



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

TATIANE MORITA OLIVEIRA

CONTROLE AMBIENTAL DOS GASES GERADOS NA QUEIMA DO
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Itapeva - SP
2016

TATIANE MORITA OLIVEIRA

**CONTROLE AMBIENTAL DOS GASES GERADOS NA QUEIMA DO
BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

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

Orientador: Prof. Dra. Juliana Esteves Fernandes Cieslinski

Itapeva - SP
2016

Oliveira, Tatiane Morita.
O482c Controle ambiental dos gases gerados na queima do bagaço de
cana-de-açúcar / Tatiane Morita Oliveira. -- Itapeva, SP, 2016.
43 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado – Engenharia Industrial Madeireira) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Itapeva, 2016

Orientadora: Juliana Esteves Fernandes Cieslinski

Banca examinadora: Marcos Tadeu Tibúrcio Gonçalves, Antonio Francisco Savi

Bibliografia

1. Biomassa. 2. Energia – Fontes alternativas. 3. Ar - Poluição. 4. Lavador venturi. I. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus Experimental de Itapeva. II. Título.

CDD 662.8

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela minha vida, e por me permitir gerar um anjo chamado Helena, que me transformou em uma pessoa melhor.

Aos meus pais, Edem e Maria Lúcia, por me apoiarem sempre, mesmo nas falhas, sempre me estendendo as mãos sem me deixar desistir, sem vocês não chegaria até o fim da minha graduação.

Aos meus irmãos Carina e Tiago pela amizade e companheirismo.

Ao meu companheiro Renato pela amizade, carinho e apoio, por ser este pai maravilhoso.

A minha orientadora Prof^ª. Dra. Juliana Esteves Fernandes Cieslinski, por toda a ajuda e paciência durante a construção deste trabalho.

Aos meus colegas de turma, pelas risadas e histórias ao longo destes cinco anos, levarei todos em minha memória. Em especial aos companheiros das gestões do centro acadêmico 2013 e 2014.

Ao CAENGIM e a Atlética da Unesp de Itapeva, pela melhor experiência que tive durante a graduação, todo o aprendizado será levado comigo por toda a vida.

Ao cursinho pré-vestibular Cuca-Fresca, agradeço pela preparação para o vestibular.

Aos professores por compartilharem seus conhecimentos , e por desenvolverem em mim um senso crítico.

A todos os técnicos e colaboradores da Unesp de Itapeva, em especial aos técnicos Brito, Juscelino e Franco que ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas Rafael, Valdiana e Ulysses que colaboraram com a parte experimental deste trabalho.

RESUMO

A cana-de-açúcar é um dos principais produtos da agricultura brasileira, seus derivados são essenciais para a economia do país. O etanol é um exemplo de que os combustíveis fósseis estão sendo substituídos pela biomassa, e esta troca não se restringe apenas para os automóveis, as indústrias também estão substituindo os combustíveis fósseis usados nas suas caldeiras pela biomassa. Entretanto a queima deste material ainda gera poluentes gasosos como, óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2). Este trabalho teve como objetivo realizar a amostragem e o controle destes poluentes gerados na queima do bagaço de cana-de-açúcar. Foram realizadas análises químicas imediatas e de poder calorífico do bagaço de cana-de-açúcar, a amostragem foi realizada com o amostrador de gases Eurotron, e o controle foi realizado com um lavador Venturi retangular. O teor de umidade do bagaço de cana-de-açúcar no momento da queima foi de 14,3% e seu poder calorífico superior (PCS) de 4.269 kcal/kg. As maiores concentrações de CO, CO_2 e NO_x foram respectivamente de 4000 ppm, 1,9% e 20 ppm. No controle, as máximas eficiências alcançadas foram, 56,1% para CO e 44,1% para CO_2 , ambos com a vazão de líquido de 1 L/min, e para NO_x foi de 25,5% com vazão de 0,8L/min. Desta forma podemos concluir que o bagaço de cana-de-açúcar pode ser usado como combustível para geração de energia, substituindo os combustíveis fósseis e beneficiando o meio ambiente.

Palavras-chave: Biomassa. Geração de energia. Poluentes. Lavador Venturi.

ABSTRACT

The sugarcane is one of the main products of Brazilian agriculture, their derivatives are essential for the country's economy. Ethanol is an example of that fossil fuels are being replaced by biomass, and this exchange is not restricted to the car industries are also gaseous fossil fuels used in its boilers for biomass. However, the burning of this material also generates gaseous pollutants such as nitrogen oxides (NO_x), carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO₂). This study aimed to carry out the sampling and control of these pollutants generated in the burning of sugarcane bagasse. immediate chemical analysis and calorific value of sugarcane bagasse were performed, the sampling was performed with the sampler EUROTRON gases, and control was carried out with a rectangular venturi scrubber. The moisture content of the sugarcane bagasse during burning was 14.3% and its gross calorific value (PCS) of 4,269 kcal / kg. The highest concentrations of CO, CO₂ and NO_x were respectively 4000 ppm, 1.9 ppm and 20%. In the control group reached the maximum efficiencies were 56.1% and 44.1% for CO to CO₂, both the liquid flow rate of 1 L / min, and NO_x was 25.5% with a flow rate of 0,8L / min. In this way we can conclude that sugar cane bagasse can be used as fuel for energy generation, replacing fossil fuels and benefiting the environment.

Keywords: Biomass. Power generation. Pollutants. Venturi scrubber.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. Poluição atmosférica	10
2.2 Biomassa	11
2.2.1 Fontes de biomassa	12
2.2.2 Biomassa agrícola: bagaço de cana-de-açúcar	13
2.3 Caracterização da Biomassa	14
2.3.1 Análise química imediata de uma biomassa	14
2.3.2 Poder calorífico de biomassa	16
2.4 Queima direta de biomassa	16
2.4.1 Poluentes emitidos com a queima direta da biomassa	18
2.5. Controle de gases da queima do bagaço de cana-de-açúcar	19
2.5.1. Trajetória do jato líquido na corrente gasosa	21
2.5.2. Eficiência de coleta de gases em lavador Venturi	22
2.5.3. Trabalhos sobre a eficiência de coleta de gases em lavador Venturi	22
3. MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1. Materiais	23
3.2. Caracterização da biomassa	24
3.2.1. Análise química imediata	24
3.2.1.1. Preparo da amostra	24
3.2.1.2. Teor de umidade	25
3.2.1.3. Teor de materiais voláteis	25
3.2.1.4. Teor de cinzas	26
3.2.1.5. Teor de carbono fixo	27
3.2.2. Poder calorífico superior	27
3.3. Amostragem e controle de gases poluentes emitidos com a queima do bagaço de cana-de-açúcar	28
3.3.1. Sistema de queima	28
3.3.2. Instrumento de amostragem	30
3.3.3. Sistema de controle	31
3.3.4 Método de controle	33

5. RESULTADO E DISCUSSÕES	33
5.1. Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar	33
5.2. Queima de biomassa – amostragem de gases	34
5.3. Queima da biomassa – controle de gases	37
6. CONCLUSÃO	38
7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1. INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica é umas das principais preocupações quando se trata de meio ambiente, já que afeta uma das nossas necessidades vitais, a respiração. E a forma mais correta de diminuir este impacto ambiental é reduzir os poluentes lançados na atmosfera.

