UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus Experimental de Itapeva

FERNANDA FERNANDEZ MARCONDES

AMOSTRAGEM DE POLUENTES GASOSOS E PARTICULADOS FINOS EMITIDOS PELA COMBUSTÃO DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Itapeva - SP
2015

FERNANDA FERNANDEZ MARCONDES

AMOSTRAGEM DE POLUENTES GASOSOS E PARTICULADOS FINOS EMITIDOS PELA COMBUSTÃO DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado na Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – Campus Experimental de Itapeva, como um dos requisitos para a conclusão do curso de Engenharia.

Orientadora: Profª. Drª. Juliana Esteves Fernandes Cieslinski

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Oliveira de Matos

Itapeva - SP
2015

Marcondes, Fernanda Fernandez
M321a Amostragem de poluentes gasosos e particulados finos emitidos pela combustão do bagaço de cana-de-açúcar / Fernanda Fernandez Marcondes. – – Itapeva, SP, 2015.
57 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado – Engenharia Industrial Madeireira) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus Experimental de Itapeva, 2015
Orientadora: Juliana Esteves Fernandes Cieslinski
Co-orientador: Carlos Alberto Oliveira de Matos
Banca examinadora: Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves, Francisco de Almeida Filho
Bibliografia

1. Biomassa. 2. Poluentes. 3. Amostragem I. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus Experimental de Itapeva. II. Título

CDD 628.53

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus Experimental de Itapeva

FERNANDA FERNANDEZ MARCONDES

AMOSTRAGEM DE POLUENTES GASOSOS E PARTICULADOS FINOS EMITIDOS PELA COMBUSTÃO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

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

BANCA EXAMINADORA

Orientador: _____

Profª. Drª. Juliana Esteves Cieslinski
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

2º Examinador: _____

Mº. Francisco de Almeida Filho
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

3º Examinador: _____

Prof. Dr. Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves
Universidade Estadual Paulista - UNESP - Campus Experimental de Itapeva.

Itapeva, 13 de novembro de 2015.

Itapeva, 13 de novembro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e pelas oportunidades concedidas.

Aos meus pais, Rogéria e Eduardo, pelo apoio e amor incondicional, e a toda a minha família, pela confiança e carinho.

Ao meu namorado Wolney Junior, pelo companheirismo, suporte, paciência e amor.

À querida professora e amiga Maria Angélica Martins Costa, pelos ensinamentos e enorme generosidade.

À minha orientadora Profª. Drª. Juliana Esteves Fernandes Cieslinski, pela orientação e auxílio na realização deste trabalho.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. Carlos Alberto de Oliveira Matos, pela dedicação e disponibilidade.

À UNESP, pelo suporte durante minha graduação, e a todos os professores e técnicos, especialmente Francisco Almeida Filho e Juscelino de Jesus Pereira Melo, os quais me auxiliaram muito na realização deste trabalho.

À FAPESP, pelo auxílio financeiro na realização de minha pesquisa.

Aos meus amigos, especialmente Ana Caroline Margarido e Thacyane Katherine, pelo companheirismo e amizade.

A todos que de alguma forma estiveram presentes em minha vida, contribuindo direta ou indiretamente no desenvolvimento deste trabalho e de toda a minha graduação, muito obrigada.

“Existem oportunidades escondidas dentro de cada fracasso.”

Sophia Amoruso

RESUMO

A produção brasileira de etanol com base na matéria-prima cana-de-açúcar é vista como a tecnologia de biocombustível mais eficiente atualmente. Por conta disto, o incentivo à substituição de combustíveis fósseis pela biomassa é crescente. Entretanto, a queima desta biomassa é uma fonte de partículas, monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx) e compostos orgânicos voláteis (VOCs), incluindo componentes tóxicos e cancerígenos, tais como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH). Os impactos ambientais deste processo ainda não foram devidamente analisados. O projeto teve como objetivo a quantificação das emissões gasosas, concentração e distribuição de tamanho de material particulado menor que 2,5 µm, a partir da combustão do bagaço de cana-de-açúcar em queimador de biomassa. Foram realizadas as análises químicas imediata e da parede celular do bagaço, e as quantificações das emissões dos gases CO, CO_2, NOx e do material particulado, em tempo real de queima do referido combustível, utilizando o amostrador de gases Eurotron e monitor óptico DataRAM4 (modelo DR-4000). As concentrações dos poluentes obtidas foram corrigidas para 8% de O2. Foram utilizadas biomassas com diferentes teores de umidade: 8,5%, 15,1% e 37,3%. A maior concentração de CO obtida, 1287,4 mg/Nm³, correspondeu ao bagaço com teor de umidade de 37,3%. As maiores concentrações de CO_2 e NOx, 11740 mg/Nm³ e 34,1 mg/Nm³ respectivamente, foram emitidas na combustão do bagaço com teor de umidade de 8,5%. Em relação ao material particulado, a maior concentração obtida (1.181.652,0 µg/Nm³) foi para partículas de diâmetro igual a 0,0746 µm, ou seja, partículas ultrafinas, que são extremamente prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. Isto evidencia a importância do monitoramento das emissões provenientes da combustão da cana-de-açúcar e o controle destas emissões por equipamentos de coleta eficientes para esta faixa de diâmetro de partículas.

Palavras-chave: Biomassa. Poluentes. Energia. Combustão.

ABSTRACT

The Brazilian production of ethanol based on the raw material sugarcane is seen as the currently most efficient biofuel technology. Because of this, the incentive to replace fossil fuels with biomass is increasing. However, the burning of biomass is a source of particulates, carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NOx) and volatile organic compounds (VOCs), including toxic and carcinogenic components, such as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH). The environmental impacts of this process have not been properly analyzed. The project aimed to quantify gas emissions, concentration and size distribution of particulate matter smaller than 2.5 micrometres from the burning of sugarcane bagasse in biomass burner. Chemical analysis of bagasse and cell wall were carried out in addition to the measurements of emissions of gases CO, CO_2, NOx and particulate matter in real time burning of said fuel using the gas sampler and EUROTRON optical display DataRAM4 (DR-4000). The concentrations of the pollutants obtained were corrected for 8% O2. Biomasses were used with different moisture contents: 8.5%, 15.1% and 37.3%. The highest concentration of CO obtained, 1287.4 mg/Nm³, matched the residue with 37.3% moisture content. The highest concentrations of CO2 and NOx, respectively 11740 mg/Nm³ and 34.1 mg/Nm³, were issued in bagasse combustion with 8.5% moisture content. Regarding the particulate matter, there was obtained the highest concentration (1,181,652.0 g/Nm³) to the particle diameter of 0.0746 microns, ultrafine particles which are extremely harmful to human health and the environment. These results highlight the importance of monitoring the sugarcane burning emissions and control these emissions through efficient collection equipment for this particle diameter range.

Keywords: Biomass. Pollutants. Energy. Burning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático do sistema de queima da biomassa.....31
Figura 2 - Aparelhos de amostragem de poluentes: (a) amostrador de gases UniGas 3000+; (b) amostrador de material particulado DataRAM 4.....33
Figura 3 - Acessórios utilizados com o DataRAM4: (a) sonda isocinética e boquilhas; (b) seletor de partículas; (c) aquecedor.....34
Figura 4 - Pontos de amostragem na seção transversal de acordo com a norma BS 3405:1983.....35
Figura 5 - Chaminé do queimador de biomassa (a) e Esquema das posições dos orifícios de amostragem na chaminé (b).....36
Figura 6 - Concentração de CO em função do tempo de combustão, para diferentes teores de umidade.....41
Figura 7 - Temperatura do gás em função do tempo de combustão, para diferentes teores de umidade.....42
Figura 8 - Concentração de CO2 em função do tempo de combustão, para diferentes teores de umidade.....43
Figura 9 - Concentração de NOx em função do tempo de combustão, para diferentes teores de umidade.....44
Figura 10 - Concentração de NOx e temperatura do gás em função do tempo de combustão, para biomassa com teor de umidade de 37,26%.....45
Figura 11 - Concentração do material particulado em função do tempo de combustão, para o bagaço com diferentes teores de umidade.....46
Figura 12 - Concentração do material particulado em função do diâmetro das partículas.....47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão de bagaço de cana-de-açúcar.....23
Tabela 2 - Dados técnicos do queimador de biomassa – Modelo MDL90 MRD.....30
Tabela 3 - Velocidades amostradas com o anemômetro.....32
Tabela 4 - Composição (%) e PCS do bagaço da cana-de-açúcar.....40
Tabela 5 - Composição química (%) da parede celular de biomassas utilizadas para geração de energia.....40
Tabela 6 - Teores de umidade e PCS para os testes de combustão.....41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CLS	Concentração de lignina solúvel
CNTP	Condições normais de temperatura e pressão
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DR4	Dataram
EPA	Environmental Protection Agency
EPE	Erro padrão de estimativa
HNC	Hidrocarbonetos não queimados
mf	Massa final
mi	Massa inicial
MP	Material Particulado
mr	Massa do resíduo
ms	Massa seca
mu	Massa úmida
MV	Materiais voláteis
N	Normal
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
TE	Teor de extrativos
TH	Teor de holocelulose
TLI	Teor de lignina insolúvel
TLS	Teor de lignina solúvel
TLT	Teor de lignina total
U	Umidade

LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES

abs_{215}	Absorbância em 215 nm
abs_{280}	Absorbância em 280 nm
CH_4	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
d_a	Diâmetro aerodinâmico
H_2	Gás hidrogênio
H_2O	Água
H_2SO_4	Ácido sulfúrico
MP_{10}	Material particulado com $d_a < 10$ µm
$MP_{2,5}$	Material particulado com $d_a < 2,5$ µm
Mtep	Milhões de toneladas equivalentes de petróleo
N_2	Gás nitrogênio
NO	Óxido de nitrogênio
NO_2	Dióxido de nitrogênio
NOx	Óxidos de nitrogênio
O_2	Gás oxigênio
SO_2	Dióxido de enxofre
$T.U_{B.S}$	Teor de umidade na base seca
Vf	Volume final da solução

µg/m³	Micrograma por metro cúbico
µm	Micrômetro
G	Grama
g/Kg	Grama por quilograma
g/s	Grama por segundo
Kcal/h	Quilocaloria por hora
Kg	Quilograma
Kg v/h	Quilograma de vapor por hora

Kg/h	Quilograma por hora
kWh	Quilowatt hora
L/min	Litro por minuto
m/s	Metro por segundo
m^3	Metro cúbico
m^3/h	Metro cúbico por hora
mg/m^3	Miligrama por metro cúbico
mL	Mililitro
Mm	Milímetro
MW	Megawatt
Nm	Nanômetro
Ppm	Partes por milhão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 13
2. OBJETIVOS 14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 14
3.1. Biomassa 14
3.1.1. Cana-de-açúcar 15
3.1.2. Bagaço da cana-de-açúcar 16
3.2. Combustão da biomassa 16
3.2.1. Fatores inerentes à combustão da biomassa 18
3.2. Poluentes e poluição atmosférica 20
3.2.1. Material Particulado 21
3.2.2. Poluentes gasosos 21
3.2.3. Limites de emissão 22
3.3. Estudos recentes sobre emissão de poluentes atmosféricos 23
4. MATERIAL E MÉTODOS 24
4.1. Material 24
4.2. Preparação das amostras 24
4.2.1. Caracterização química 24
4.2.2. Experimentos de combustão 25
4.3. Análise química imediata 25
4.3.1. Teor de umidade 25
4.3.2. Teor de materiais voláteis 25
4.4. Análise da composição química da parede celular 26
4.4.1. Teor de extrativos totais 26
4.4.3. Teor de holocelulose 28
4.5. Poder calorífico 29
4.6. Testes experimentais 29
4.7. Experimentos de combustão 29
4.8. Amostragem de gases e material particulado 32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 39
5.1 Caracterização química 39

5.2. Amostragem de gases 41
5.3. Amostragem de material particulado 46
6. CONCLUSÕES.....49
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....51

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Ministério do Planejamento (2014), o Brasil é o 4º maior produtor de energia renovável do mundo. O país produziu 121 Mtep de fontes renováveis em 2012, ficando atrás da China (311 Mtep), Índia (199 Mtep) e Estados Unidos (129 Mtep). Em termos de participação das fontes renováveis na matriz energética, o Brasil obteve um índice de 42,6% em 2012.

Dentre as principais fontes de energia renovável existentes, podemos citar a biomassa, uma opção interessante diante da crise energética que paira sobre o Brasil, provocada sobretudo pelo colapso na captação de água. Segundo a ANEEL (2015), biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia. Atualmente, a biomassa vem sendo cada vez mais utilizada na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de co-geração e no suprimento de eletricidade para demandas isoladas da rede elétrica. De acordo com Hofsetz e Silva (2012), a co-geração é um processo que produz energia elétrica (geração de energia) e energia térmica útil (produção de vapor) com alta eficiência e perto do ponto de utilização.

Cortez et al. (2008) dizem que a principal fonte para gerar energia da biomassa está nos resíduos. Os principais resíduos utilizados em nível mundial como fonte de energia são os resíduos vegetais, como a palha e o bagaço da cana-de-açúcar.

