submission.scielo.br/index.php/eagri/>). O Comitê Editorial verifica se o artigo está no escopo da revista, se segue RIGOROSAMENTE AS NORMAS para submissão e se há ocorrência de PLÁGIO. O artigo poderá ser reformulado se estiver fora das normas e será recusado nos outros casos.

O autor responsável pela submissão deverá, primeiramente, preencher TODOS os campos do metadados e enviar uma mensagem para contato.sbea@gmail.com assumindo a responsabilidade pelos demais autores, se houver, autorizando a tramitação, obedecendo ao Artigo 5o da Lei no 9.610, que trata do Direito Autoral (vide item 4, ao final deste tópico).

O autor responsável pela submissão deverá enviar também para contato.sbea@gmail.com um ofício assinado por ele, em PDF, afirmando que o manuscrito não foi publicado e nem está sendo submetido para publicação em outro(s) meio(s) de divulgação de qualquer natureza (vide item 4, ao final deste tópico).

Depois de aceitos, os trabalhos submetidos em português e espanhol deverão ser **OBRIGATORIAMENTE** traduzidos para o inglês por **EMPRESAS INDICADAS PELO COMITÊ EDITORIAL**. Os manuscritos submetidos em inglês deverão ser revisados pelas mesmas empresas.

Em seguida, os artigos aceitos passarão por diagramação e última revisão por parte dos autores (prova). Quando recusado, o manuscrito será arquivado, podendo os autores, a partir daí, encaminharem o trabalho a outro periódico.

1.1. Tradução e revisão

A tradução dos artigos submetidos em português e espanhol e a revisão dos artigos submetidos em inglês serão pagas pelos autores diretamente às empresas indicadas pelo Comitê Editorial.

As empresas de tradução ou revisão indicadas são:

- American Journal Experts (<https://www.aje.com/en/services/translation>)
- Elsevier (<http://webshop.elsevier.com/languageservices/>)
- Quality Centro de Idiomas (monicamdestefani@hotmail.com)
- STTA - Serviços Técnicos de Tradução e Análises (<http://stta.com.br/>)

2. Normas para configuração do manuscrito

2.1 Configuração

- O manuscrito deve ter no máximo cinco autores;
- Não inserir os nomes e as identificações dos autores;
- O número máximo de laudas é 20;
- O texto completo pode apresentar figuras coloridas ou não (fotografias, gráficos, diagramas, etc.) e tabelas. O tamanho do arquivo gravado aceito pelo sistema de submissão é de até 2,0 MB. Arquivos maiores não serão gravados no sistema.

- As grandezas devem ser expressas sempre e unicamente em unidades do Sistema Internacional de Unidades (SI) e grafadas sempre de acordo com as normas de apresentação dos símbolos das unidades do SI (<https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/pml/div684/fcdc/sp330-2.pdf>)

- Texto em editor MSWord 2010 ou superior ou totalmente compatível com esse editor;

- Tamanho do papel: A4 (21 x 29,7 cm);
- Espaçamento entre linhas: 2,0;
- Tipo de letra para o texto: Times New Roman, tamanho 12;
- Tipo de letra para cabeçalho/rodapé: Times New Roman, tamanho 9;
- Margens: 2 cm em todos os lados do papel;
- Inserir numeração de páginas;

- Inserir numeração contínua de linhas nas páginas;
- Parágrafo de 1,0 cm;
- Tamanho máximo do arquivo: 2,0 MB;
- Os autores deverão ser os mesmos que foram cadastrados no sistema quando da submissão do manuscrito. Não poderão ser mudados, a não ser com expressa autorização escrita de cada um dos autores originais. Cada nome deverá ser seguido por um número em sobrescrito, em sequência. Abaixo dos nomes, separado por dois espaços, uma lista com a ordem numérica referente a cada autor. Nessa lista, os números vêm primeiro em sobrescrito e na frente de cada número, em texto normal, deverá constar do autor para correspondência, a instituição e um endereço de e-mail definitivo, e dos demais autores, somente a instituição.

2.2 Categoria

Os artigos podem ser da seguinte natureza:

2.2.1 Artigo científico

Refere-se a relato de pesquisa original, com hipótese bem definida, prestigiando assuntos inovadores. Deve incluir Título, Resumo, Palavras-chave, Introdução, Material e Métodos, Resultados e discussão, Conclusões e Referências.

Todos os itens deverão ser destacados em letras maiúsculas e negrito.

Título: Centralizado, deve ser claro e conciso, permitindo pronta identificação do conteúdo do trabalho, procurando-se evitar palavras do tipo: análise, estudo e avaliação.