Os automóveis com motor a combustão, são um dos grandes vilões, mas a indústria com suas caldeiras, na grande maioria queimando combustível fóssil por 24 horas por dia são grandes responsáveis por esta poluição atmosférica.

Os combustíveis fósseis usados na produção de energia através da combustão que ocorre nas caldeiras estão sendo substituídos por outros materiais, que possuem uma eficiência energética compatível à necessidade da indústria e ainda liberam uma quantidade menor de poluentes, estes materiais podem ser as biomassas.

A biomassa pode ser de origem agrícola, como, casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar, palha de milho, etc, ou pode ser de origem florestal, e da indústria madeireira como, cavacos, maravalha ou serragem de madeira, cascas, galhos, etc.

No caso do bagaço de cana-de-açúcar, a indústria sucroalcooleira utiliza o próprio bagaço, gerado no beneficiamento da cana-de-açúcar, como combustível para suas caldeiras, ou seja, vira um ciclo. E ainda ocorre a comercialização do excesso do resíduo que não foi utilizado, ou até a comercialização da própria energia elétrica produzida em excesso. Outra fonte ainda inexplorada e também promissora para fornecimento de combustível para caldeiras é o bagaço de cana-de-açúcar proveniente do processo de comercialização da garapa (caldo de cana) nas feiras livres das cidades. Trata-se de um resíduo normalmente sem destinação econômica e/ou ambientalmente adequada.

Portanto, este trabalho estudou o bagaço de cana-de-açúcar gerado na produção artesanal da garapa, em feiras de rua. Ele é produzido em quantidade menor do que a da indústria, e após o processo ele ainda se encontra na forma de bagaço inteiro, diferente da indústria que após o beneficiamento da cana, ele se encontra em forma de farelo.

Apesar de a biomassa liberar uma quantidade menor de poluentes durante a sua queima, ainda são adotadas algumas medidas para que se reduza ainda mais a concentração desses poluentes, então são usados equipamentos que fazem a limpeza desses poluentes, liberando para a atmosfera um ar mais “limpo”.

Um dos equipamentos que podem ser utilizados nesse procedimento de limpeza é o Lavador Venturi, ele como o nome já indica, “lava” o gás produzido na queima, o líquido injetado por orifícios capta os poluentes em suas gotículas, então o gás segue seu percurso até ser lançado na atmosfera, e os poluentes serão descartados com o líquido de lavagem.

O estudo desse processo de “lavagem do gás” se faz necessário, para que as propriedades que o influenciam sejam adaptadas de modo a conseguir a maior eficiência possível, e que assim o processo obtenha um resultado positivo.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a emissão e controle dos gases emitidos na queima do bagaço de cana-de-açúcar.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Poluição atmosférica

Com a evolução dos processos industriais, o aumento exponencial da população mundial e as suas crescentes necessidades de alimento, água transporte, o meio ambiente acaba sofrendo uma pressão significativa.

A sociedade pode ser comparada a uma coleção de organismos vivos, que necessita de energia para sobreviver. Adquirimos energia através dos alimentos, usamos esta energia para a realização de nossas atividades diárias, e conseqüentemente produzimos resíduos que devem ser descartados adequadamente. Estes resíduos podem contaminar o solo, as águas e o ar, o último assim como os demais é indispensável para nossa sobrevivência, com um ar poluído a vida de qualquer ser corre risco. Segundo Carvalho (2009) dentre as diversas formas de degradação ambiental, a poluição do ar atmosférico é uma das que mais prejuízos trazem à civilização, afetando a saúde humana, os ecossistemas e o patrimônio histórico cultural, assim como o clima. Os combustíveis fósseis são os

grandes vilões de todo esse processo de agressão ao meio ambiente.

Os combustíveis fósseis, utilizados em máquinas térmicas industriais e em veículos automotores, são grandes vilões de todo esse processo de agressão ao meio ambiente, pois com sua queima há o lançamento de uma grande quantidade de monóxido e dióxido de carbono (gás carbônico) na atmosfera.

Os poluentes atmosféricos podem ser classificados, devido a sua formação, em poluentes primários e secundários. Os primários são produzidos, por exemplo, nos motores dos automóveis e nos processos de queima industriais, onde os gases são liberados de forma direta pela fonte. Já os secundários são os poluentes formados por reações fotoquímicas que acontecem entre os poluentes primários na ¹troposfera, não são emitidos propriamente pela fonte. E, devido ao seu estado físico, podem ser classificados em material particulado e gases, o primeiro são substâncias de dimensões micro ou submicroscópicas, todavia maiores que as moléculas, que podem estar na forma líquida ou sólida na atmosfera, e os gases se encontram na forma molecular. (LORA,2002).

2.2 Biomassa

A biomassa pode ser uma alternativa para substituir os combustíveis fósseis de reservas finitas como o petróleo e o gás natural. É toda matéria orgânica capaz de gerar, direta ou indiretamente, alguma forma de energia. Ou seja, a biomassa pode ser retirada de vegetais não lenhosos ou lenhosos, como por exemplo, a madeira e seus respectivos resíduos, e também pode-se obtê-la dos resíduos urbanos, industriais e agrícolas (CORTEZ; LORA; GOMÉZ,2009).

Segundo Marabezi (2009) as mudanças climáticas ocorridas no planeta e a escassez dos combustíveis fósseis deram início a uma série de estudos voltados à produção de energias renováveis, que façam uso dessa matéria orgânica de origem vegetal ou animal, conhecida como biomassa. O seu uso pode ocorrer da forma bruta ou pelos seus subprodutos. Esta matéria é renovada através do ciclo de carbono, onde as plantas absorvem o gás carbônico da atmosfera e o incorporam em suas moléculas através da fotossíntese. Diversos resíduos podem e já são

¹ Troposfera= camada atmosférica mais próxima da superfície terrestre situada de 10 km a 12km de altitude, na qual a temperatura decresce rapidamente com a altitude e se formam as nuvens e as correntes de convecção

utilizados como fonte de biomassa para produção de energia. A energia dos resíduos agrícolas e florestais, por exemplo, que é acumulada na fotossíntese, pode ser utilizada, posteriormente, numa eventual queima para produção de energia.