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, gerando cerca de 400 milhões de toneladas por ano. Com a incessante busca pela substituição dos combustíveis fósseis, a cana-de-açúcar vem ganhando espaço no nosso país, especialmente na produção de açúcar e etanol. Entretanto, há a geração de uma grande quantidade de resíduos, como a palha e o bagaço da cana. Desta forma, o uso desse tipo de resíduo para a produção de energia surge como uma alternativa sustentável de utilização deste material. Por exemplo, o bagaço, através de sua combustão em caldeiras a vapor, pode fornecer todo o calor necessário ao processo de produção de açúcar e de etanol e também gerar eletricidade suficiente para colocar em funcionamento todos os motores elétricos e atender outras necessidades, como, por exemplo, de iluminação (MORAES, 2012 e ROSILLO-CALLE, 2008). Vale destacar que o uso do bagaço de cana é totalmente renovável e

valoriza o mercado nacional sucroalcooleiro, além de ser uma tecnologia estritamente nacional (GUIA BRASILEIRO DE BIOMASSA, 2015).

Apesar das vantagens, a utilização da biomassa para geração de energia pode ocasionar impactos ambientais preocupantes, uma vez que a queima deste material emite gases tóxicos e material particulado, ambos prejudiciais à saúde. Portanto, a quantificação destas emissões é imprescindível para a investigação dos processos atmosféricos (FERNANDES, 2009). De acordo com França et al. (2012), é necessário melhorar os conhecimentos científicos sobre os impactos do crescimento da produção de etanol no Brasil e gerar inventários de gases de efeito estufa e emissões de aerossóis associados a esta atividade.

Neste contexto, e com o grande incentivo do uso da cana-de-açúcar como combustível industrial, vê-se a importância de se avaliar tanto as características deste material (propriedades químicas e eficiência como combustível) quanto a quantificação dos poluentes emitidos a partir de sua combustão.

2. OBJETIVOS

O objetivo do referido trabalho foi quantificar os poluentes gasosos e material particulado gerados pela queima do bagaço de cana-de-açúcar em queimador de biomassa piloto, ou seja, realizar a amostragem dos gases CO, CO_2, e NOx, e dos poluentes particulados menores que 2,5 µm emitidos em tempo real de queima.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é retratada uma revisão da literatura sobre a biomassa utilizada no trabalho, bem como suas características de combustão, além de conceitos sobre poluentes e poluição atmosférica.

3.1. Biomassa

Biomassa é toda matéria orgânica que, ao ser queimada, é capaz de gerar energia, incluindo resíduos de culturas, resíduos florestais e de processamento de madeira, resíduos animais e resíduos de processamento de alimentos (BILGILI; OZTURK, 2015).

Hoogwijk et al. (2002) apontaram que a biomassa é vista como uma fonte de energia interessante, podendo contribuir para o desenvolvimento sustentável. A energia da biomassa é viável do ponto de vista da segurança energética. Os recursos são muitas vezes disponíveis localmente e a conversão em vetores de energia alternativos é possível sem investimentos elevados. A energia da biomassa também pode ter um efeito positivo em terras degradadas pela adição de matéria orgânica para o solo.

As plantas de geração de energia também podem criar novas oportunidades de emprego nas áreas rurais dos países em desenvolvimento, e contribuir para o aspecto social da sustentabilidade. A biomassa é considerada a única fonte de carbono orgânico sustentável atualmente disponível sobre a terra e pode ser vista como a substituta ideal para o petróleo na produção de combustíveis, produtos químicos e materiais à base de carbono (RUIZ et al., 2012).

3.1.1. Cana-de-açúcar

As condições favoráveis para a produção, em particular as condições climáticas, os recursos de terras abundantes e uma tecnologia madura, bem como os preços elevados do petróleo e uma demanda crescente de açúcar têm estimulado o aumento da produção de cana-de-açúcar (Gauder et al., 2010).

Segundo o Ministério da Agricultura (2015), o Brasil é responsável por mais da metade do açúcar comercializado no mundo. Dados apontam que o país deve alcançar taxa média de aumento da produção de 3,25%, até 2018/19, e colher 47,34 milhões de toneladas do produto, o que corresponde a um acréscimo de 14,6 milhões de toneladas em relação ao período 2007/2008. Para as exportações, o volume previsto para 2019 é de 32,6 milhões de toneladas. O etanol, produzido no Brasil a partir da cana-de-açúcar, também conta com projeções positivas para os próximos anos, devidas principalmente ao crescimento do consumo interno. Inclusive, a produção brasileira de etanol com base na matéria-prima cana-de-açúcar é vista como a tecnologia de biocombustível mais eficiente atualmente.

Além do açúcar e do etanol, o setor sucroalcooleiro gera uma grande quantidade de resíduos, que pode ser aproveitada na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de co-geração. Ao contrário da produção de madeira, o cultivo e o beneficiamento da cana são realizados em larga escala, e o

aproveitamento de resíduos (bagaço, palha, etc.) é facilitado pela centralização dos processos de produção (ANEEL, 2015).

3.1.2. Bagaço da cana-de-açúcar

O bagaço é um subproduto da produção de açúcar e/ou de etanol. É resultante da etapa de moagem da cana-de-açúcar que, de um lado, extrai o caldo que será trabalhado nas demais etapas dos processos de produção de açúcar e/ou de etanol e, de outro lado, extrai o bagaço. Um montante de 1000 kg de cana-de-açúcar, quando esmagado, pode gerar 225 kg de bagaço contendo 50% de umidade, ou seja, uma grande quantidade deste resíduo é gerada nos locais de produção de açúcar/etanol (BRAGATO et al., 2012).

De acordo com a ANEEL (2015), em média, são requeridos cerca de 12 kWh de energia elétrica para cada tonelada de cana processada. Isso pode ser gerado pelos próprios resíduos da cana (palha, bagaço, vinhoto, etc.), possibilitando a autossuficiência do setor sucroalcooleiro em termos de suprimento energético, por meio da co-geração.

3.2. Combustão da biomassa

A combustão é um fenômeno que envolve reações químicas bastante complexas, consistindo de vários estágios, que ocorrerão em maior ou menor extensão dependendo de vários fatores (GARCIA, 2013).

Segundo Van Loo e Koppejan (2008), o processo de combustão é composto pelas seguintes etapas:

a) Secagem: A vaporização da água contida no combustível utiliza a energia proveniente do processo de combustão, o que diminui a temperatura da chama. Por conta disto, não há a possibilidade de utilizar, no processo de combustão, biomassa com alto teor de umidade, pois a mesma requere muita energia para vaporizar a água, reduzindo a temperatura da chama abaixo da temperatura mínima necessária para sustentar a combustão;

b) Pirólise: Pode ser definida como uma degradação térmica (desvolatilização) na ausência de um agente oxidante externo. Os produtos gerados nesta etapa são, basicamente, alcatrão e carvão vegetal, além de gases de baixo peso molecular. Além disso, CO e CO_2 podem ser formados em quantidades

consideráveis, especialmente a partir de combustíveis ricos em oxigênio, como a biomassa. Tipo de combustível, temperatura, pressão, velocidade de aquecimento e tempo de reação são todas variáveis que afetam os valores e as propriedades dos produtos formados;

c) Gaseificação: Assim como a pirólise, pode ser definida como uma degradação térmica (desvolatilização), porém, na presença de um agente oxidante externo. O gás contém principalmente CO, CO_2, H_2O, H_2, CH_4 e outros hidrocarbonetos. A gaseificação pode ser realizada com ar, oxigênio, vapor ou CO_2, como agentes oxidantes;

d) Combustão: É a completa oxidação do combustível. Os gases quentes provenientes da combustão podem ser usados para fins de aquecimento direto em pequenas unidades de combustão, para o aquecimento de água em pequenas caldeiras de aquecimento central e para o aquecimento de água de caldeira para geração de eletricidade em unidades maiores. Secagem e pirólise/gaseificação serão sempre os primeiros passos de um processo de combustão de combustível sólido.

Segundo Vasconcellos et al. (1997), as fases da combustão, assim como o tipo de combustível, também influenciam os poluentes emitidos. A fase chama é caracterizada pela combustão com chamas altas (temperaturas de 340°C ou maiores); a fase incandescência, com temperaturas mais baixas, é caracterizada pela combustão incompleta, sem chamas ou com pequenas chamas onde a conversão pirolítica da biomassa, sem oxigênio, predomina. De acordo com Vicente et al. (2014), na fase de chama, com maiores temperaturas, a concentração de CO_2 no gás de combustão aumenta devido a oxidação dos voláteis nesta temperatura. Além disto, nesta fase são emitidas as maiores concentrações de material particulado, as quais estão associadas a menores diâmetros (COSTA et al. (2012) e HOSSEINI et al. (2010)). Já a fase incandescente é a maior responsável pela emissão de CO, ou seja, as concentrações provenientes da combustão incompleta aumentam à medida que a concentração de CO_2 diminui (AMORIM et al., 2013 apud CIESLINSKI, 2014).

3.2.1. Fatores inerentes à combustão da biomassa

Vassilev et al. (2015) descrevem dois aspectos fundamentais relacionados com a utilização da biomassa como combustível: (1) ampliar e melhorar os conhecimentos básicos sobre sua composição e propriedades; e (2) aplicar esse conhecimento para a utilização mais avançada e sustentável da biomassa. Portanto, para compreender a combustão da biomassa, é importante avaliar as propriedades desta que determinam seu comportamento como um combustível para a combustão (DEMIRBAS et al., 2005). Tais propriedades são: teor de umidade, poder calorífico, teor de cinzas, teor de materiais voláteis, teor de carbono fixo e teores de extrativos e lignina.

O teor de umidade da biomassa tem um papel significativo no processo de combustão. Para uma combustão de partículas pequenas, assume-se que as mesmas aqueceriam instantaneamente, mas há uma perda de eficiência devido à energia latente de evaporação da água a partir da biomassa. Por causa disto, o processo de secagem é geralmente realizado separadamente, o que afeta significativamente a temperatura e a estabilidade da chama. No entanto, para a utilização de biomassa em larga escala, o processo de secagem consome demasiada energia (WILLIAMS et al., 2011). A umidade nos resíduos vegetais também afeta as emissões; por exemplo, o teor de umidade do resíduo está diretamente correlacionado com as emissões de partículas. Além disto, alto teor de umidade acarreta no aumento das emissões de gases provenientes de combustão incompleta, tipicamente CO. No entanto, os dados sobre os efeitos do teor de umidade e emissões são escassos. Embora muitos estudos tenham sido realizados para a obtenção de fatores de emissão para a combustão de resíduos, apenas alguns consideram os efeitos da umidade sobre as emissões, e, portanto, os atuais inventários de emissões não incorporam explicitamente os efeitos do teor de umidade dos resíduos sobre as emissões de gases e partículas (DARLEY et al., 1974 *apud* HAYASHI et al., 2014).

Segundo Garcia (2013), o poder calorífico de um combustível é definido como a quantidade de calor desprendida na sua queima completa, estequiometricamente. O valor quantitativo deste parâmetro pode variar muito de acordo com o teor de umidade da biomassa. O poder calorífico pode ser dividido em superior ou inferior. Para o cálculo do poder calorífico superior, considera-se que o

vapor de água presente nos gases de combustão é condensado. Já para o poder calorífico inferior, considera-se que isto não acontece. A diferença entre o PCS e o PCI é a energia requerida para evaporar a umidade presente no combustível, ou seja, o PCI é obtido a partir do PCS, subtraindo o calor latente de vaporização da água formada pela combustão do hidrogênio presente no combustível (LORA; VENTURINI, 2012).

As cinzas são os resíduos resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidações dos inorgânicos, ou seja, agregam os elementos não combustíveis (CIESLINSKI, 2014). Em sua composição encontram-se silício, potássio, sódio, enxofre, cálcio, fósforo, magnésio e ferro. O teor de cinzas da biomassa é inversamente proporcional ao poder calorífico e causa perda de energia, além de aumentar a emissão de material particulado a partir da combustão (KLAUTAU, 2008).

Segundo Lora e Venturini (2012), a quantidade de substâncias voláteis é definida como a diminuição do peso de uma amostra de combustível sólido depois de ser submetida a uma temperatura constante de 850±25°C durante 7 minutos. Em outras palavras, é a fração em massa inicial de combustível que é volatilizada, ou seja, convertida em gás durante seu aquecimento, queimando em fase gasosa. O conteúdo volátil da biomassa contribui geralmente com cerca de 70% do calor de combustão, que é comparado com cerca de 36% para a combustão de carvão volátil. Portanto, a combustão volátil domina os processos de combustão da biomassa (WILLIAMS et al, 2012). Segundo Chaves et al. (2013), os materiais voláteis, durante a queima da biomassa, volatilizam rapidamente diminuindo o tempo de residência do combustível dentro do aparelho de combustão, podendo contribuir para uma baixa eficiência energética.

O carbono fixo é o resíduo combustível deixado após a liberação do material volátil. É composto principalmente de carbono, embora possa conter outros elementos não liberados durante a volatilização, como O_2 e N_2. Segundo Chaves et al. (2013), o carbono fixo tem relação direta com o poder calorífico e inversa com o teor de materiais voláteis. Dizem ainda que um maior teor de carbono fixo implica em um maior tempo de residência dentro do aparelho de queima.