Resumo: O texto, contendo no máximo 14 linhas, deve iniciar-se na mesma linha do item, ser claro, sucinto e, obrigatoriamente, explicar o(s) objetivo(s) pretendido(s), procurando justificar sua importância (sem incluir referências), os resultados e as conclusões mais expressivos. Abaixo devem aparecer as *Palavras-chave* (seis no máximo, procurando-se não repetir palavras do título) escritas em letras minúsculas, em ordem alfabética e separadas por vírgula.

Introdução: Devem ser evitadas divagações, e se concentrando no assunto que levará o leitor a entender o objetivo do trabalho. Para isso, deve-se utilizar principalmente de bibliografia recente (últimos 5 anos e periódicos indexados) e apropriada para formular os problemas abordados e a justificativa da importância do assunto, deixando muito claro o(s) objetivo(s) do trabalho, utilizando no máximo 50 linhas.

Material e métodos: Dependendo da natureza do trabalho, a caracterização da área experimental deve ser inserida, tornando claras as condições em que a pesquisa foi realizada. Quando os métodos forem os consagradamente utilizados, apenas a(s) referência(s) bastará(ão); caso contrário, é necessário apresentar descrição dos procedimentos utilizados, adaptações promovidas, etc. Unidades de medidas e símbolos devem seguir o Sistema Internacional de Unidades.

Resultados e discussão: Os resultados obtidos e analisados deverão ser confrontados com os da literatura apresentada na Introdução e com outras pertinentes à área do trabalho, e discutidos à luz dos conhecimentos consagrados, concordando ou discordando desses com explicações científicas e ou técnicas, mas destacando principalmente a importância e a originalidade desses dados. A redação desse item deve ser elaborada não apenas relatando que os resultados obtidos concordam com ou discordam de os resultados obtidos por outros pesquisadores, mas também, de forma clara e concisa, procurar explicar por que os resultados foram esses e por que concordam ou discordam dos apresentados na literatura.

Conclusões: Devem basear-se exclusivamente nos resultados do trabalho. Evitar a repetição dos resultados em listagem subsequente, buscando, sim, confrontar o que se obteve, com os objetivos inicialmente estabelecidos. As conclusões devem ser escritas de forma clara, direta e concisa, facilitando a interpretação do artigo, sem necessidade de consultar outros itens do mesmo.

Agradecimento(s): Agradecimentos a pessoas e/ou a instituições devem ser inseridos, se for o caso, após as conclusões, de maneira sucinta.

Referências: No texto (Introdução, Material e Métodos e Resultados e Discussão) devem ser citadas apenas as referências essenciais. Pelo menos 50% das referências devem ser dos últimos 5 anos e 90% das referências deverão ser de artigos científicos e/ou técnicos de periódicos com corpo editorial e indexados. Os 10% restantes se não forem de artigos científicos, deverão ser apenas de dissertações, teses ou livros. Evitar citações de resumos, trabalhos de conclusão de curso, trabalhos não publicados, boletins técnicos e comunicação pessoal. Casos excepcionais deverão ser justificados e serão analisados pelo Comitê Editorial. As citações no texto deverão aparecer em letras maiúsculas, seguidas da data, conforme abaixo:

SOUZA & SILVA (2014), ou ainda (SOUZA & SILVA, 2014); existindo outras referências do(s) mesmo(s) autor (es) no mesmo ano (outras publicações), isso será identificado com letras minúsculas (a, b, c) após o ano da publicação: SOUZA & SILVA (2014 a). Quando houver três ou mais autores, no texto será citado apenas o primeiro

autor seguido de et al., mas na listagem bibliográfica final os demais nomes também deverão aparecer. Na citação de citação (deve ser evitada), identifica-se a obra diretamente consultada; o autor e/ou a obra citada nesta é assim indicado: SILVA (2006) citado por PESSOA (2013).

Na listagem das referências citadas (item Referências) incluir apenas as mencionadas no texto e em tabelas e figuras, aparecendo em ordem alfabética e em letras maiúsculas. A seguir, estão apresentados alguns exemplos:

Periódicos

Pruski FF, Rodrigues RG, Pruski PL, Nunes AA, Rego FS (2016) Extrapolation of regionalization equations for long-term average flow. *Engenharia Agrícola* 36(5):830-838.

Com DOI (Digital Object Identifier)

Pruski FF, Rodrigues RG, Pruski PL, Nunes AA, Rego FS (2016) Extrapolation of regionalization equations for long-term average flow. *Engenharia Agrícola* 36(5):830-838. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n5p830-838/2016>

Livros

Obra completa, autorada

Keller J, Bliesner RD (2012) *Sprinkle and Trickle Irrigation*. New York, Springer. 652p.

Obra completa, com paginação específica (forma preferida)

Keller J, Bliesner RD (2012) *Sprinkle and Trickle Irrigation*. New York, Springer, p140-160.

Livro com autor institucional

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2016) *The state of food and agriculture: climate change, agriculture and food security*. Rome, FAO, 190p.