Os biocombustíveis, produzidos a partir de produtos agrícolas e resíduos agrícolas, como o etanol, o biodiesel e o bioetanol, estão sendo alternativas muito utilizadas, principalmente no Brasil, para suprir a necessidade de consumo dos automóveis (MARABEZI, 2009).

O uso da biomassa no Brasil apresenta certas vantagens como: variar a matriz energética nacional diante da dependência externa de combustíveis como petróleo e gás natural, contribuir com o desenvolvimento do país mediante a utilização de mão de obra local, principalmente no Norte e Centro-oeste do país, e também a menor emissão de gases poluentes que contribuem com o efeito estufa, quando comparada a combustíveis fósseis (GENOVESE; UDAETA; GALVAO, 2006).

O Brasil ocupa uma posição de destaque na geração mundial de bioenergia, entretanto ainda está atrás de outras nações quando se diz respeito ao aproveitamento de resíduos de biomassa. “É necessário fazer muitas inovações neste setor, para garantir eficiência na geração”, explica o pesquisador da Embrapa Agroenergia José Dilcio Rocha, (Revista da Madeira- Guia de biomassa, Edição especial - 2014).

2.2.1 Fontes de biomassa

a) Resíduos agrícolas

Estes resíduos são produzidos no campo e resultam da colheita agrícola. Basicamente são as palhas, cascas e folhas que ficam após a colheita do produto principal. O Brasil é um grande produtor agrícola, e conseqüentemente um grande produtor de resíduos, que são parcialmente aproveitados para geração de energia. A parte que sobra é destinada a produção de ração animal e fertilizante, bem como em áreas médicas.

Alguns exemplos deste tipo de resíduo são o café, a cana-de-açúcar, o arroz, a soja, o milho, etc

b) Resíduos Urbanos

São os resíduos de origem domiciliar, gerados em residências, e os comerciais gerados em pequenos comércios e nos empreendimentos de pequeno e médio porte.

c) Resíduos Industriais

São os provenientes do beneficiamento de produtos florestais e agrícolas, como por exemplo, as cascas e cavacos gerados no beneficiamento das toras, as cascas geradas no beneficiamento do arroz, e do café, etc.

2.2.2 Biomassa agrícola: bagaço de cana-de-açúcar

O Brasil é o número um na produção de cana-de-açúcar do mundo, sendo utilizada principalmente para produzir açúcar e álcool combustível.

Cultiva-se cana no Norte-Nordeste e no Centro-Sul do país, permitindo assim dois períodos de safra ao decorrer do ano. O clima quente, as chuvas do verão e o céu limpo no inverno fazem com que a estrutura das fibras da cana se fortaleça durante seu crescimento e o açúcar se fixe nos seus colmos. Em sua composição há uma capa que cobre e protege o talo, a epiderme, funcionando como impermeabilizante; uma casca, que por sua vez sustenta a planta e protege o talo de possíveis danos causados pelo meio externo, e um o tecido parenquimático que fica no interior do talo e armazena o suco açucarado. (MARABEZI, 2009 e ROSILLO-CALLE; V.BAJAY; ROTHMAN, 2008).

Segundo Cortez, Lora e Gómez (2008), durante o processo de produção de açúcar principalmente na moagem para extração do caldo, resultam um resíduo conhecido como bagaço. Este bagaço pode ser usado na geração de vapor para produção de energia que será usada na própria indústria ou ainda na hidrólise para geração de álcool ou ainda, na produção de ração animal.

O bagaço da cana-de-açúcar é constituído por um conjunto de fragmentos heterogêneos, sua granulometria depende da moagem e da variedade da cana. Há no Brasil 112 variedades de cana, segundo Novacana (2016) Na safra de 2014/15, 69% de toda cana plantada no Brasil são variedades RB. Segundo o Catálogo

Nacional da RIDESA (Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro) de 2010, existem mais de 70 variedades RB no nosso país.

A utilização do bagaço de cana-de-açúcar também apresenta uma evolução na questão ambiental a medida que vem sendo usado como combustível na produção de energia para a indústria, substituindo os combustíveis fósseis e colaborando com a redução dos gases responsáveis pelo efeito estufa (Meneguello e Castro, 2007).

Historicamente o bagaço é usado como combustível nas usinas, substituindo a lenha. Com a introdução das caldeiras na indústria, o uso de vapor no processo, a cogeração de energia, o bagaço teve uma valorização como fonte de energia nas indústrias de açúcar a álcool (CORTEZ; MAGALHÃES; HAPPI, 1992).

Apesar de se emitir carbono na fase da queima do bagaço, para geração de energia elétrica, ocorre o sequestro do carbono durante o crescimento da cana, isso faz com que o balanço final de emissões seja nulo. Assim os créditos de carbono, que foram estabelecidos no Protocolo de Kyoto são obtidos para as indústrias que realizarem esta troca para um combustível com menor emissão de gases poluentes (MANEGUELLO; CASTRO,2007).

2.3 Caracterização da Biomassa

Para se determinar a eficiência de uma biomassa como combustível e os compostos gerados com a sua queima, deve se conhecer suas características químicas e térmicas fundamentais que são a umidade, os materiais voláteis, as cinzas e o carbono fixo, determinados por análise química imediata e o poder calorífico, determinado com auxílio de um calorímetro (CORTEZ; LORA; GOMEZ,2008).

2.3.1 Análise química imediata de uma biomassa

A composição imediata de uma biomassa é o conteúdo em porcentagem de massa de materiais voláteis (MV), cinzas (CZ), carbono fixo (CF) e umidade (U).

a) Umidade

Segundo Nogueira (2008) a umidade pode ser definida como sendo a massa de água contida na biomassa e pode ser expressa em base úmida (bu) ou em base seca (bs).

O teor de umidade é inversamente proporcional ao poder calorífico da biomassa, e, além disso dificulta a queima, aumentando o consumo do combustível, do volume de produtos de combustão, indesejáveis como gases poluentes e material particulado, das perdas de calor e da potência necessária do exaustor para aspirar a fumaça produzida, (GONÇALVES, 2013 e BRAND, 2010).

b) -Materiais voláteis

São os gases produzidos na pirólise (decomposição térmica de matéria orgânica na ausência de oxigênio) da biomassa. O teor de materiais voláteis determina a facilidade de ignição na queima dos sólidos e assim determina a estabilidade da chama na combustão. Quanto maior o teor de voláteis maior será a velocidade de queima e menor a estabilidade da chama (CORTEZ; LORA; GOMÉZ, 2008).