Os extrativos são substâncias orgânicas de baixo peso molecular que estão presentes na parede celular. Os principais grupos químicos que compreendem

os extrativos são: compostos aromáticos, terpenos, ácidos graxos saturados e insaturados, proteínas e flavonoides (MARABEZI, 2009). Segundo Quirino et al. (2005), por conter menos oxigênio que os polissacarídeos presentes na holocelulose, os extrativos, assim como a lignina, aumentam o poder calorífico do combustível.

A lignina é uma macromolécula tridimensional amorfa encontrada em vegetais associada à celulose na parede celular, cuja função é de conferir rigidez, impermeabilidade e resistência a ataques microbiológicos e mecânicos aos tecidos vegetais (CARVALHO et al., 2010). Marabezi (2009) afirma que a principal utilização da lignina nos dias atuais é como fonte de energia. De acordo com Williams et al. (2012), esta substância influi positivamente no PCS. Para Telmo e Lousada (2011), isso acontece porque a lignina é rica em carbono e hidrogênio, que são os elementos principais durante a geração de calor.

3.2. Poluentes e poluição atmosférica

A Resolução Conama n.º 003, de 28 de junho de 1990, art. 1º, parágrafo único, define como poluente atmosférico “qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar:

I - impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;

II - inconveniente ao bem-estar público;

III - danoso aos materiais, à fauna e flora.

IV - prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.”

De acordo com Lora (2002), as emissões de poluentes atmosféricos podem classificar-se em: fontes antropogênicas, aquelas provocadas pela ação do homem (indústria, transporte, geração de energia, etc.); e em fontes naturais, causadas por processos naturais, tais como erupções vulcânicas, processos microbiológicos, etc.

Segundo Garcia (2002), os poluentes possíveis de serem formados durante a queima de qualquer combustível orgânico, são: materiais particulados, óxidos de enxofre, monóxido de carbono, dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio. As quantidades dos poluentes dependerão de diversos fatores, como os modelos de

equipamento de queima, o tipo e propriedade de combustível utilizado e as condições de operação dos equipamentos.

3.2.1. Material Particulado

O material particulado (MP) é um poluente que consiste numa mistura complexa de diferentes substâncias orgânicas e inorgânicas suspensas no ar. Estas partículas são caracterizadas por propriedades morfológicas, químicas, físicas e termodinâmicas, mas seu diâmetro aerodinâmico (d_a) é a principal forma de classificação (WHO, 2006 apud LEMOS, 2012). As partículas classificam-se como partículas em suspensão (d_a < 30μm), partículas inaláveis MP_{10} (d_a < 10μm) e partículas finas $MP_{2,5}$ (d_a < 2,5μm). Além de impactos sobre o ambiente e o clima, a epidemiologia tem demonstrado que indivíduos são afetados por $MP_{2,5}$. $MP_{2,5}$ é descrito como poluente de elevado dano a saúde humana, pois atinge os alvéolos pulmonares, contendo componentes ácidos, orgânicos e cancerígenos, além de interferir no clima e na radiação solar, comumente visto como um poluente que interfere nas mudanças climáticas (YAO et al., 2010).

3.2.2. Poluentes gasosos

Dentre os poluentes gasosos possíveis de serem formados com a combustão de biomassa, aqueles formados com a combustão do bagaço da cana-de-açúcar são os óxidos de nitrogênio, o monóxido de carbono e o dióxido de carbono.

Os óxidos de nitrogênio NO_X são produzidos por fontes naturais, como os relâmpagos e a oxidação da amônia. A isto acrescentam-se fontes antropogênicas como a queima de combustíveis fósseis e biomassa. Estudos indicam que os óxidos de nitrogênio aumentam a suscetibilidade à infecções bacterianas nos pulmões. A exposição por longo tempo em concentrações de 1 ppm provoca a irritação dos alvéolos pulmonares com sintomas semelhantes ao enfisema pulmonar (LORA, 2002).

O monóxido de carbono (CO) é um gás tóxico, sem cor e sem odor, que resulta da combustão incompleta do carbono em combustíveis, em incêndios, ou na combustão de matéria orgânica (RIBEIRO; ASSUMPÇÃO, 2002). Este poluente apresenta afinidade pela hemoglobina, o que faz com que uma pequena quantidade

de CO possa saturar uma grande quantidade de moléculas de hemoglobina, diminuindo a capacidade do sangue de transportar O_2. Além disso, acarreta na diminuição da liberação de O_2 nos tecidos (BRAGA et al, 2002).

O dióxido de carbono (CO_2) é um gás incolor, inodoro e não tóxico. O mesmo está naturalmente presente na atmosfera como parte do ciclo de carbono da terra. Entretanto, desde a Revolução Industrial, as atividades humanas estão alterando este ciclo, através da adição excessiva de CO_2 na atmosfera, o que diminui a capacidade de retirada do mesmo pelas florestas (EPA, 2015). O CO_2 é um dos mais conhecidos gases do efeito estufa. Estes gases são responsáveis por capturar e armazenar energia, mantendo a superfície da terra quente, fato essencial para a vida. Entretanto, o aumento dos gases de efeito estufa acaba armazenando mais energia que o necessário. Por conta disto, tais gases são considerados suscetíveis de conduzir ao aquecimento global e aos extremos climáticos.

3.2.3. Limites de emissão

Para o monitoramento de poluentes gasosos e material particulado confinados em dutos é fundamental uma amostragem representativa, bem como a garantia de que os dados obtidos a partir de cada fonte de emissão sejam diretamente comparáveis a um padrão conhecido. A última Resolução estabelecida pelo CONAMA que trata da qualidade do ar é a Resolução nº 382 de 26/12/2006, a qual estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos gerados em processo de geração de calor para fontes fixas, incluindo a combustão de bagaço de cana-de-açúcar (Tabela 1).

Tabela 1 - Limites de emissão para poluentes atmosféricos provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão de bagaço de cana-de-açúcar.

Poluente	Potência térmica nominal do queimador (MW)	Limite de emissão (mg/Nm^3)
Material particulado (MP)	Menor que 10	280
	Entre 10 e 75	230
	Maior que 75	200
Monóxido de carbono (CO)	Até 0,05	6500
	Entre 0,05 e 0,15	3250
	Entre 0,15 e 1,0	1700
	Entre 1,0 e 10	1300
Óxidos de nitrogênio (NOx)	Menor que 10	N.A.*
	Entre 10 e 75	350
	Maior que 75	350

* Não aplicável

Fonte: Resolução CONAMA nº 382/06

3.3. Estudos recentes sobre emissão de poluentes atmosféricos

França et al. (2012) determinaram a emissão de alguns gases e material particulado durante a queima de cana-de-açúcar. Primeiramente, os fatores de emissão de CO_2, CO, NOx e hidrocarbonetos não queimados (HNC) foram estimados a partir de medições contínuas das respectivas concentrações, realizadas em condições controladas no laboratório. Na segunda etapa, foram conduzidas experiências semelhantes para a amostragem de material particulado com diâmetros iguais ou inferiores a 2,5µm ($MP_{2,5}$) e seus respectivos fatores de emissão foram estimados. Os valores médios amostrados para os fatores de emissão (g/kg de biomassa seca queimada) foram 1,303 ± 218 para o CO_2, 65 ± 14 para o CO, 1,5 ± 0,4 para NOx, 16 ± 6 para HNC e 2,6 ± 1,6 para $MP_{2,5}$. Além destes resultados, concluiu-se que, durante a fase de chama, uma maior quantidade de compostos tais como CO_2 e NOx foram gerados. Por outro lado, os compostos não completamente oxidados, tais como o CO e HNC, foram gerados em maior concentração na fase de incandescência.

Amaral et al. (2013) monitoraram os poluentes gasosos e material particulado gerados durante a queima, em laboratório, do bagaço de cana-de-açúcar. As amostragens foram feitas utilizando os equipamentos: DataRam4 (Modelo DR4000), termômetro a laser e UNIGAS 3000 MKIII. As máximas concentrações obtidas para CO_2, CO, NOx e $MP_{2,5}$ foram, respectivamente, 23.400 ppm, 1.356 ppm, 17 ppm e 794.042 µg/m^3.

Cardozo et al. (2013) compararam o comportamento da combustão de pellets de resíduos agrícolas como bagaço de cana-de-açúcar, casca de girassol e casca de castanha-do-pará com pellets de madeira. Os pellets de bagaço de cana, bem como os de madeira, emitiram menores concentrações de NO e de CO, respectivamente 100 e 50 mg/Nm³ (para potência de entrada da 13 kW e 13% O_2), do que os outros resíduos. Segundo os autores, a emissão de NO está associada à quantidade de nitrogênio presente no combustível, e a emissão de CO deve-se, principalmente, ao elevado teor de cinzas das cascas de girassol e castanha-do-pará.

Bragato et al. (2012) realizaram a combustão em laboratório de carvão e bagaço de cana-de-açúcar sob taxas de alto aquecimento, estudando as emissões provenientes das duas biomassas. O carvão emitiu maior concentração de CO_2 que o bagaço. Em contraste, o bagaço emitiu o dobro das concentrações de CO e HNC.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para realizar a caracterização química da biomassa e os equipamentos utilizados para a amostragem de material particulado e gases emitidos com a sua combustão.

4.1. Material

No presente trabalho foi utilizado bagaço de cana-de-açúcar cominuído, proveniente da Destilaria Iracema, situada na cidade de Itaí, interior de São Paulo.

4.2. Preparação das amostras

4.2.1. Caracterização química

Foram selecionadas amostras aleatórias do lote de bagaço de cana-de-açúcar. Estas foram secas ao ar e processadas em moinho *Wiley*, para obtenção de

serragem. Em seguida, o material foi classificado em peneiras de 40 (0,420 mm) e 60 mesh (0,250 mm), sendo utilizado aquele retido na peneira de 60 mesh. Para cada análise (imediata e de parede celular) foram utilizadas duas amostras da biomassa e calculada uma média aritmética.

4.2.2. Experimentos de combustão

O bagaço permaneceu em espaço coberto e ventilado para uma secagem natural. Foram realizados 3 testes de combustão com amostras de 14 kg e teores de umidade de 8,5%, 15,09% e 37,26%.

4.3. Análise química imediata

Os procedimentos para a análise química imediata basearam-se na norma ASTM E-870-82 “Análises Imediata para Biomassa e Resíduos”.

4.3.1. Teor de umidade

Para determinação do teor de umidade, foram pesadas cerca de 2 g da amostra de bagaço (amostra úmida) em um cadinho de alumínio. Os cadinhos foram colocados na estufa a 103±2 ºC por 24 h. Após esse tempo, as amostras foram pesadas em balança analítica. O teor de umidade na base seca foi calculado pela Equação 1.

$$T.U_{B.S} = \frac{m_u - m_s}{m_s} \times 100 \qquad (1)$$

Onde:

$T.U_{B.S}$ = Teor de umidade em base seca (%);

m_u = Massa úmida da amostra (g);

m_s = Massa seca da amostra (g).

4.3.2. Teor de materiais voláteis

Na medição do teor de materiais voláteis foi utilizada uma mufla previamente aquecida a 850±20°C, na qual foi colocado um cadinho (com tampa) por vez, contendo a amostra de bagaço preparada e seca (mi), por aproximadamente 6 minutos. Em seguida, o cadinho foi retirado da mufla e colocado

em um dessecador. Após cerca de 1 hora, determinou-se a massa da amostra (mf) em balança analítica.

A Equação 2 foi utilizada para determinação do teor de voláteis.

$$MV = \frac{mi - mf}{mi} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

MV = Teor de materiais voláteis (%);

mi = Massa inicial da amostra (g);

mf = Massa final da amostra (g).

4.3.3. Teor de cinzas

Foram utilizados cadinhos de porcelana calcinados em mufla durante 15 minutos a 900 ºC. Nestes, foram colocadas amostras de biomassa (mi), as quais foram levadas para a mufla, numa temperatura de 750 ºC. Após 6 horas, as amostras foram retiradas da mufla, resfriadas no dessecador e pesadas em balança analítica (mr). O teor de cinzas foi calculado através da Equação 3.

$$CZ = \frac{mr}{mi} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

CZ = Teor de cinzas (%);

mr = Massa do resíduo (g);

mi = Massa inicial da amostra (g).

4.4. Análise da composição química da parede celular

Os procedimentos para a análise da composição química da parede celular basearam-se nas normas TAPPI T 204 om-97 e TAPPI T 222 om-97.

4.4.1. Teor de extrativos totais

Pesou-se aproximadamente 2 g da amostra de bagaço seco em papel filtro, a qual foi colocada no condensador da bateria de extração. No balão, foram

adicionados 250 mL de solução etanol/tolueno e, a partir da primeira sulfonada, manteve-se o conjunto de extração durante 5 horas. Removeu-se a solução etanol/tolueno do balão e adicionou-se 250 mL de etanol, contando-se 4 horas a partir da primeira extração. Em seguida, o material foi filtrado com 1 L de água deionizada aquecida em cadinho filtrante nº 2. Após a filtragem, os cadinhos foram levados à estufa (103±2 ºC) por um período de 4 horas, resfriados em dessecador e pesados. A determinação do teor de extrativos foi feita através da Equação 4.

$$TE = \frac{mf}{mi} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

TE = Teor de extrativos totais (%);

mf = Massa final da amostra;

mi = Massa inicial da amostra.