Livro com autor institucional, com paginação específica (forma preferida)

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations (2016) *The state of food and agriculture: climate change, agriculture and food security*. Rome, FAO, p50-60.

Livro completo, editado

Mueller T, Sassenrath GF (2015) *GIS Applications in Agriculture. Volume Four: Conservation Planning*. Boca Raton, CRC Press, v4:304p. DOI: 10.1201/b18173-1

Livro completo, editado, com paginação específica (forma preferida)

Mueller T, Sassenrath GF (2015) GIS Applications in Agriculture. Volume Four: Conservation Planning. Boca Raton, CRC Press, v4: p28-49. DOI: 10.1201/b18173-1

Capítulo de livro ou um artigo parte de um livro

Buckleiter GW (2007) Irrigation system automation. In: Adamsen F, Hook J, Cardon G, Letey J, Lascano RJ, Sojka RE. Irrigation of agricultural crops. Madison, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America, p181-194.

Anais de congressos, simposios, workshops (devem ser evitadas).

Hagel H, Hoffmann C, Doluschitz, R (2014) Mathematical programming models to increase land and water use efficiency in semiarid NE-Brazil. In: World Conference in Computers in Agriculture. San Jose, International Commission of Agricultural Engineering, Proceedings...

Teses (devem ser evitadas)

Schiavone DF (2016) heat mass transfer in ballet switch grass for storage and bioconversion applications. PhD Thesis, Lexington University of Kentuck, College of Engineering.

Documentos cartográficos (mapa, fotografia aérea, imagem de satélite, imagem de satélite digital)

BRASIL e parte da América do Sul: mapa político, escolar, rodoviário, turístico e regional. São Paulo: Michalany, 1981. 1 mapa, color., 79 cm x 95 cm. Escala 1:600.000.

Patentes

Norman LO (1998) Lightning rods. US Patent 4,379,752, 9 Sept 1998.

Documentos on line

Doe J (1999) Title of subordinate document. In: The dictionary of substances and their effects. Royal Society of Chemistry. Available : [http://www.rsc.org/dose/title of subordinate document](http://www.rsc.org/dose/title%20of%20subordinate%20document). Accessed Oct 19, 2016.

Figuras e tabelas: Em qualquer parte do texto do manuscrito ilustrações, gráficos e fotografias devem ser inseridos com o título de “Figura” e quadros e tabelas serão sempre

“Tabela”. - Figuras: apresentadas com tamanho, resolução e detalhes suficientes para a composição final, preferivelmente na mesma posição do texto, podendo ser coloridas. O título e outras informações contidas na Figura deverão ser, no conjunto, autoexplicativos, para que não seja necessário recorrer a qualquer parte do texto para entender a figura. Gráficos: podem apresentar partes coloridas, sendo os eixos x e y e as divisões de escala, em cor preta, com 1/2 pt de espessura das linhas, e títulos e valores nesses eixos devem ser grafados com o mesmo tipo e tamanho de letras contidas no texto (Times New Roman 12). Os gráficos não devem conter bordas e linhas de grade e a legenda deve ser colocada na posição inferior do mesmo. As linhas das curvas ou barras e dos pontos referentes aos dados obtidos, não devem ser colocados com cores claras, como amarelo, azul claro, marrom claro, que dificultam, em fundo branco, a perfeita distinção desses. A numeração da Figura deve ser sucessiva e em algarismos arábicos. Fotografias: podem ser coloridas. Tabelas: as tabelas devem sempre ser elaboradas utilizando a ferramenta de tabelas do Microsoft Word ou outro “software” compatível e devem ser colocadas na página em posição retrato, evitando tabelas extensas e dados supérfluos, privilegiando-se dados médios; adequar seus tamanhos ao espaço útil do papel e colocar, na medida do possível, apenas linhas contínuas horizontais no cabeçalho principal da tabela e na última linha fechando a tabela. Linhas verticais não devem aparecer. Assim como nas Figuras o título e outras informações contidas na tabela, devem ser concisas mas autoexplicativas (não deverá ser necessário recorrer ao texto para entender completamente a tabela). Resultados apresentados em Tabelas não devem ser repetidos em Figuras e vice-versa.

Equações: Todas as equações que fizerem parte do texto deverão ser alinhadas com o parágrafo e numeradas, como segue:

$$y = a x + b \quad (1)$$

em que,

y - velocidade, m s⁻¹;

a - coeficiente angular;

x - rotação, rad s⁻¹, e.

b - coeficiente linear.

Equações mais complexas deverão ser elaboradas com a ferramenta “Equação” do editor de texto Word, mantendo o mesmo tipo e o mesmo tamanho da fonte do texto (Times New Roman – 12).