Quanto à sua relação com o poder calorífico da biomassa, segundo Cieslinski (2014), quanto maior o teor de materiais voláteis, maior será o poder calorífico.

c) Cinzas

As cinzas são os resíduos gerados na combustão a altas temperaturas e compostas por óxidos que normalmente se apresentam no estado sólido à temperatura ambiente. Elas podem ter diversas origens no combustível, como estarem na estrutura molecular do combustível como elementos metálicos e semi metálicos, serem fragmentos de argila, sais, areia que podem estar na biomassa, ou serem fragmentos do solo que são misturados a biomassa no processo de colheita e/ou manuseio. (RENDEIRO; NOGUEIRA, 2008).

Segundo Lewandowski e Kicherer (1997) a presença de resíduos interfere negativamente na transferência de calor, ou seja, no poder calorífico, então as cinzas devem ser retiradas manualmente. As altas concentrações de cinzas na biomassa podem diminuir o poder calorífico e causar perdas de energia.

d) Carbono fixo

Corresponde à massa restante após a liberação dos materiais voláteis, ignorando as cinzas e a umidade (MCKENDRY,2002).

2.3.2 Poder calorífico de biomassa

Pode ser definido como a quantidade de energia em forma de calor no processo de combustão completa de um combustível. Pode variar de acordo com o teor de umidade do material. Podem ser definidos o PCS (poder calorífico superior) e o PCI (poder calorífico inferior), a diferença entre eles é a energia exigida para evaporar a umidade existente no combustível e a água de formação obtida a partir da oxidação do hidrogênio do combustível (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

Resultados de poderes caloríficos observados para a mesma biomassa estudada neste trabalho, obtidos por Sanchez (2010) e Marcondes (2015), estão demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados obtidos por diferentes autores, da análise química imediata e PCS do bagaço de cana-de-açúcar.

Referências	PCS (kcal/kg)	TU (%)	MV (%)	CZ (%)	CF (%)
SANCHEZ, 2010	3.989	6,4	86,4	4,4	9,2
MARCONDES, 2015	3.872	15,1	75,4	7,94	16,6

Fonte: (Sanchez, 2010); (Marcondes, 2015).

2.4 Queima direta de biomassa

O processo de queima direta (combustão direta) pode ser descrito como sendo uma reação exotérmica rápida entre o combustível e o oxidante, acompanhada por liberação de calor. (CARVALHO JR; MCQUAY, 2007).

Segundo Williams et al. (2012) a combustão da biomassa fundamenta-se em seis etapas como mostra o Quadro 1.

Quadro 1 – Etapas da combustão de biomassa

1) Biomassa úmida	→	aquecimento e secagem	→	biomassa seca
2) Biomassa seca	→	voláteis (gases + alcatrão) + carvão		
3) Voláteis + ar	→	CO + CO ₂ + hidrocarbonetos não queimados + fuligem + aerossóis inorgânicos		
4) Carvão + ar	→	CO + CO ₂		
5) Voláteis (N, S, K, etc.)	→	poluentes baseados em N, S, K		
6) Carvão (N, S, K, etc.)	→	poluentes baseados em N, S, K		

Fonte: Williams et al., 2012

Segundo Simoneit (2002) o processo de combustão também pode ser descrito da seguinte maneira: a se aquecer a biomassa os seus respectivos componentes começam a hidrólise, a oxidação, a desidratação e pôr fim a pirólise. Voláteis com o alcatrão e o carvão são formados com o aumento da temperatura. Os produtos da decomposição da celulose, hemicelulose e lignina acompanhados das resinas e do vapor de água, são retirados ocorrendo uma combustão tanto incompleta como completa na zona de chama. A carbonização ocorre constantemente na fase de chama até que o combustível possua volume menor do que o necessário para se propagar uma chama.

Já Rabelo (2003) descreve a combustão, através da classificação visual do processo de combustão, em relação a presença ou não de chama, em três etapas:

— Fase de ignição: apenas parte do material é tomado pela chama intensa, é o início da combustão;

— Fase de chama: quase todo combustível está em chamas, verifica-se a

queima predominante de material volátil;

— Fase de incandescência: ocorre a carbonização do material virgem, com ausência de chama, presença de fumaça e brilho visível.

2.4.1 Poluentes emitidos com a queima direta da biomassa

A utilização da biomassa com o combustível apresenta inúmeras vantagens, mas também há precauções que devem ser tomadas para que isso não prejudique o ambiente (SOARES,1995).

Aproximadamente 80% da combustão da biomassa ocorre nos trópicos, com a maior fonte de produção de gases de efeito estufa e de material particulado, produzindo então espécies químicas que alteram o pH da água da chuva, afetando o balanço térmico da atmosfera interferindo na quantidade de radiação do sol que reflete para o espaço (ARBEX et al.,2004).

Como visto anteriormente a queima da biomassa se processa em três estágios: ignição, combustão com chama e combustão com ausência de chama. A partir do segundo estágio (fase de chama) a combustão ocorre com maior eficiência (combustão completa) e há então a emissão de CO_2 , H_2O , NO_x e SO_2 . O terceiro estágio (fase de incandescência) ocorre com baixa temperatura e ausência de chama, com liberação de grandes volumes de compostos oxidados incompletamente como CO , CH_4 e outros hidrocarbonetos. (ARBEX et al.,2004).

a) Poluentes advindos da queima do bagaço de cana-de-açúcar

Os poluentes formados com a combustão do bagaço de cana-de-açúcar são os NO_x , o CO e o CO_2 .

França et al. (2012) determinaram a liberação de alguns gases e material particulado durante a queima da cana-de-açúcar, foram estimados a partir de medições contínuas das respectivas concentrações aos fatores de emissão de CO_2 , CO , NO_x e hidrocarbonetos não queimados (HNC), sendo realizadas em laboratório. Concluiu-se que durante a fase de chama uma maior quantidade de compostos tais como CO_2 e NO_x foram gerados, e outros compostos como o CO e o HNC, tiveram maior concentração na fase de incandescência.