4.4.2. Teor de lignina

Pesou-se 0,3 g de serragem de bagaço livre de extrativos, a qual foi acondicionada em tubos de ensaio. Com o auxílio de uma pipeta, adicionou-se aos tubos 3 mL de H_2SO_4 a 72%. O material foi macerado com bastões de vidro e os tubos de ensaio foram colocados em banho-maria a 30 ºC por 1 hora, mexendo a mistura a cada 10 minutos. Após este período, removeu-se os tubos do banho e adicionou-se 84 mL de água deionizada. A mistura foi então colocada em frasco tipo “pelicinina” de 100 mL, fechado hermeticamente e levado à panela de pressão por 1 hora, contada a partir do momento de ebulição. Em seguida, as amostras foram filtradas em cadinho filtrante nº 2 recobertos com papel filtro e completadas com água deionizada para 250 mL. O material contido nos cadinhos foi seco em estufa, resfriado e pesado. A determinação do teor de lignina insolúvel foi realizada conforme a Equação 5.

$$TLI = \frac{mf}{mi} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

TLI = Teor de lignina insolúvel (%);

mf = Massa final da amostra (g);

mi = massa inicial da amostra (g).

Após este procedimento, determinou-se o teor de lignina solúvel. O mesmo foi obtido através do licor filtrado durante os procedimentos para determinação da lignina insolúvel. Assim, o material filtrado foi analisado nos comprimentos de onda de 215 e 280 nm, com auxílio de um espctofotômetro. A partir das equações 6, 7 e 8 obteve-se o teor de lignina solúvel.

$$TLS = \frac{mf}{mi} \times 100 \quad (6)$$

$$mf = C_{LS} \times V_f \quad (7)$$

$$C_{LS} = \frac{((4{,}53 \times abs_{215}) - (abs_{280}))}{300} \quad (8)$$

Onde:

TLS = Teor de lignina solúvel (%);

mf = Massa final/lignina solúvel (g);

mi = Massa inicial (g);

C_{LS} = Concentração de lignina solúvel;

V_f = Volume final da solução;

abs_{215} = absorbância em 215 nm;

abs_{280} = absorbância em 218 nm.

4.4.3. Teor de holocelulose

O teor de holocelulose foi calculado a partir da Equação 9.

$$TH = 100 - (TLT + TE) \quad (9)$$

Onde:

TH = Teor de holocelulose (%);

TLT = Teor de lignina total (%) = TLS + TLI;

TE = Teor de extrativos (%).

4.5. Poder calorífico

Para a determinação do poder calorífico foi colocado 0,5 g da amostra de bagaço na bomba, um recipiente de aço inoxidável que resiste a altas pressões. A bomba foi enchida com O_2 a uma pressão de 30 bar e imersa em uma quantidade de água destilada. O combustível dentro do recipiente foi queimado por um filamento fusível aquecido eletricamente (ligação entre um fio de algodão e um fio de níquel). A queima rápida e completa do combustível desprendeu calor, que por sua vez elevou a temperatura da bomba e da água no vaso calorimétrico. Em cerca de 5 minutos pôde-se fazer a leitura do valor do poder calorífico superior na tela do sistema calorimétrico.

4.6. Testes preliminares de condições de combustão

Foram realizados testes preliminares de queima de bagaço de cana-de-açúcar, para as medições de fluxos (velocidade), queda de pressão, definição de parâmetros de queima e determinação das vazões de combustão (entrada de ar na câmara de combustão), do ventilador e da chaminé. Desta forma foi possível determinar as condições fluido-térmicas dos gases de combustão do bagaço da cana, para o uso devido dos amostradores. Verificou-se a necessidade de incluir ar limpo injetado na chaminé, pós queimador, para a utilização adequada do monitor ótico de partículas. Essa diluição foi necessária para não saturar o sistema de medição e ultrapassar a faixa de leitura de concentração. Posteriormente, realizaram-se testes experimentais de determinação dos teores de gases e material particulado emitidos pela queima de cana-de-açúcar.

4.7. Testes de combustão

Utilizou-se um queimador *piloto* com alimentação automática. Este é constituído de alimentador, queimador de biomassa, sopradores, duto de exaustão e controladores automatizados. A Potência térmica nominal do queimador utilizado neste trabalho é 0,36 MW. A Tabela 2 mostra os demais dados técnicos do queimador utilizado.

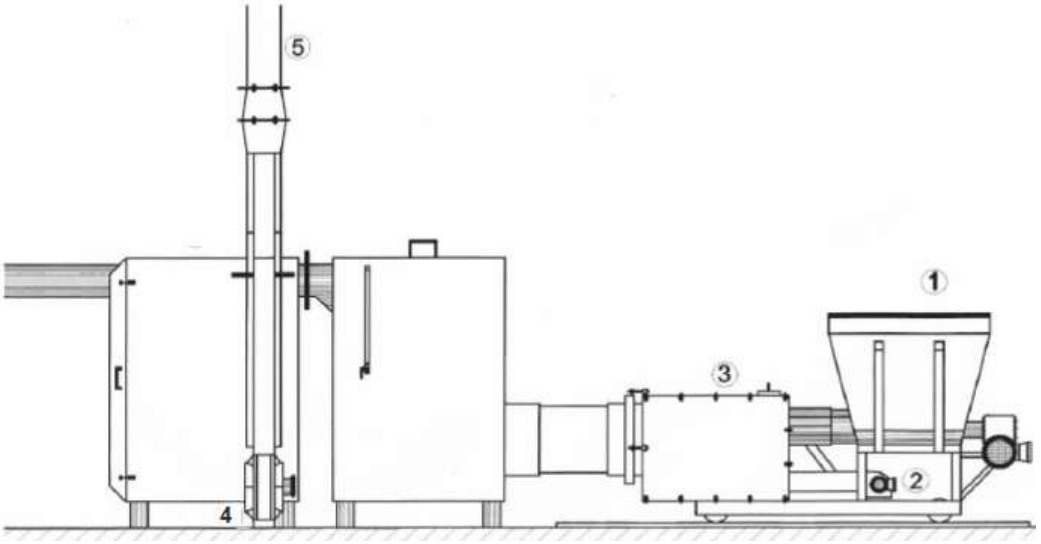
Tabela 2 – Dados técnicos do queimador de biomassa – Modelo MDL90 MRD

Altura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Produção de energia (kcal/h)	Consumo de biomassa (kg/h)	Produção máxima de vapor (kg v/h)
1300	800	2200	3150000 (0,36 MW)	90	400

Fonte: Manual do queimador Biodragão – MDL Ambiental.

Foram queimados, durante cada teste, cerca de 14 kg de bagaço de cana-de-açúcar, o qual foi inserido no queimador de forma intermitente temporizada, com vazão de aproximadamente 3,89 g/s, por meio de um parafuso que alimenta a câmara de combustão, sendo controlada a entrada de ar para a combustão da referida biomassa. A injeção de ar para o interior da cama de combustão era proveniente de um ventilador, o qual permitia o controle da vazão de ar. O ar era direcionado através da grelha de refratário perfurado, a qual durante os experimentos era mantida em posição fixa de encaixe pré-determinada pelo fabricante, posteriormente era retirada pós queima para limpeza das cinzas. O método baseia-se na oxidação parcial da biomassa para o CO_2 e outros produtos carbonáceos resultantes de uma combustão. A Figura 1 apresenta o esquema do sistema utilizado para queima de biomassa.

Figura 1 – Desenho esquemático do sistema de queima da biomassa.



Fonte: Eng. Anderson de Jesus R. Martins

Onde:

1 - Alimentador de biomassa (com rosca sem fim);

2 - Entrada de vazão de ar para a câmara de combustão com regulagem;

3 - Queimador de biomassa;

4 – Soprador;

5 – Chaminé.

O soprador (4), localizado após o queimador (câmara de combustão) e o compartimento contendo os trocadores de calor, foi utilizado como um injetor de ar limpo na chaminé, com o objetivo de diluir os gases de exaustão. A concentração emitida de material particulado era elevada, portanto o procedimento foi necessário para assegurar o uso adequado do monitor ótico de material particulado dentro de sua faixa de medição em termos de concentração, que vai de 0,0001 a 400 mg/m³. Este fluxo de diluição influencia a relação ar/combustível e foi contabilizado nos cálculos.

A relação ar/combustível utilizada nos 3 testes foi calculada da seguinte forma:

Utilizando-se um anemômetro portátil, mediram-se as velocidades de saída do ar na chaminé (5) e do ar proveniente do soprador (4) utilizado como diluidor e que auxilia a saída do ar na chaminé.

Tabela 3 – Velocidades amostradas com o anemômetro.

							Média
Chaminé (m/s)	10,7	11,7	12	10,9	10,5	10,4	**11,03**
Soprador (m/s)	20,1	21,5	19,3	21,2	19,6	21,2	**20,48**

Multiplicando as velocidades pelas respectivas áreas dos tubos, temos as vazões em cada ponto:

$Vazão_{Chaminé}$ = 11,03 m/s * 0,025447 m² * 3600 s/h = 1010,45 m³/h

$Vazão_{Soprador}$ = 20,48 m/s * 0,007854 m² * 3600 s/h = 579,06 m³/h

Realizando um balanço de vazões, obtemos a vazão de entrada de ar (2) no queimador:

$Vazão_{Entrada\ de\ ar} + Vazão_{Soprador} = Vazão_{Chaminé}$

$Vazão_{Entrada\ de\ ar} = Vazão_{Chaminé} - Vazão_{Soprador}$

$Vazão_{Entrada\ de\ ar}$ = 1010,45 m³/h – 579,06 m³/h

$Vazão_{Entrada\ de\ ar}$ = 431,39 m³/h

Converte-se a unidade de vazão de ar para kg/h, 1 mol de ar equivale a 28,89 g de ar; 1 mol de ar também é 22,4 litros na CNTP. Se a temperatura for diferente de 0 °C, deve-se fazer uma correção; o volume cresce na proporção T/273, onde T é em K. Assim, com temperatura ambiente média de 30 °C (303 K) medida pelo amostrador de gases, temos:

$$28{,}89\ g\ de\ ar\ = \frac{303\ K}{273\ K} \times 22{,}4\ litros$$

28,89 g de ar = 24,86 litros de ar = 0,025 m³ de ar

$$\frac{28{,}89\ g\ de\ ar\ \times 431{,}39\ m^3\ de\ ar/h}{0{,}025\ m^3\ de\ ar} \times \frac{1\ kg}{1000\ g} = 498{,}51\ kg\ de\ ar/h$$

A relação ar/combustível se dá pela divisão da vazão de ar pela vazão de combustível

$$= {}^{498{,}51\ kg\ de\ ar/h}/_{14\ kg\ de\ combustível/h} = 35{,}6{:}1$$

4.8. Amostragem de gases e material particulado

Os gases e o material particulado foram amostrados em tempo real de queima com o amostrador de gases UniGas 3000+ da *Eurotron Instruments* (Figura 2a) e com o monitor óptico DataRAM4, modelo DR-4000 (Figura 2b), respectivamente.

Figura 2 – Aparelhos de amostragem de poluentes: (a) amostrador de gasesUniGas 3000+; (b) amostrador de material particulado DataRAM 4.

(a) (b)

Fontes: (a) Manual do Unigas 3000+; (b) Cieslinski (2014)

O DataRAM (DR4) é um nefelômetro de duplo comprimento de onda. O sistema trabalha com amostragem de ar ativa com vazão de sucção de 1 a 3,0 L/min. O equipamento pode coletar uma população de partículas com diâmetros variando de 40 nm a 4000 nm, ou seja, de 0,04 µm a 4 µm. O sistema de detecção de partículas fornece o diâmetro médio mássico de partícula para o aerossol amostrado, numa faixa de 0 a 400 mg/m^3. Com este equipamento podemos amostrar as partículas dispersas em corrente confinadas em dutos utilizando a Sonda de amostragem Isocinética, procedimento exigido pelas normas nacionais e internacionais, para uma amostragem representativa deste poluente. O DR4 é certificado e aceito pelas FCC – Federal Comunications Comission e pela EC – European Comunity.

Juntamente com o DataRAM4, modelo DR-4000, foram utilizados os seguintes acessórios:

- Sonda isocinética e boquilhas (Figura 3a), que permitem a coleta em chaminés;
- Seletor de partículas (Figura 3b), que retém as partículas de diâmetro maior que 2,5 µm, as quais não foram estudadas neste trabalho;

- Aquecedor (Figura 3c), para diminuir a umidade das partículas, eliminando os efeitos de coagulação e condensação de água nas mesmas.

Figura 3 – Acessórios utilizados com o DataRAM4: (a) sonda isocinética e boquilhas; (b) seletor de partículas; (c) aquecedor

(a) (b)

(c)

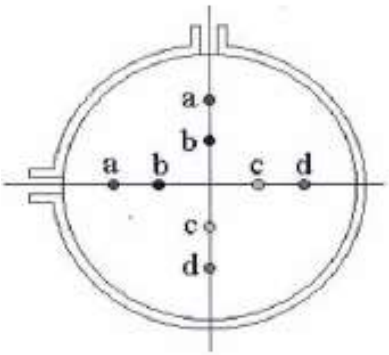
Fonte: Cieslinski (2014)

A localização dos orifícios onde foram inseridas as sondas de amostragem para material particulado seguiu a norma CETESB L9.221 (1990). A norma indica que, tanto para chaminés como para dutos de seção circular, deve-se escolher uma seção transversal que fique a pelo menos 8 diâmetros internos à jusante e a 2 diâmetros internos à montante de qualquer distúrbio de fluxo como curvas, expansão, contrações, entradas e saídas. Esta é uma exigência para amostragens representativas para material particulado. Deve-se também realizar

amostragens em múltiplos pontos no interior da chaminé de forma isocinética. Essa condição foi alcançada com o uso da sonda isocinética e a boquilha de amostragem adequada utilizada com o DataRam.