2.2.2 Artigo Técnico

Deverá retratar avanços em teorias, metodologias e técnicas, sem apresentação de hipótese. Quando se tratar de estudo de caso, as conclusões devem apresentar proposições. Deve ser redigido em linguagem técnica, de fácil compreensão, sobre assuntos de interesse para a Engenharia Agrícola, por autor (es) que demonstre(m) experiência sobre o assunto tratado, permitindo orientação para os diferentes usuários da Engenharia Agrícola. Somente justifica-se a apresentação de artigos que tragam contribuição sobre o assunto e não simplesmente casos pessoais ou de interesse restrito. Com maior liberdade de estilo do que em artigos científicos, os artigos técnicos devem, na maioria das vezes, conter os seguintes itens: Título, Resumo, Palavras-Chave, Introdução, Descrição do Assunto, Conclusões e Referências.

Cabeçalho: ARTIGO TÉCNICO deve aparecer no cabeçalho da primeira página, em letras maiúsculas, sublinhadas, negritadas, centralizadas e espaçadas de 1,1 cm da margem superior.

Título, Resumo, Palavras-chave, devem seguir as mesmas normas descritas para artigo científico relatadas no item 2.2.1.

Introdução: deve conter breve histórico, esclarecendo a importância, o estágio atual do assunto, apoiando-se em revisão bibliográfica, e deixar claro o objetivo do artigo.

Descrição do Assunto: com diferentes títulos que podem ser divididos em subitens, deve-se discorrer sobre o assunto, apontando-se as bases teóricas, trazendo experiências e recomendações, discutindo e criticando situações, baseando-se ao máximo em bibliografia e normas técnicas sobre o assunto.

Conclusões: quando couberem, devem ser redigidas de forma clara e concisa, coerentes com o(s) objetivo(s) estabelecido(s). Não devem ser uma simples reapresentação de outros parágrafos do artigo.

2.2.3 Artigo de Revisão

É a apresentação, **exclusivamente a pedido do Conselho Editorial da revista**, de um estudo, reunindo, analisando e discutindo o estado da arte e propondo perspectivas futuras sobre um assunto de importância para a Engenharia Agrícola. Tal estudo deverá estar baseado em ampla pesquisa bibliográfica, permitindo compilação dos conhecimentos existentes. Embora com maior liberdade de estilo do que em artigos científicos, os artigos de Revisão devem conter os seguintes itens: Título, Resumo, Palavras-Chave, Introdução, Revisão, Conclusões e Referências. Para a redação desse

trabalho de revisão, devem ser seguidas as mesmas orientações para composição de artigos científicos, com as seguintes particularidades:

Cabeçalho: ARTIGO DE REVISÃO deve aparecer no cabeçalho da primeira página em letras maiúsculas, sublinhadas, negritadas, centralizadas e espaçadas de 1,1 cm da margem superior.

Introdução: deve conter breve histórico, situando a importância, o estágio atual do assunto e o objetivo da revisão.

Revisão: seguir as normas de citação da revista. Se necessário, pode ser dividida por assuntos em subitens. A redação deve ser crítica e não apenas mera exposição dos assuntos; deve apresentar sequência lógica por ordem de assuntos e/ou cronológica. Sempre que possível, deve conter uma análise comparativa dos trabalhos sobre o assunto tratado.

Conclusões: devem ser apresentadas de forma clara e concisa, coerentes com o(s) objetivo(s) estabelecido(s). Não devem ser uma simples rerepresentação de parágrafos da revisão.

4. Modelos de termos de responsabilidade e declaração de originalidade do artigo

Abaixo, estão os modelos das declarações que o autor responsável deve enviar à contato.sbea@gmail.com, por ocasião da submissão do manuscrito.

Autorização da tramitação:

Autorização da tramitação: Eu, “ _____”, estou ciente de minha autoria do manuscrito intitulado “ _____”, bem assumo a responsabilidade pelos demais autores listados a seguir sobre a tramitação do referido manuscrito na revista Engenharia Agrícola, obedecendo ao Artigo 5o da Lei no 9.610, que trata do Direito Autoral.

Autores:

_____, _____, _____, _____

Declaração de originalidade:

Declaro que o artigo _____ é de natureza científica, é original e não foi submetido a outro periódico, quer seja em partes ou em sua totalidade. Declaro ainda que

uma vez publicado na Revista Engenharia Agrícola, o mesmo jamais será submetido por mim ou pelos demais autores a qualquer outro periódico. Através deste instrumento, nos autores cedemos os direitos autorais do referido Artigo a Revista de Engenharia Agrícola, obedecendo ao artigo 50 da lei 9.610 que se trata dos direitos autorais.

ASSINATURAS

A revista Engenharia Agrícola é publicada sob acesso aberto e, portanto, seus artigos são livres para serem lidos, copiados e disseminados para propósitos educacionais.

A revista on-line tem acesso aberto e gratuito.

Todo o conteúdo do periódico, exceto onde está identificado, está licenciado sob uma Licença Creative Commons.