Cieslinski (2014), observou durante a combustão do bagaço de cana-de-

açúcar com 10,5% de umidade, a liberação de CO, CO₂ e NO_x, sendo estes os principais gases emitidos na queima deste material. Através do equipamento Unigas 3000+, foram observadas as maiores concentrações de CO observadas nas fases de chama e de incandescência foram de 271 ppm e 291 ppm, respectivamente. As concentrações de CO₂ atingiram valores máximos nas fases de chama e incandescência de 1,2% e 1,3%, respectivamente. A curva de concentrações de NO_x foi muito similar à de CO₂.

No trabalho de Amaral et al. (2013) foram observados gases poluentes gerados durante a queima experimental do bagaço de cana-de-açúcar com teor de umidade de 21%. Foi utilizado para realizar a amostragem o, UNIGAS 3000 MKIII . As concentrações máximas encontradas para CO₂, CO, NO_x foram de 2,34%, 1.356 ppm e 17 ppm, respectivamente.

Marcondes (2015) realizou a queima de bagaço de cana com diferentes teores de umidade e observou a liberação de CO, CO₂ e NO_x. As emissões de CO foram analisadas com o amostrador Eurotron, para os teores de umidade de 8,5%, 15,09% e 37,26%, e os valores obtidos foram respectivamente de 228,78 ppm, 298,96 ppm e 974,3 ppm. Observando então maior concentração do poluente quando a biomassa apresentava um maior teor de umidade. As emissões de CO₂ e NO_x são maiores com o teor de umidade de 8,5%.

2.5. Controle de gases da queima do bagaço de cana-de-açúcar

O controle dos gases provenientes da queima do bagaço de cana-de-açúcar pode ser realizado por um lavador de gases.

O lavador de gases é um dispositivo que tem a função de separar particulados ou poluentes gasosos de uma corrente gasosa, através de uma lavagem desta corrente com água que é injetada em forma de gotas e jatos (LORA, 2002).

De acordo com THEODORE e BUONICORE (1998) os lavadores se classificam em três classes, lavadores de torres de nebulização, lavadores de instalações de leito empacotado e lavadores Venturi.

O lavador Venturi é um dos mais eficientes na remoção de partículas respiráveis e controle de gases poluentes, eles são lavadores com atomização líquida “spray”, e poder ter a seção transversal circular ou retangular.

O líquido de lavagem é introduzido normalmente na garganta (Figura 1), forma-se então uma espécie de chuva no interior do equipamento, esta chuva é responsável por lavar o gás com os poluentes. As gotas contendo o poluente são posteriormente separadas do gás através de um ciclone.

Figura 1: Representação esquemática do lavador Venturi



Fonte: (Guerra,2009)

- a) Seção convergente: acontece a entrada da corrente de gás contaminada com particulados e a aceleração do gás.
- b) Garganta: o gás alcança sua maior velocidade que pode variar de 50 a 90 m/s, geralmente é neste local que ocorre a injeção do líquido usado na lavagem, este líquido pode ser a água ou algum outro que reaja com o contaminante do gás. A alta velocidade que o líquido entra na garganta faz com que ele seja atomizado e se formem gotas que variam de 10 a 500µm, estas gotas são arrastadas com o gás e coletam as partículas de contaminantes com o impacto inercial já que a velocidade do gás é superior a das gotas.
- c) Difusor: as gotas contendo as partículas e a corrente de gás são então desaceleradas, ficando com velocidades bem próximas. Então um separador centrífugo irá separar as gotas da corrente gasosa liberando apenas o ar limpo para a atmosfera.

2.5.1. Trajetória do jato líquido na corrente gasosa

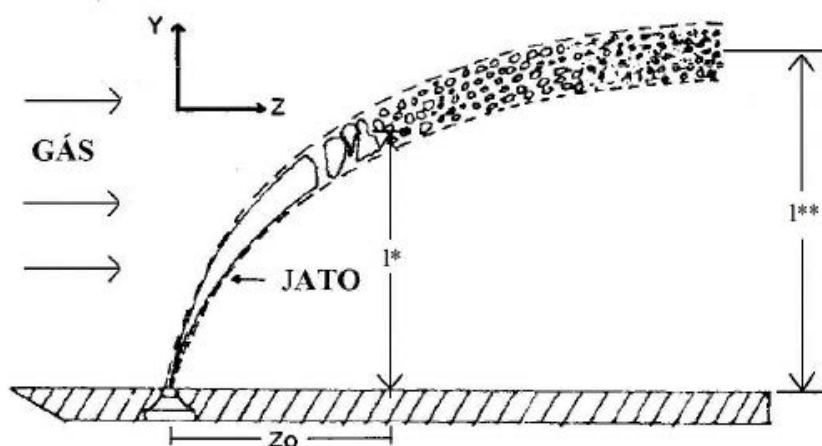
O líquido que fará a limpeza do gás em um lavador Venturi é introduzido através de pequenos orifícios que estão no início da garganta do lavador. Ao passar por estes pequenos pontos de injeção o líquido toma forma de um jato, que no início é transversal à corrente do gás e depois sofre uma curvatura devido a força de arraste que ele sofre. O jato é líquido e contínuo, mas as gotas são formadas rapidamente, estas gotas são formadas por atomização, e são elas as responsáveis por coletar os poluentes da corrente gasosa.

A eficiência de coleta de um lavador Venturi pode ser influenciada por vários fatores como, a penetração do jato líquido e as respectivas características das gotas formadas, como a distribuição e a uniformidade, além da fração de líquido nas paredes do lavador (GUERRA, 2009).

A penetração do jato depende de alguns fatores, tais como as propriedades físicas do gás e do líquido, a velocidade relativa do jato e da velocidade do gás (COSTA, 2002).

A figura abaixo mostra a trajetória de penetração do jato, sendo: l^* a penetração do jato e, l^{**} a máxima penetração na linha central do jato. O jato segue uma trajetória sem perder massa, até o ponto de coordenadas z_0 e l^* onde é atomizado (Viswanathan et al., 1983 *apud* Costa, 2002).

Figura 2- Trajetória de penetração do jato líquido



Fonte: (Viswanathan et al., 1983 *apud* Costa, 2002).

2.5.2. Eficiência de coleta de gases em lavador Venturi

Segundo Lora (2002), a eficiência de coleta de um lavador Venturi pode ser definida quando se dispõe de resultados de medições da concentração de partículas na sua entrada e saída, conforme a Equação 1:

$$E = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

E = eficiência de coleta de material particulado (%)

C_i = concentração na entrada (µg/m³)

C_f = concentração na saída (µg/m³)

2.5.3. Trabalhos sobre a eficiência de coleta de gases em lavador Venturi

No estudo realizado por Silva et al, 2014, foi feito o controle dos gases emitidos na queima da biomassa florestal, usando o lavador do tipo Venturi e o amostrador Eurotron (Ecoline 4000). Observou-se a redução da concentração de CO e CO₂ com o aumento da vazão de líquido com uma eficiência máxima de 96,69% e 92,12% respectivamente, que foram alcançadas com uma vazão de 1 L/min. A concentração de NO_x também diminuiu com o aumento da vazão de líquido, atingindo uma eficiência máxima de 97,14% para uma vazão de 0,8 L/min.