Além da seção transversal, deve-se atentar para os pontos de amostragem nesta seção. Para BSI Standards, através da norma BS 3405:1983, a amostragem deve ser efetuada com 4 ou 8 pontos de amostragem localizados em 2 ou 4 linhas de amostragem e os pontos vão do centro de 4 ou 8 áreas iguais. A localização dos pontos mencionados pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 - Pontos de amostragem na seção transversal de acordo com a norma BS 3405:1983*. Para o presente trabalho D = 17,54 cm**

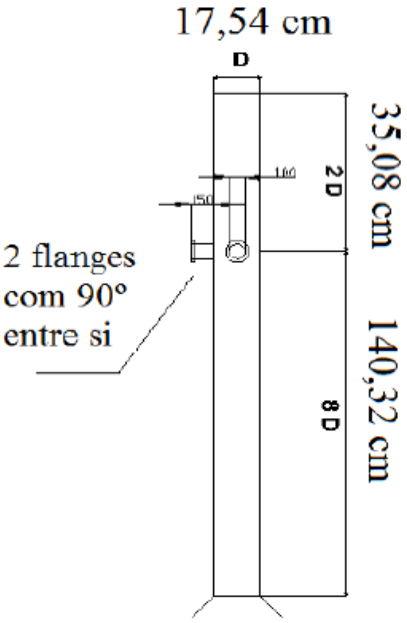


Ponto de amostragem*	Distância da parede de acordo com a norma*	Distância da parede (cm) para o presente trabalho**
a	0,065 D	1,1
b	0,250 D	4,4
c	0,750 D	13,2
d	0,935 D	16,4

Fonte: Cieslinski (2014)

A amostragem de material particulado emitido com as queimas foi realizada em uma seção transversal a 8 diâmetros internos à jusante (8 D) e 2 diâmetros internos à montante (2 D) dos distúrbios encontrados na chaminé do queimador de biomassa, de acordo com as Figuras 5 (a) e 5 (b). Além disso, foram observados os pontos de amostragem a, b, c e d nos dois eixos na seção transversal escolhida, conforme mencionado anteriormente.

Figura 5 – Chaminé do queimador de biomassa (a) e Esquema das posições dos orifícios de amostragem na chaminé (b), onde D = 17,54 cm.



(a) (b)

Fonte: Amaral (2013) e Cieslinski (2014)

O Eurotron é um analisador de gases e foi utilizado para as análises das emissões gasosas e determinação da composição química dos gases da combustão. Os dados são coletados em tempo real de amostragem e armazenados. Permite a medição de pressão diferencial para medir perdas de carga e velocidade do gás. Sensores eletroquímicos internos fazem a leitura das concentrações de oxigênio (O_2), de monóxido de carbono (CO), de NO_x (óxidos de nitrogênio) e de SO_2 (dióxido de enxofre). As temperaturas do gás e do ar são utilizadas em conjunto com a análise de gás para calcular a eficiência, o excesso de ar, e a concentração de CO_2. A concentração de O_2 é a base que irá normalizar as outras concentrações, permitindo comparação entre valores. O equipamento está em conformidade com EPA (Environmental Protection Agency).

Diferente da amostragem de material particulado, a amostragem de gases foi observada em apenas um ponto da chaminé, pois não há norma técnica regulamentadora que indique a necessidade de uma amostragem isocinética. Portanto, a sonda de amostragem foi inserida a aproximadamente 8 diâmetros internos à jusante e 2 diâmetros à montante dos distúrbios encontrados na chaminé do queimador de biomassa.

As concentrações dos poluentes emitidos pela combustão do bagaço da cana-de-açúcar estão expressas em mg/Nm³, unidade utilizada na Resolução Conama nº 382/06 (resolução utilizada para comparação de resultados neste trabalho). Nm³ é a unidade de medida de volume quando este volume é colocado em condições normais de temperatura e pressão (CNTP), ou seja, 0ºC e 1 atm. Todos os dados foram tratados e corrigidos para 8% de O_2.

4.9. Análises estatísticas

Foram analisadas algumas medidas baseadas na correlação entre os poluentes emitidos durante a combustão da biomassa para cada par de teores de umidade, assim sendo: 8,5% e 15,09%; 8,5% e 37,26%; e 15,09 e 37,26%. Para tal, utilizaram-se os seguintes indicadores estatísticos: coeficiente de correlação (r); coeficiente de determinação (r^2); erro padrão de estimativa (EPE); coeficiente linear (a); coeficiente angular (b); índice de concordância (d) de Willmott proposto por WILLMOTT et al. (1985); coeficiente de confiança ou desempenho (c) proposto por CAMARGO & SENTELHAS (1997); e medida de eficiência do modelo (NS) proposta por Nash & Sutcliffe (1970).

O coeficiente de correlação mede o grau da correlação entre duas variáveis. Equivale a 1, quando há uma correlação perfeita positiva entre variáveis; 0 quando as variáveis não dependem linearmente uma da outra; e -1 quando há uma correlação perfeita negativa entre variáveis. O mesmo foi calculado através da Equação 10:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left[U_{1,i}-\overline{U_1}\right]\times\left[U_{2,i}-\overline{U_2}\right]}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left[U_{1,i}-\overline{U_1}\right]^2\times\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left[U_{2,i}-\overline{U_2}\right]^2}}} \qquad (10)$$

Onde:

U_1 = Valores de concentração de poluentes emitidos pelo bagaço com menor teor de umidade (%);

U_2 = Valores de concentração de poluentes emitidos pelo bagaço com maior teor de umidade (%);

O coeficiente de determinação é o quadrado do coeficiente de correlação. O valor de r^2 varia de 1, o que significa que toda a variância nos dados é explicada pela Umidade 1, até 0, onde a variância não é explicada pela Umidade 1.

O erro padrão de estimativa mede o desvio entre os valores de concentração de poluentes emitidos com a combustão da biomassa a diferentes teores de umidade, e foi calculado através da Equação 11:

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum(U_{1,i}-U_{2,i})^2}{n-1}} \quad (11)$$

Onde:

U_1 = Valores de concentração de poluentes emitidos pelo bagaço com menor teor de umidade (%);

U_2 = Valores de concentração de poluentes emitidos pelo bagaço com maior teor de umidade (%);

n = Número de observações.

O coeficiente linear (a) e o coeficiente angular (b) são componentes da equação linear y = a + bx. Quando os dados de x (U_1) e y (U_2) são iguais, a análise regressão resulta em uma reta com a (intercepto) = 0 e b (coef. angular) = 1.

O índice de concordância de Willmott pode variar de 0, para concordância nula, a 1, para concordância perfeita, e foi determinado através da Equação 12:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum(U_{2,i}-U_{1,i})^2}{\sum(|U_{2,i}-U_1|+|U_{1,i}-U|)^2}\right] \quad (12)$$

Onde:

U_1 = Valores de concentração de poluentes emitidos pelo bagaço com menor teor de umidade;

U_2 = Valores de concentração de poluentes emitidos pelo bagaço com maior teor de umidade;

U = Média dos valores de concentração de poluentes emitidos pelo bagaço com menor teor de umidade.

Segundo Camargo & Sentelhas (1997) apud Pereira et al. (2009), o coeficiente c é obtido pelo produto entre o coeficiente de correlação e o índice de Willmott, e interpretado como: “ótimo” (c > 0,85); “muito bom” (c entre 0,76 e 0,85);

“bom” (c entre 0,66 e 0,75); “mediano” (c entre 0,61 e 0,65), “sofrível” (c entre 0,51 e 0,60), “mau” (c entre 0,41 e 0,50) e “péssimo” (c < 0,40).

A medida de eficiência do modelo, proposta por Nash & Sutcliffe (1970) é calculada a partir da Equação 13:

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(U_{1,i}-U_{2,i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(U_{1,i}-\overline{U_1})^2} \quad (13)$$

Onde:

U_1 = Valores de concentração de poluentes emitidos pelo bagaço com menor teor de umidade;

U_2 = Valores de concentração de poluentes emitidos pelo bagaço com maior teor de umidade;

Se a diferença entre os valores de concentração de poluentes emitidos com a combustão da biomassa a diferentes teores de umidade for nula, então NS=1, e as curvas de emissão de poluentes representam um ajuste perfeito. Se a diferença é da mesma magnitude que a variação dos dados, NS=0, e o valor médio é uma boa representação da emissão. À medida que a diferença aumenta, os valores do índice tornam-se mais negativos, com NS = - ∞.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são retratados e discutidos os resultados obtidos com a caracterização química e com a amostragem de gases e material particulado emitidos a partir da combustão do bagaço da cana-de-açúcar.

5.1. Caracterização química

Os resultados obtidos para caracterização química imediata e energética (poder calorífico superior – PCS) podem ser visualizados na Tabela 4. Os resultados encontrados para caracterização química da parede celular são encontrados na Tabela 5. Para a realização da análise química imediata, foi utilizado bagaço com teor de umidade de 15,09%, com o intuito de comparar a composição obtida com a do bagaço estudado por Sánchez (2010), que possuía teor de umidade de 6,4%.

Tabela 4 – Composição (%) e PCS do bagaço da cana-de-açúcar.

Referência	Umidade (%)	Voláteis (%)	Carbono Fixo (%)	Cinzas (%)	PCS (J/g)
Este trabalho	15,09	75,4	16,6	7,94	16211
Sánchez (2010)	6,4	86,4	9,2	4,4	16700

Tabela 5 – Composição química (%) da parede celular de biomassas utilizadas para geração de energia.

Referência	Biomassa	Extrativos (%)	Lignina (%)	Holocelulose (%)	PCS (J/g)
Este trabalho	Bagaço de cana-de-açúcar	1,717±0,25	25,55±2,01	73,07±1,76	16211
Telmo e Lousada (2011)	Espécies Tropicais	14,20±2,80	37,10±3,67	61,3	20810

O teor de umidade encontrado neste trabalho foi maior que o encontrado por Sánchez (2010). Isso explica o fato da obtenção de um valor menor de PCS em relação ao outro autor, pois quanto menor a umidade, melhor a queima do combustível.

Telmo e Lousada (2011) realizaram a análise química de espécies tropicais e obtiveram maior teor de lignina que a biomassa estudada neste trabalho. Consequentemente, o poder calorífico também foi maior. Segundo os autores, essa relação se deve ao fato de que a lignina ser rica em carbono e hidrogênio, que são os principais elementos que produzem calor. Os extrativos também influenciam positivamente no poder calorífico, uma vez que possuem alto valor de aquecimento. Portanto, espécies com maior teor de lignina e extrativos terão melhor poder de queima, gerando mais energia. Os valores obtidos de teor de lignina para o bagaço

evidenciam seu uso como combustível, comparável ao madeirável, sendo ainda otimizado com menores teores de umidade.

5.2. Amostragem de gases

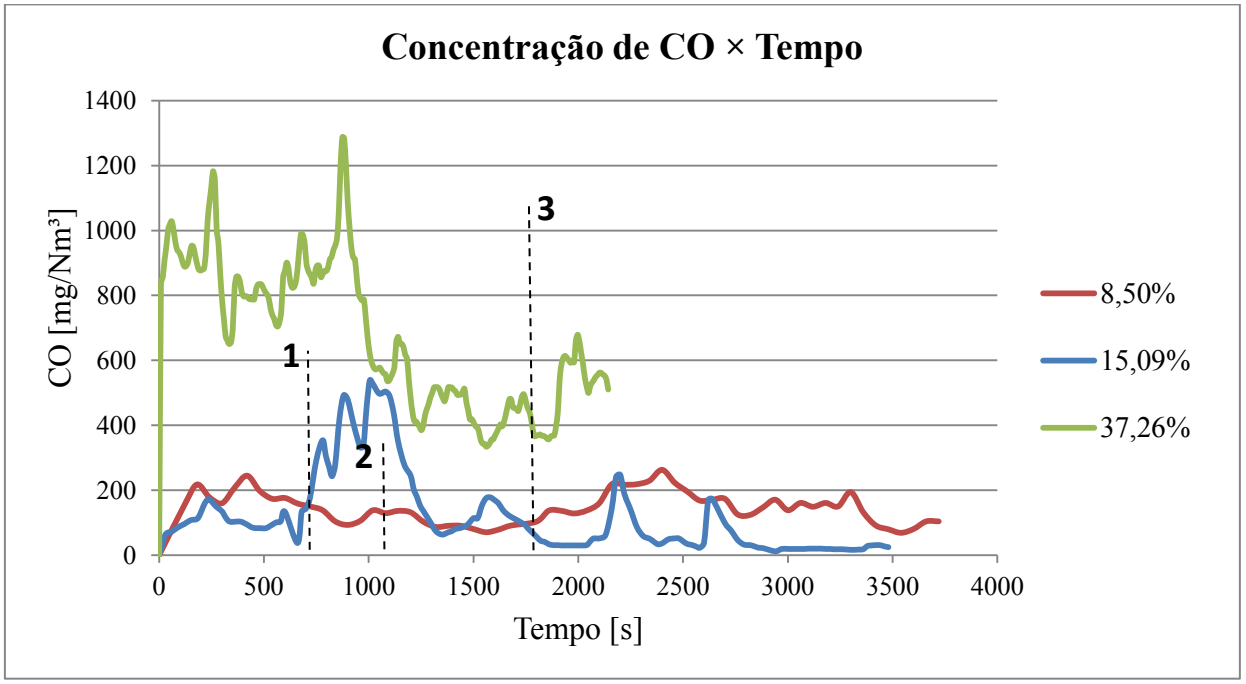
Foram realizadas análises preliminares de teor de umidade e determinação do poder calorífico superior da biomassa para cada um dos testes de combustão. Os resultados estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Teores de umidade e PCS para os testes de combustão.

	U (%)	PCS (J/g)
Teste 1	8,5	15949
Teste 2	15,09	16211
Teste 3	37,26	14905

A Figura 6 mostra as concentrações de CO (mg/Nm³) emitidas com a queima de bagaço da cana-de-açúcar, enquanto a Figura 7 traz a temperatura do gás em relação ao tempo, ambas para os três testes apresentados.

Figura 6 - Concentração de CO em função do tempo de combustão, para diferentes teores de umidade.

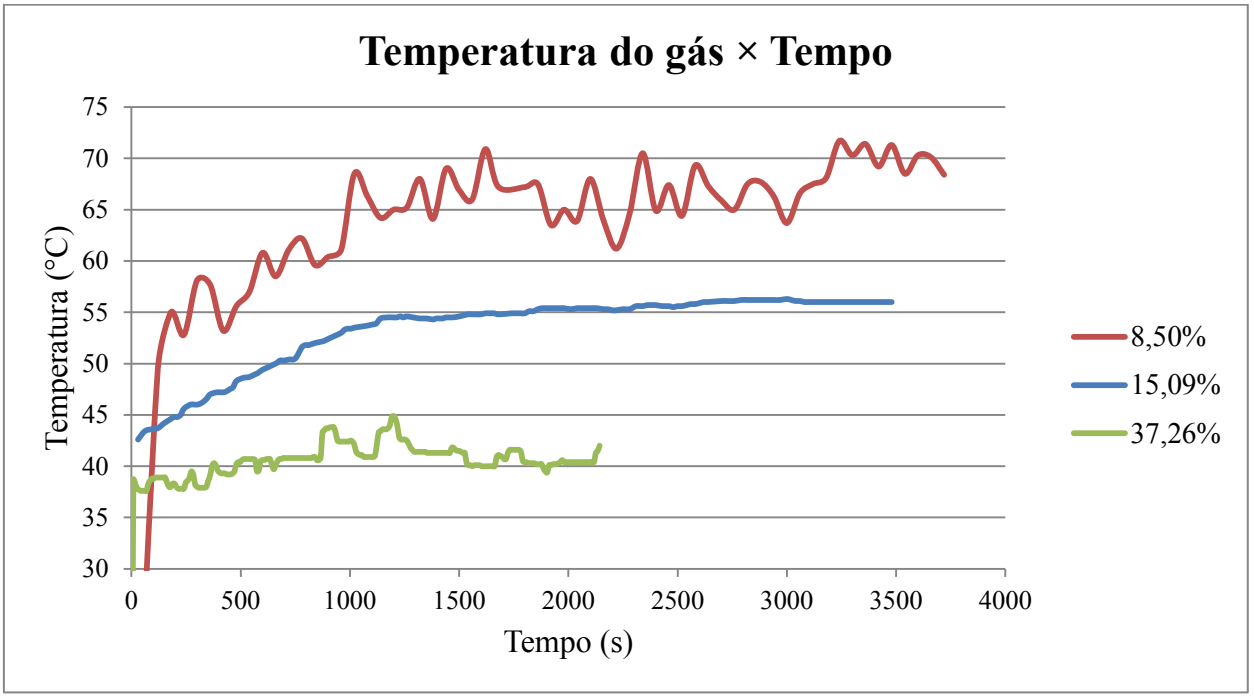


Onde: 1 – Interface entre as fases de chama e incandescência (15,09%)

2 - Interface entre as fases de chama e incandescência (8,50%)

3 - Interface entre as fases de chama e incandescência (37,26%)

Figura 7 – Temperatura do gás em função do tempo de combustão, para diferentes teores de umidade.



Os testes 1 e 2 apresentaram emissões de CO condizentes com o trabalho de França et al. (2012), que menciona que o CO, composto não completamente oxidado, é gerado em maior concentração na fase incandescente, seguindo o padrão típico do processo de combustão. O teste 3 trouxe emissões de CO maiores na fase de chama, comportamento contrário ao demonstrado por França et al. (2012), devido às baixas temperaturas na câmara de combustão e pouca mistura entre o ar de combustão e os gases de combustão, motivado pelo elevado teor de umidade do combustível.

As concentrações máximas de CO apresentadas durante a combustão da biomassa foram de 262,7 mg/Nm³, 538,05 mg/Nm³ e 1287,36 mg/Nm³, para teores de umidade de 8,5%, 15,09% e 37,26%, respectivamente. Os valores obtidos não ultrapassam o limite máximo de emissão de CO para fontes fixas estabelecido pela Resolução Conama nº 382/06, que é de 1700 mg/Nm³.

Com estes resultados, observa-se que a maior concentração obtida foi para a biomassa com maior teor de umidade. Segundo Ghafghazi et al. (2011), o teor de umidade da biomassa influencia o poder calorífico inferior do combustível, temperatura de combustão e eficiência de combustão. O primeiro passo na combustão da biomassa começa com a fase de secagem, em que o conteúdo de água do combustível vaporiza. A quantidade de energia necessária para esta fase é menor para combustíveis com baixo teor de umidade em comparação com o de combustíveis com alto teor de umidade, assim a temperatura de combustão será maior para combustíveis com menor teor de umidade.

As figuras 8 e 9 trazem, respectivamente, as concentrações de CO_2 (mg/Nm³) e NOx (mg/Nm³) emitidas durante a queima da biomassa para diferentes teores de umidade.

Figura 8 - Concentração de CO_2 em função do tempo de combustão, para diferentes teores de umidade.

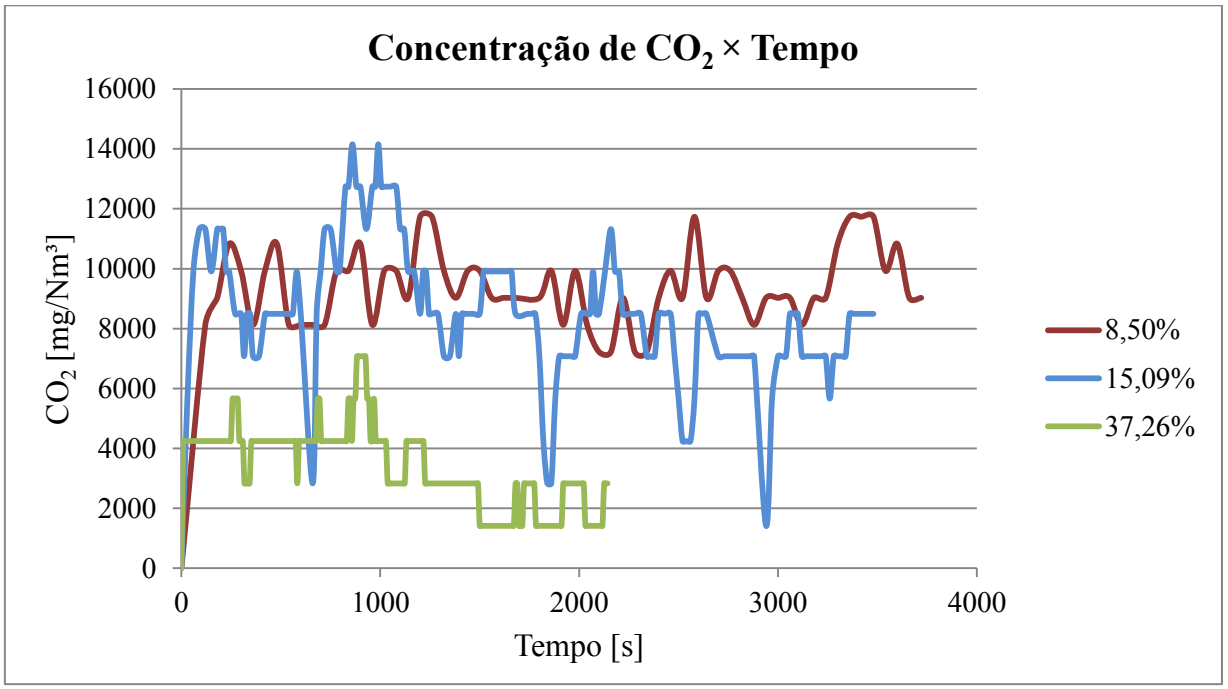
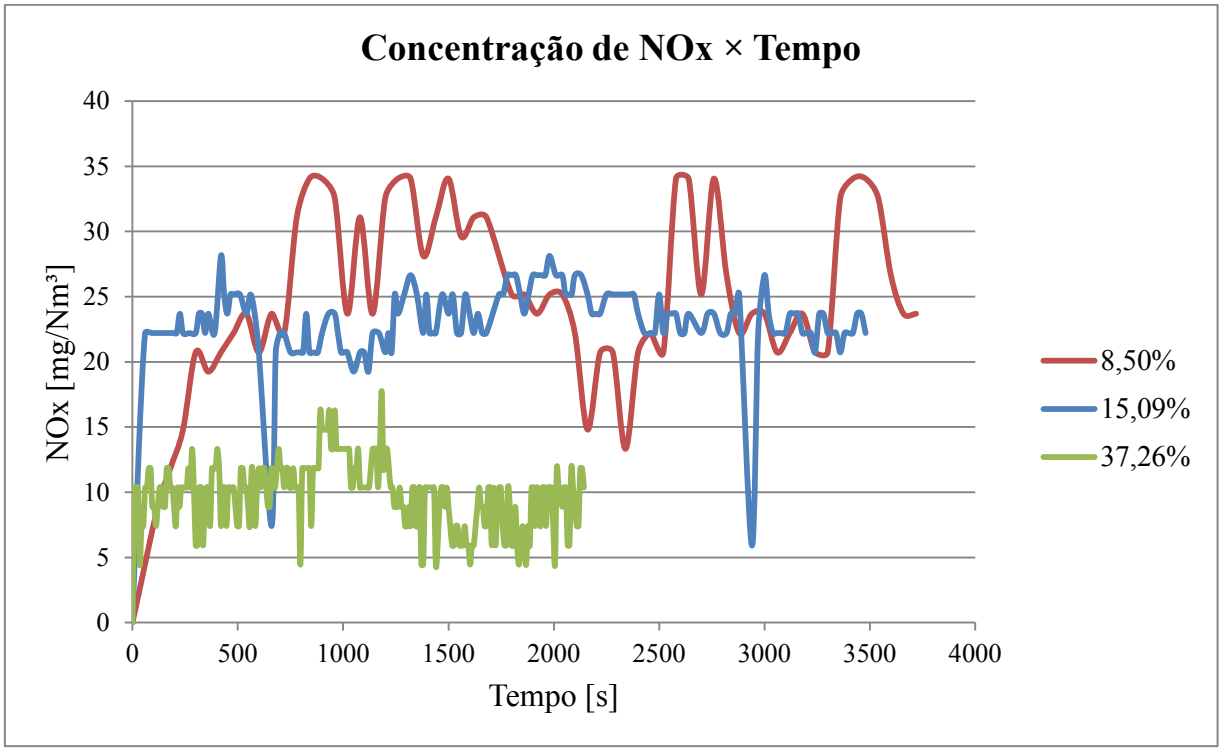


Figura 9 - Concentração de NOx em função do tempo de combustão, para diferentes teores de umidade.