Dias et al. (2007) realizaram a coleta de material particulado coletado na queima de biomassa florestal e injetado por um gerador de pó no sistema de amostragem, utilizaram três vazões de líquido na garganta do lavador (0,4;0,6 e 0,8 L/min) e com três velocidades de gás no duto (20,22 e 24 m/s).E também foram verificadas duas situações: com 1 orifício de injeção do líquido e com 2 orifícios (perpendiculares entre si). Observou-se então que na velocidade de 24 m/s com 1 orifício, e vazão aumentada de 0,6 para 0,8 L/min, a eficiência diminuiu devido ao fato de que a vazão maior formou-se um filme líquido na parede do lavador, além disso se concluiu que nas três velocidades e com 2 orifícios de injeção de líquido as

eficiências são superiores à de 1 orifício.

Silva et al. (2008), analisaram o desempenho de dois lavadores Venturi um de geometria retangular e um circular, para o coleta de material particulado na queima de biomassa madeirável, utilizando três vazões de líquido (0,4;0,6 e 0,8 L/min) e duas velocidades da corrente gasosa (20 e 22 m/s), sendo a garganta do lavador de 90 mm de comprimento. Concluíram que ao se aumentar a velocidade do gás a eficiência do lavador também aumentava (alguns valores obtidos acima de 98%), devido à maior atomização da água nos lavadores. As maiores eficiências foram obtidas no lavador de geometria retangular devido à maior turbulência causada no interior da garganta do mesmo, sendo o maior valor de 98,23 %, e o menor valor de eficiência foi encontrado num lavador de geometria circular com o valor mínimo de 96,32%.

Ribeiro (2005) realizou um experimento onde foi analisado o efeito da penetração do jato na eficiência global de coleta de material particulado, utilizando três vazões de líquido num lavador Venturi com 1,3, ou 5 orifícios. A penetração do jato foi maior na configuração de apenas 1 orifício, obtendo então uma maior eficiência. Nas configurações com 3 e 5 orifícios, a penetração do jato diminuiu deixando a área debaixo da garganta desprovida de líquido de limpeza, e conseqüentemente obteve-se uma eficiência menor comparada com a configuração de 1 orifício.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo serão descritos os métodos utilizados na caracterização da biomassa de bagaço de cana-de-açúcar, bem como os equipamentos e instrumentos usados na amostragem do material e no controle ambiental dos gases poluentes emitidos com a sua queima.

3.1. Materiais

Foi utilizado o bagaço de cana-de-açúcar (Figura 3), resíduo da comercialização do caldo (garapa) em feira livre da cidade de Itapeva-SP.

Figura 3 – Bagaço de cana-de-açúcar



Fonte: Própria autora

3.2. Caracterização da biomassa

O bagaço de cana-de-açúcar foi caracterizado através de análise química imediata, sendo determinados os teores de umidade, de materiais voláteis, de cinzas e de carbono fixo e também através de seu poder calorífico superior.

3.2.1. Análise química imediata

Os procedimentos utilizados na análise química imediata foram baseados na norma ASTM E-870-82(2013) “Análise Imediata para Biomassa e Resíduos”, baseadas nas normas ASTM D-3172-13 “Prática padrão para análise de carvão e coque”, D-3173-11 “Análise de umidade para carvão e coque”, D-3174-12 “Análise de cinzas para carvão e coque”, D-3175-11 “Análise de materiais voláteis para carvão e coque”.

3.2.1.1. Preparo da amostra

As amostras foram retiradas de um lote de bagaço de cana-de-açúcar produzido na feira livre do Parque São Jorge no município de Itapeva-SP. O material

foi moído e peneirado, com passagem pela peneira de 20 mesh e retenção na peneira de 60 mesh. Foram utilizadas duas amostras do material para cada análise (análise em duplicata), e posteriormente calculadas uma média aritmética.

3.2.1.2. Teor de umidade

O método utilizado neste trabalho para se obter o teor de umidade da biomassa foi baseado em uma estufa de laboratório, que consiste em deixar a amostra úmida (μ), preparada conforme o item 2.2.1.1., por 24 horas a $103\pm 2^\circ\text{C}$ em uma estufa de laboratório, com a determinação da sua massa seca (m_s).

A Equação (2) foi utilizada para determinação do teor de umidade.

$$U(\%) = \frac{\mu - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

μ = massa úmida da amostra, g

m_s = massa seca da amostra, g

U (%) = teor de umidade em base seca

3.2.1.3. Teor de materiais voláteis

O teor de materiais voláteis foi estimado com o uso de uma mufla que foi previamente aquecida a $650\pm 2^\circ\text{C}$, onde foram colocados na porta do forno os dois cadinhos com o auxílio de um suporte, sendo que os mesmos estavam tampados contendo a amostra de bagaço de cana-de-açúcar seca (m_s). Após aproximadamente 4 minutos os cadinhos ainda tampados foram colocados no interior da mufla por mais 6 minutos, após este tempo foram retirados e colocados

em um dessecador. Após aproximadamente 1 hora foi determinada a massa da amostra utilizando uma balança analítica (mf).

A Equação (3) foi utilizada para determinação do teor de voláteis.

$$MV (\%) = \frac{ms-mf}{mi} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

ms= massa seca da amostra, g

mf=massa final da amostra, g

MV (%)= teor de materiais voláteis

3.2.1.4. Teor de cinzas

Para determinação do teor de cinzas foi utilizada a mesma mufla usada na determinação do teor de materiais voláteis, a mesma foi aquecida até 750°C, foram então colocados dois cadinhos contendo amostra de bagaço de cana-de-açúcar (sem tampa) em seu interior (ms). Após um período de 6 horas os cadinhos foram retirados da mufla e colocados em um dessecador pelo período aproximado de 1 hora, após o resfriamento foram pesados em balança analítica (mr).

A Equação (4) foi utilizada para o cálculo do teor de cinzas

$$CZ(\%) = \frac{mr}{ms} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

mr = massa do resíduo, g

ms = massa seca da amostra, g

CZ (%) = teor de cinzas

3.2.1.5. Teor de carbono fixo

O teor de carbono fixo é uma medida indireta e pode ser calculado através da Equação (5):

$$CF(\%) = 100 - (MV + CZ) \quad (5)$$

Onde:

CF (%) = teor de carbono fixo

MV (%) = teor de materiais voláteis

CZ (%) = teor de cinzas

3.2.2. Poder calorífico superior

O poder calorífico superior (PCS) do bagaço de cana-de-açúcar foi determinado através de um calorímetro (Figura 4 (a)) contendo uma bomba calorimétrica (Figura 4 (b)). O procedimento foi feito em duplicata, foi determinado o PCS de duas amostras e posteriormente calculada uma média entre os valores.

Aproximadamente 0,5 g de amostra moída foi colocada em um cadinho de quartzo, este por sua vez foi introduzido na bomba calorimétrica. No reservatório da bomba foi acrescentado água destilada e oxigênio a pressão de 30 bar (cilindro com 99,9% de pureza). Foi então conectado um fio de algodão em um fio de níquel (ligação entre os dois eletrodos responsáveis por conduzir eletricidade) para que a eletricidade fosse transformada em faísca e causasse a ignição da amostra quando em contato com o oxigênio. A bomba foi vedada e introduzida na cápsula localizada

dentro do sistema calorimétrico. Esperou-se cerca de 5 minutos para a leitura do PCS dada diretamente na tela do sistema calorimétrico.

Figura 4 – Análise de poder calorífico: (b) bomba calorimétrica; (a) calorímetro



(b)



(a)

Fonte: Própria autora.

3.3. Amostragem e controle de gases poluentes emitidos com a queima do bagaço de cana-de-açúcar

Para cada queima foi realizada uma análise imediata preliminar do bagaço, onde foi determinado seu teor de umidade, materiais voláteis, cinzas, carbono fixo e seu poder calorífico superior todos em duplicata com cálculo por média aritmética.

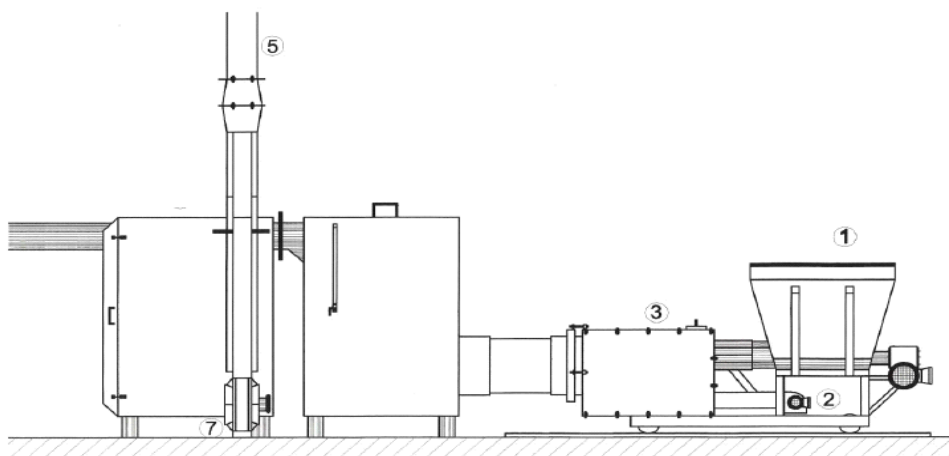
3.3.1. Sistema de queima

As queimas deste trabalho foram realizadas num sistema composto principalmente por um alimentador e um queimador de biomassa, além de outros equipamentos auxiliares. O alimentador funciona com uma rosca sem fim acoplada, assim que o alimentador era abastecido manualmente e completava sua capacidade volumétrica a rosca era acionada e a biomassa conduzida até o queimador (Figura

6), até o momento em que todo o material do alimentador fosse consumido e ele pudesse ser abastecido novamente.

O queimador de biomassa (Biodragão da MDL Ambiental modelo MDL90 MRD) possui um ventilador que mantém a chama acesa, espalhando o fogo para a saída da mesma. Existe um sistema de controle de vazão do ar para que ocorra a manutenção da queima, além de possuir uma grelha em seu interior que distribui o ar gerado pelo ventilador, uma porta lateral para manutenções e um cinzeiro para recolhimento de resíduos. Este conjunto acomoda uma chama com temperatura entre 800 e 1200°C. Dados técnicos do queimador: altura de 1,3 m, largura de 0,8 m, comprimento de 2,2 m, produção de energia de 315000 kcal/h (potência de 0,36 MW), consumo de biomassa de 90 kg/h, produção máxima de vapor de 400 kg/h e capacidade de armazenamento de biomassa de 0,3m³

Figura 5 – Desenho esquemático do sistema de queima de biomassa



Fonte: Eng. Anderson de Jesus R. Martins

Onde:

1 = alimentador de biomassa (com rosca sem fim)

5 = chaminé

2 = controlador de ar de alimentação

7 = soprador

3 = queimador de biomassa

Figura 6 – Sistema de queima de biomassa – queimador ligado a um alimentador

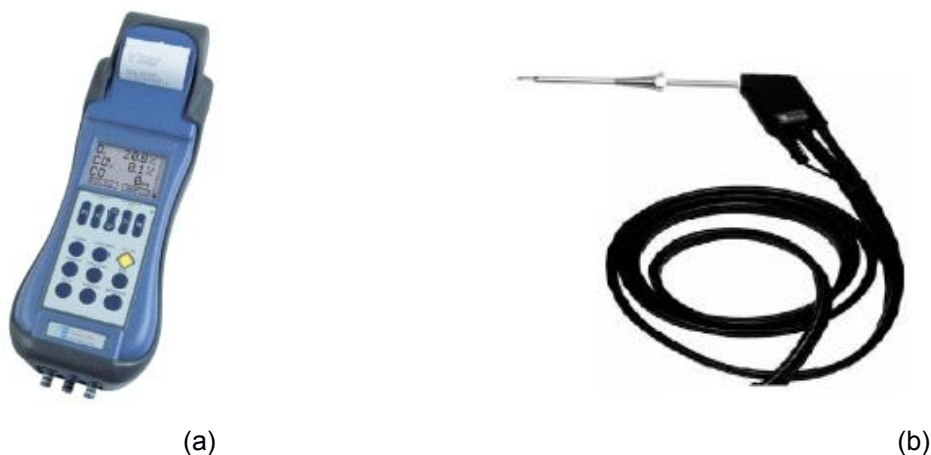


Fonte: Própria autora

3.3.2. Instrumento de amostragem

O instrumento usado na amostragem dos gases foi o *Unigas 3000+* da *Eurotron Instruments* (Figura 7 (a)), uma sonda (Figura 7 (b)) ligada ao aparelho exerce a função de captar os dados no momento da amostragem. Este instrumento se baseia em um microprocessador com um analisador de gases, um monitor de emissões e um indicador de parâmetros ambientais. Seus sensores eletroquímicos 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). A temperatura do gás e do ar é usada juntamente com a análise de gás para calcular a eficiência, a concentração de CO_2 e o excesso de ar.