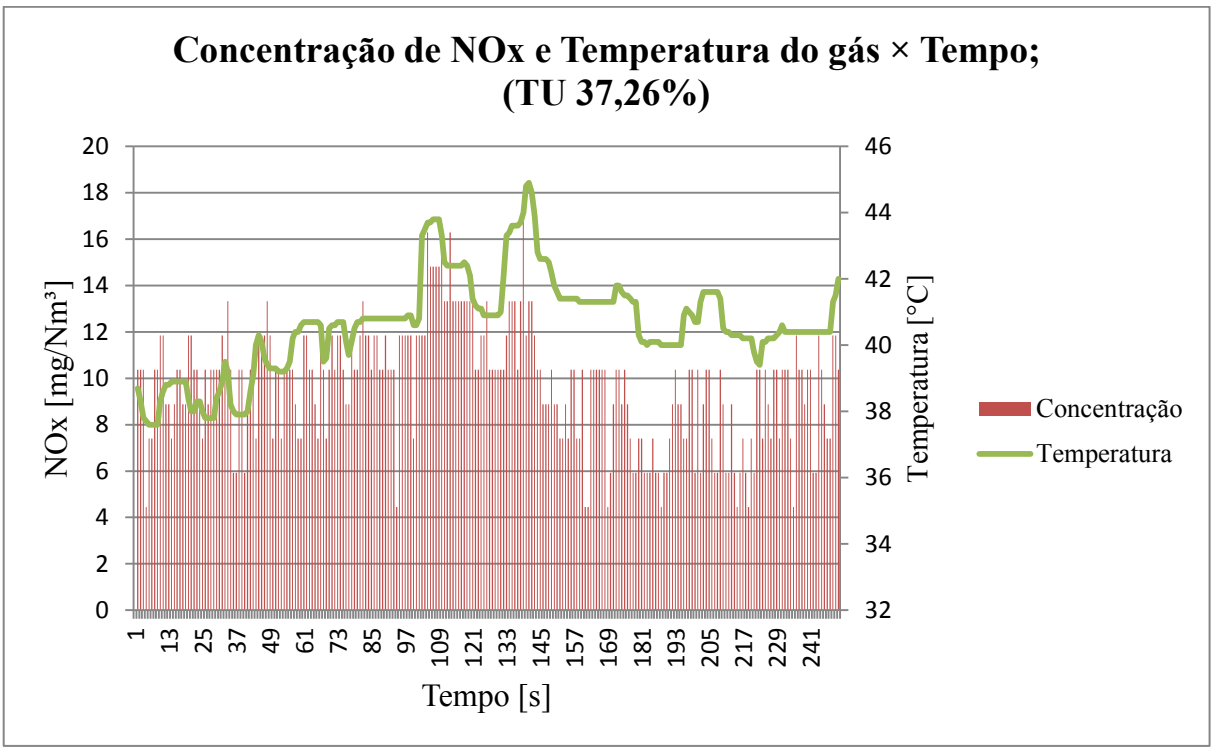


Observa-se que houve maior emissão de CO_2 e NOx com a combustão do bagaço com 8,5% de umidade. Combustíveis com menor teor de umidade possuem maior velocidade e temperatura de combustão. Segundo Amaral et al. (2014), velocidades de combustão elevadas conduzem a uma maior emissão de CO_2 e NOx, e menor emissão de CO.

De acordo com a Resolução Conama nº 382/06, o limite de emissão de NOx para uma potência de queimador menor que 10 MW, caso deste trabalho (0,36 MW), não é aplicável.

A Figura 10 mostra a concentração de NOx (mg/Nm³) e temperatura do fluxo gasoso amostrado (°C) em função do tempo de combustão, para biomassa com teor de umidade de 37,26%.

Figura 10 - Concentração de NOx e temperatura do gás em função do tempo de combustão, para biomassa com teor de umidade de 37,26%.



Segundo Carvalho Jr. e Lacava (2003), o NO_x é o termo geral que designa a soma do monóxido de nitrogênio (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO_2), os dois componentes de nitrogênio mais emitidos em processos de combustão.

Normalmente, as quantidades de NO formadas são muito maiores que as de NO_2. Contudo, uma vez lançado na atmosfera, o NO se transforma rapidamente em NO_2 e as taxas de emissão mássica de NOx são sempre calculadas, considerando seus dois compostos.

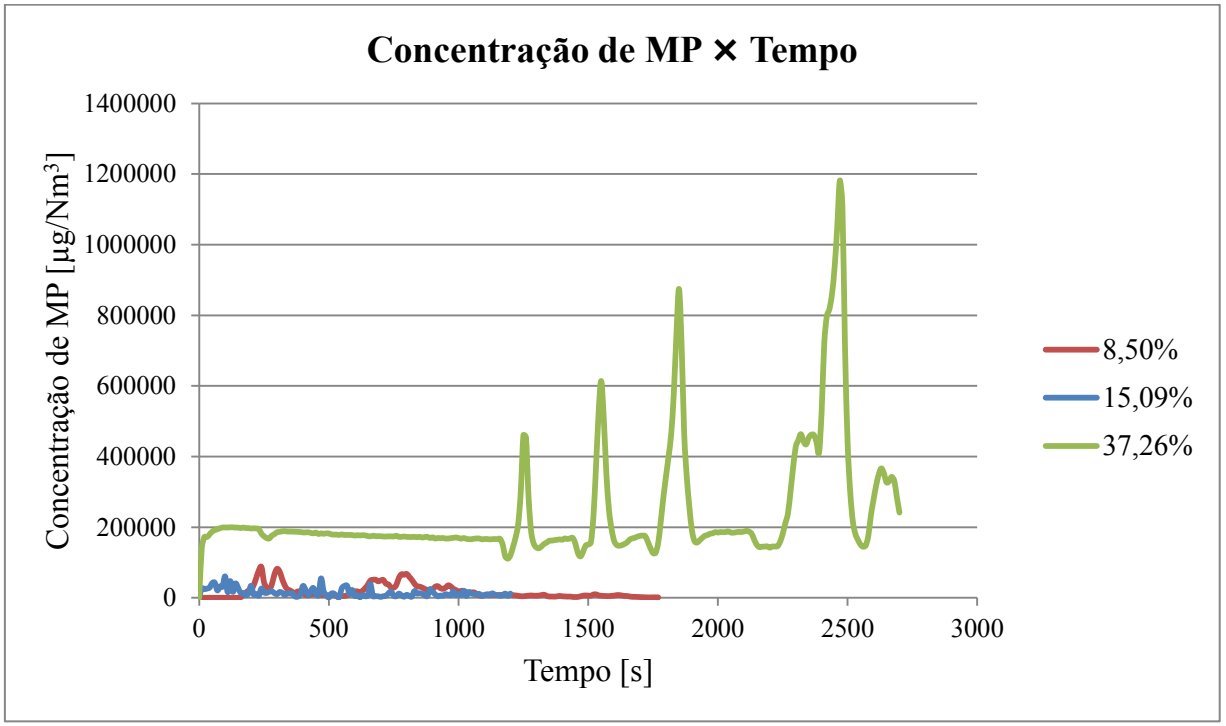
A variação da concentração de NOx acompanhou as flutuações de temperatura, como vemos na Figura 10. Esta temperatura se refere ao fluxo gasoso amostrado pelo DR4. Quanto maior a temperatura na câmara de combustão mais elevada a temperatura do fluxo gasoso (FRANÇA et al., 2012).

França et al. (2012), ao realizarem a combustão da cana em laboratório, obtiveram maiores concentrações de NOx na fase de chama, ou seja, na fase de maior temperatura do gás de combustão. A partir da combustão de biomassa nativa da Amazônia, Soares Neto et al. (2011) também observaram as maiores concentrações de NOx, cerca de 47,15 mg/Nm³, na fase de chama.

5.2. Amostragem de material particulado

Os resultados de concentração de material particulado emitido *versus* tempo de queima estão dispostos na Figura 11.

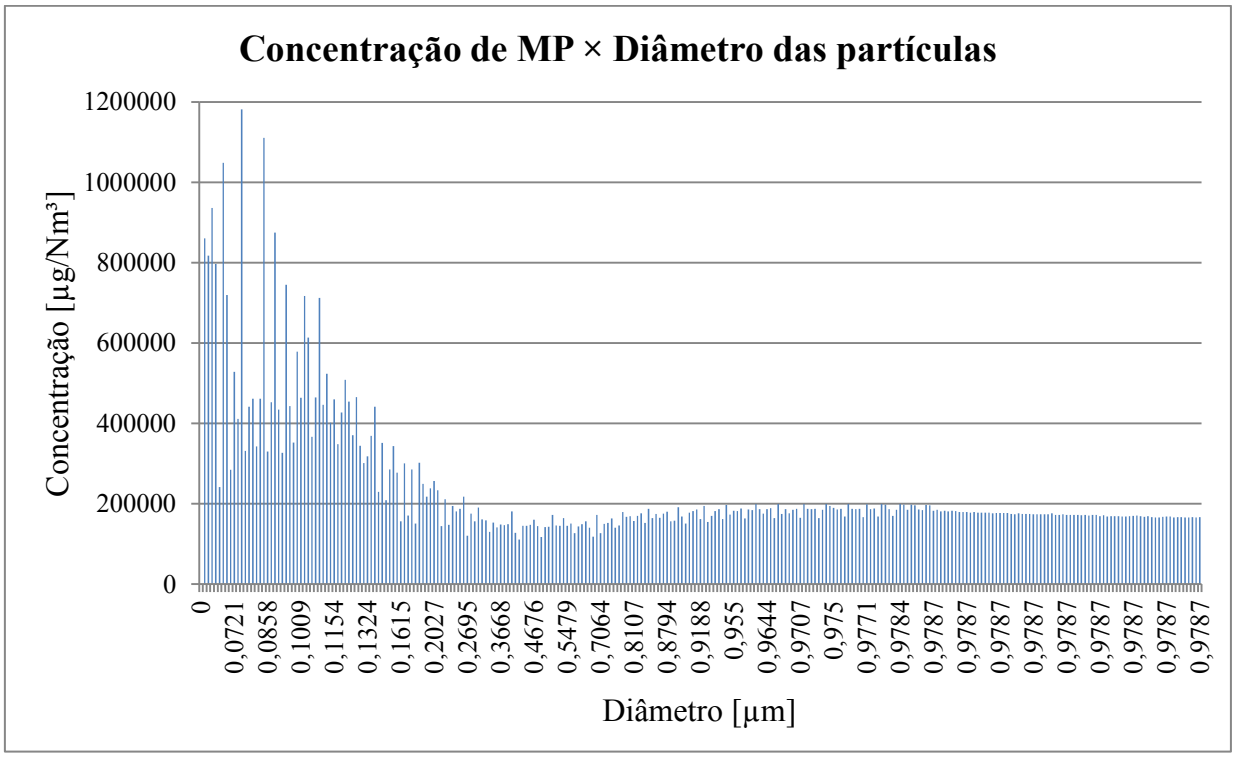
Figura 11 - Concentração do material particulado em função do tempo de combustão, para o bagaço com diferentes teores de umidade.



Observa-se que as concentrações de material particulado menor que 2,5 µm emitidas com a queima do bagaço da cana-de-açúcar com umidade de 37,26% foram maiores que as obtidas para menores teores de umidade. Segundo Gonçalves e Soares Neto (2013), um alto teor de umidade aumenta os produtos indesejáveis de combustão (gases poluentes e material particulado).

A Figura 12 traz os resultados de concentração de material particulado *versus* diâmetro das partículas, para a biomassa com teor de umidade de 37,26%, a qual emitiu a maior concentração de partículas.

Figura 12 - Concentração do material particulado em função do diâmetro das partículas.



Através da figura, constatam-se valores elevados de concentração de emissão para pequenos diâmetros de partículas, menores que 0,2 µm, o que é extremamente prejudicial à saúde humana e ao clima.

Durante o teste, a concentração mais elevada, de 1.181.652 µg/Nm³ (1.181 mg/Nm³), ocorreu para partículas de diâmetro igual a 0,0746 µm. Em seu trabalho, Amaral et al. (2013) obtiveram concentração máxima de 794.042 µg/m^3 (794 mg/Nm³) para partículas menores que 0,1 µm, utilizando o bagaço com teor de umidade de 21%. Cieslinski (2014) e Hossain et al. (2012) também obtiveram maiores concentrações relacionadas aos menores diâmetros de partículas. Segundo Carmo et al. (2010), as partículas finas (d < 2,5 µm) possuem maior tempo de residência na atmosfera que as partículas grossas, podendo ser transportadas a grandes distâncias, o que facilita sua dispersão. Além disso, quando aspiradas pelos seres humanos, elas se depositam nos brônquios terminais e nos alvéolos, agravando problemas respiratórios e podendo causar mortes prematuras.

O CONAMA, através da Resolução nº 382/06, estabelece que o limite máximo de emissão de material particulado durante a queima de cana-de-açúcar em

fontes fixas é de 280 mg/Nm³. Este valor foi ultrapassado durante a combustão da biomassa com 37,26% de umidade.

5.3. Análises estatísticas

A Tabela 7 traz os resultados dos indicadores estatísticos estudados.

Tabela 7 – Resultados dos indicadores estatísticos estudados.

	TU	EPE	a	b	r²	r	NS	d	c
	8,5% e 15,09%	144,86	153,40	-0,05	0,02	0,13	-6,52	0,19	0,025
CO	8,5% e 37,26%	565,31	47,57	0,13	0,43	0,65	-66,5	0,42	0,28
	15,09% e 37,26%	561,72	57,42	0,15	0,07	0,27	-3,53	0,43	0,11
	8,5% e 15,09%	2784,87	7412,06	0,21	0,10	0,32	-1,50	0,54	0,17
CO_2	8,5% e 37,26%	6126,76	7162,82	0,57	0,19	0,43	-6,14	0,31	0,13
	15,09% e 37,26%	6010,45	5299,4	1,05	0,3	0,54	-0,57	0,33	0,18
	8,5% e 15,09%	27657	30244,8	-0,53	0,09	0,30	-0,45	0,14	0,04
MP	8,5% e 37,26%	181568	19952,5	-0,02	0,003	0,06	-91,45	0,23	0,01
	15,09% e 37,26%	162882	-13098	0,15	0,08	0,29	-198,61	0,12	0,03
	8,5% e 15,09%	7,89	15,80	0,40	0,07	0,26	-0,18	0,45	0,12
NOx	8,5% e 37,26%	17,69	18,62	0,69	0,08	0,29	-2,50	0,25	0,07
	15,09% e 37,26%	14,21	18,88	0,36	0,05	0,22	-3,19	0,26	0,06
	8,5% e 15,09%	11,10	-1,03	1,22	0,94	0,97	-0,23	0,72	0,69
TEMP	8,5% e 37,26%	22,18	-0,24	1,53	0,85	0,92	-1,89	0,39	0,36
	15,09% e 37,26%	11,54	-0,64	1,29	0,91	0,95	0,03	0,65	0,62

Ao analisar os indicadores estatísticos testados para todos os gases emitidos, em todos os pares de teores de umidade, foram obtidos valores baixos de r² e r, o que indica baixa correlação linear. Foram encontrados altos valores de EPE para CO, CO_2 e MP, indicando grande desvio de dados, e menores valores para NOx. O erro padrão de estimativa é uma estimativa do desvio médio da regressão dos dados do teor de umidade mais alto de cada par. Em relação ao índice de Willmot, na maioria dos casos, os maiores valores obtidos foram para o par 8,5% e 15,09%, na emissão de CO_2 e NOx. Nota-se que, para condições semelhantes,

houve melhor ajuste entre as curvas de poluentes. Isso enfatiza a influência de variáveis, como o teor de umidade, na emissão de poluentes. De quer forma, o índice c foi extremamente baixo para todos os poluentes e pares de umidade, classificando todas as correlações como “péssimas” ($c < 0,4$).

Isso pode ser explicado, pois, no processo de combustão, existem diversas variáveis que podem influenciar na emissão de poluentes, como a temperatura ambiente, a umidade relativa do ar, etc. Para que fosse determinada a real existência ou não de correlação entre os poluentes e a umidade, seria necessário controlar todas as variáveis atuantes no processo, permitindo a variação de apenas uma delas, no nosso caso o teor de umidade do combustível. Neste trabalho não foi possível atender a estas condições, portanto, deve-se frisar que os resultados obtidos são um retrato da correlação entre variáveis onde somente uma variável foi controlada, e por isso os mesmos foram baixos.

Em relação à temperatura, foram obtidos altos coeficientes de correlação e determinação. As análises da temperatura também foram as que tiveram resultados de a e b mais próximos de 0 e 1, respectivamente, o que indica um padrão de comportamento da temperatura dentro da câmara de combustão. O coeficiente c classifica a correlação dos pares 8,5% e 15,09%; 8,5% e 37,26%; e 15,09% e 37,26% como “boa”, “péssima” e “mediana”, respectivamente, ou seja, quanto menor a amplitude da umidade, mais coincidente foi o comportamento na curva de temperatura.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que:

- Obtiveram-se as maiores emissões de CO durante a fase de chama na combustão do bagaço com 37,26%. Esse comportamento contradiz o descrito na literatura, onde as maiores emissões de CO ocorrem na fase de incandescência. Isso se deve às baixas temperaturas na câmara de combustão, ocasionadas pelo alto teor de umidade, que resulta na combustão incompleta do bagaço;
- As maiores emissões de CO_2 e NO_X foram emitidas na fase de maior temperatura da combustão do bagaço com o menor teor de umidade

avaliado, 8,5%. O controle de umidade pode ser interessante fator para minimizar a emissão de NO_X;

- A maior concentração emitida de material particulado (1.180 mg/Nm³) ocorreu para a biomassa com teor de umidade de 37,26%, e estava relacionada com o diâmetro igual a 0,0746 µm;
- Foi obtida baixa correlação linear entre os poluentes emitidos pelo bagaço com diferentes teores de umidade. Existem diversas variáveis atuantes no processo de combustão, portanto, para determinar a real existência ou não de correlação, devem-se controlar todas elas, permitindo a variação de apenas uma. Tal controle não foi realizado neste trabalho, o que explica o resultado obtido;
- São evidentes as limitações do equipamento utilizado. Entretanto, os resultados deste trabalho ajudam a melhorar a compreensão os fenômenos associados à combustão e à emissão de poluentes;
- O bagaço da cana, resíduo de um processo industrial, é um combustível de origem orgânica (biomassa) e, portanto, é classificado como combustível renovável. O principal composto formado no processo de combustão é o CO_2, que é posteriormente absorvido no processo de formação do canavial (balanço zero para o ciclo biogeoquímico do carbono). Porém, na combustão, outros produtos minoritários são formados como resultado de reações secundárias. Aqui foi avaliado o potencial de formação de CO, NO_x e material particulado. Os resultados sugerem que estes materiais emitidos são potencialmente danosos ao ambiente. Os usuários deste tipo de fonte de energia devem considerar a instalação de equipamentos para minimizar a formação e as emissões de gases e partículas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Biomassa.** Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf>. Acesso em: 24 ago. 2015.

AMARAL, S. S. et al. **Emissões da queima do bagaço da cana-de-açúcar.** In: Congresso Internacional de Bioenergia, 8, 2013, São Paulo, 2013.

AMARAL, S. S. et al. **Comparative study for hardwood and softwood forest biomass: Chemical characterization, combustion phases and gas and particulate matter emissions.** Bioresource Technology, Guaratinguetá, n.164, p.55-63, abr. 2014.

BILGILI, F.; OZTURK, I. **Biomass energy and economic growth nexus in G7 countries: Evidence from dynamic panel data.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Turkey, p.132-138, mai. 2015.

BRAGA, A.; PEREIRA, L. A. A.; SALDIVA, P. H. N. **Poluição atmosférica e seus efeitos na saúde humana.** In: SUSTENTABILIDADE NA GERAÇÃO E USO DE ENERGIA, UNICAMP, 2002.

BRAGATO, M. et al. **Combustion of coal, bagasse and blends there of - Part I: Emissions from batch combustion of fixed beds of fuels**. Fuel, São Paulo, n. 96, p.43-50, jan. 2012.

BSI STANDARDS. **BS 3405:** British Standard Method. Measure of particulate emission including grit and dust (simplified Method), 1983.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

Carmo C. N.; et al. **Associação entre material particulado de queimadas e doenças respiratórias na região sul da Amazônia brasileira.** Rev Panam Salud Publica. 2010; 27(1):10–6.

CARDOZO, E. et al. **Combustion of agricultural residues: An experimental study for small-scale applications.** Fuel, Estocolmo, n. 115, p.778-787, ago. 2013.

CARVALHO DE, A. M. et al. Embrapa. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento:** Teores de hemiceluloses, celulose e lignina em plantas de cobertura com potencial para sistema plantio direto no cerrado. Planaltina. 2010.

CARVALHO JR, J. A.; LACAVA, P. T. **Emissões em processos de combustão.** São Paulo: Editora UNESP, 2003.

CETESB. L9. 221: Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias - Determinação dos Pontos de Amostragem, 1990.

CHAVES, A. M. B. et al. **Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus* spp.** Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.9, n.17; p.533, dez. 2013.

CIESLINSKI, J. E. F. **Study the issue and control of gases and particles from biomass burning.** 2014. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA 003/1990**, 1990.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA 382/2006: Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas**, 2006.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. (Org.). **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008. 736 p.

COSTA, M. A. M. et al. **Real-time sampling of particulate matter smaller than 2.5 um from Amazon forest biomass combustion.** Atmospheric Environment, v. 54, p.480-489, 2012.

DEMIRBAS, A. **Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues.** Elsevier: Progress in Energy and Combustion Science, Konya, p.171-192, 17 fev. 2005.

ESTADOS UNIDOS. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Overview of Greenhouse Gases:** Carbon Dioxide Emissions. Disponível em: <http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases/co2.html>. Acesso em: 25 ago. 2015.

FERNANDES, A. P. S. **Emissão de PM 2,5 e gases em sistemas domésticos de queima de biomassa.** 2009. 67 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Ambiente, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

FRANÇA, D. A. et al. **Pre-Harvest Sugarcane Burning: Determination of Emission Factors through Laboratory Measurements.** *Atmosphere.* 2012, *3*, 164-180.

GARCIA, R. **Combustíveis e combustão industrial**. Rio de Janeiro: Interciência Ltda, 2002.

GARCIA, R. **Combustíveis e combustão industrial**. 2ª Edição. Rio de Janeiro. Interciência, 2013.

GHAFGHAZI, S. et al. **Particulate matter emissions from combustion of wood in district heating applications**. Renewable And Sustainable Energy Reviews, Vancouver, n. 15, p.3019-3028, mar. 2011.

GONÇALVES, H. A.; SOARES NETO, T. G. **Concentrações das espécies químicas liberadas durante a combustão de biomassa.** 2013. 39 p. Disponível em: <http://mtc-m19.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19/2013/09.03.11.41.37/doc/Heber Albuquerque Gonçaalves.pdf>. Acesso em: 30 out. 2013.

HAYASHI, K. et al. **Trace gas and particle emissions from open burning of three cereal crop residues: Increase in residue moistness enhances emissions of carbon monoxide, methane, and particulate organic carbon.** Atmospheric Environment, Japão, p.36-44, jun. 2014.

HOFSETZ, K.; SILVA, M. A. **Brazilian sugarcane bagasse: Energy and non-energy consumption.** Biomass & Bioenergy, Campinas, p.564-573, jul. 2012.

HOSSAIN, A. M. M. M. et al. **Volatility and mixing states of ultrafine particles from biomass burning.** Journal of Hazardous Materials, v. 205-206, p. 189-197, 2012.

HOSSEINI, S. et al. Particle size distributions from laboratory-scale biomass fires using fast response instruments. **Atmospheric Chemistry And Physics**, v. 10, p.8065-8076, 2010.

KLAUTAU, J. von P. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo co-corrente para secagem de grãos.** 2008. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008, 193 f.

LORA, E. E. S. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial ede transporte**. Rio de Janeiro: Interciência, 2002. 482 p.

LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. **Biocombustíveis: volumes 1 e 2.** Rio de Janeiro: Interciência Ltda, 2012. 1200 p.

MARABEZI, K. **Estudo sistemático das reações envolvidas na determinação dos teores de lignina e holocelulose em amostras de bagaço e palha de cana-de-açúcar.** Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Ciências Físico-Química, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009, 158 f.

Ministério da Agricultura. **Cana-de-açúcar.** Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>. Acesso em: 22 jul. 2015.

Ministério do Planejamento. **Brasil é o 4º maior produtor de energia renovável do mundo.** 2014. Disponível em: <http://www.pac.gov.br/noticia/3c67e495>. Acesso em: 01 ago. 2015.

MORAES, M. S. A. et al. **Analysis of products from pyrolysis of Brazilian sugar cane straw.** Fuel Processing Technology, Porto Alegre, v. 101, p.35-43, mar. 2012.

Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V.: **River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles**, J. Hydrol., 10, 282–290, 1970.

PEREIRA, D. R. et al. **Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG**. Ciência Rural, Santa Maria, v.39, n.9, p.2488-2493, dez. 2009.

QUIRINO, W. et al. **Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos.** Revista da Madeira, Brasília, n. 89, p.100-106, abr. 2005.

ROSILLO-CALLE, F.; ROTHMAN, H.; ROCHA, J. D. UNICAMP. **Uso da Biomassa para Produção de Energia na Indústria Brasileira.** Campinas, SP. Editoria UNICAMP, 1ª Edição - 2008 , 448 p.

SÁNCHEZ, C. G. (Org.). **Tecnologia da gaseificação de biomassa.** Campinas: Editora Átomo, 2010.

TAPPI, Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **T 204**: Solvent extractives of wood and pulp, 1997

TAPPI, Technical Association of the Pulp and Paper Industry. **T 222**: Acid-insoluble lignin in wood and pulp, 1998.

TELMO, C.; LOUSADA, J. **The explained variation by lignin and extractive contents on higher heating value of wood. Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 5, p. 1663-1667, maio 2011.

VAN LOO, S.; KOPPEJAN, J. **The handbook of biomass combustion and co-fired.** Earthscan, 2008.

VASCONCELLOS, P. C. et al. **Determinação dos hidrocarbonetos saturados e policíclicos aromáticos presentes no material particulado da atmosfera amazônica.** Química Nova, São Paulo, v. 4, n. 21, p.385-393, dez. 1997.

VASSILEV, S.; VASSILEVA, C.; VASSILEV, V. **Advantages and disadvantages of composition and properties of biomass in comparison with coal: An overview.** Fuel, Bulgaria, v. 158, p.330-350, mai. 2015.

VICENTE, E.D. et al. **Emission of carbon monoxide, total hydrocarbons and particulate matter during wood combustion in a stove operating under distinct conditions.** Fuel Processing Technology, Portugal, n. 131, p.182-192, nov. 2014.

WILLIAMS, A; JONES, J. M; MA, L.; POURKASHANIAN, M. **Pollutants from the combustion of solid biomass fuels.** Progress In Energy And Combustion Science, Leeds, v. 38, p.113-137, nov. 2011.

WILLMOTT, C.J. et al. **Statistics for evaluation and comparison of models.** Journal of Geophysical Research, Washington, v.0, n.C5, p.8995-9005, 1985.

YAO, Q. et al. **Reprint of: Studies on formation and control of combustion particulate matter in China: A review.** Elsevier: Energy, Beijing, p.4480-4493, 26 set. 2010.