Figura 7 – Amostrador de gases UniGas 3000+ (a) e sonda de amostragem (b)



Fonte: Manual do UniGas 3000+

As especificações do equipamento *UniGas 3000+* da *Eurotron Instruments* encontram-se na Tabela 2:

Tabela 2: Especificações do Unigas 3000+

Gás	Faixa de medição
O ₂	0 a 25%
CO	0 a 8000 ppm
NO	0 a 4000 ppm
SO ₂	0 a 4000 ppm

Fonte: Manual do UniGas 3000+

3.3.3. Sistema de controle

O controle de gases poluentes emitidos com a queima do bagaço de cana-de-açúcar foi realizado usando um Lavador Venturi (Figura 8 (a)), um ciclone (Figura 8 (b)), ambos presentes no módulo experimental ilustrado na Figura (6).

Dimensões do lavador Venturi:

- Garganta: 0,035 m x 0,024 m x 0,117 m
- Seção divergente: 0,280 m x 0,035 m x 0,023 m
- Seção convergente: 0,099 m x 0,035 m x 0,023 m

Figura 8 – Módulo experimental de controle de gases: Lavador Venturi (a) e Ciclone (b)



(a)

Fonte: Própria autora



(b)

Fonte: Própria autora

3.3.4 Método de controle

A amostragem dos gases foi realizada antes da garganta do Venturi (concentração de entrada- C_i) e após o ciclone (concentração de saída – C_f).

Foram utilizados dois amostradores Unigas 3000+, que foram colocados, o primeiro antes do Venturi e o segundo depois do ciclone, para obter as medidas dos gases produzidos na combustão e do ar limpo após o passar pelos equipamentos de controle.

O líquido de lavagem usado foi a água com ($\rho=1000 \text{ kg/m}^3$) e a sua vazão foi medida com um medidor de fluxo. Foram usados 4 pontos de injeção de líquido, e seus respectivos diâmetros foram de 1 mm.

As medições realizadas posteriormente depois do ciclone, foram feitas com 5 vazões da água, sendo elas, 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 e 1 L/min.

Com os valores das concentrações de entrada (C_i) e de saída (C_f) amostradas nos testes foi possível calcular a eficiência global média (E) para a coleta de gases (Equação (4)) e as influências da vazão de líquido e da razão líquido gás (L/G) na mesma.

5. RESULTADO E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com a amostragem dos gases (CO , CO_2 e NO_x) produzidos com a queima do bagaço de cana-de-açúcar, e os resultados obtidos com o controle desses poluentes através do uso do lavados Venturi. Serão discutidos também os resultados obtidos na caracterização do bagaço, como: teor de umidade, materiais voláteis, cinzas e carbono fixo e poder calorífico superior.

5.1. Caracterização do bagaço de cana-de-açúcar

O bagaço de cana-de-açúcar foi previamente caracterizado quimicamente quanto a sua umidade (U), materiais voláteis (MV), cinzas (CZ), carbono fixo (CF), sendo este encontrado através de cálculo conforme a Equação (5), e

energeticamente quanto ao seu poder calorífico superior (PCS). Os resultados desta análise estão dispostos na tabela a baixo, juntamente com os encontrados por Sánchez (2010).

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

Referência	TU (%)	MV (%)	CZ (%)	CF (%)	PCS kcal/kg
Este trabalho	16,9	79,8	0,74	19,8	3263
Sánchez (2010)	6,4	86,4	4,4	9,2	3989

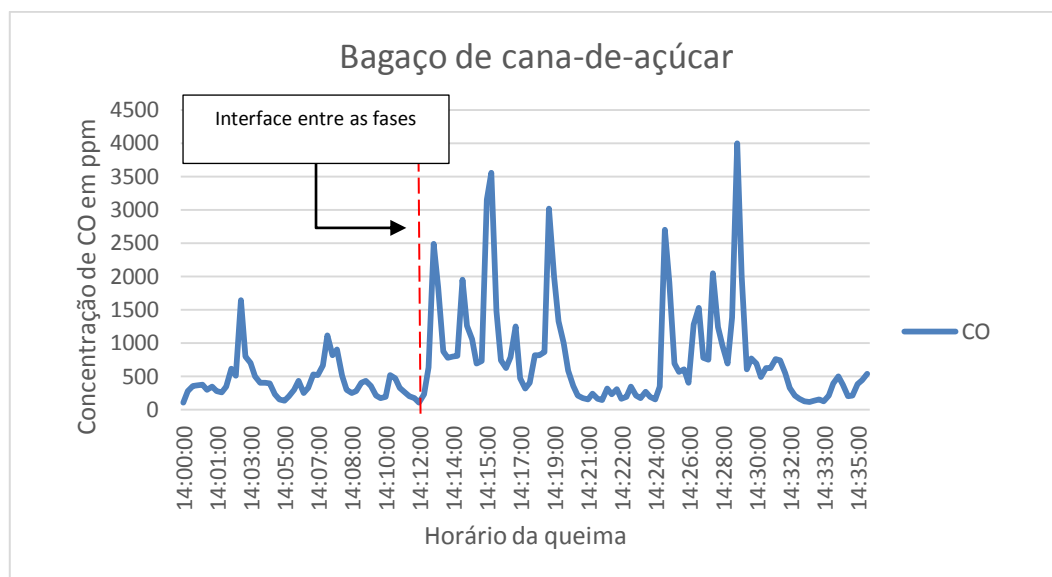
O poder calorífico do bagaço de cana-de-açúcar deste trabalho foi inferior ao encontrado por Sánchez (2010). Isso pode ser explicado pelo fato do teor de umidade deste trabalho ser superior ao do autor, já que o teor de umidade influencia negativamente na queima do material.

O teor de materiais voláteis segundo Klautau (2008), ao contrário da umidade influencia positivamente no poder calorífico da biomassa, ele aumenta a reatividade do material, assim o baixo valor de materiais voláteis encontrados neste trabalho, pode justificar o valor do PCS também ser inferior ao de Sánchez (2010).

5.2. Queima de biomassa – amostragem de gases

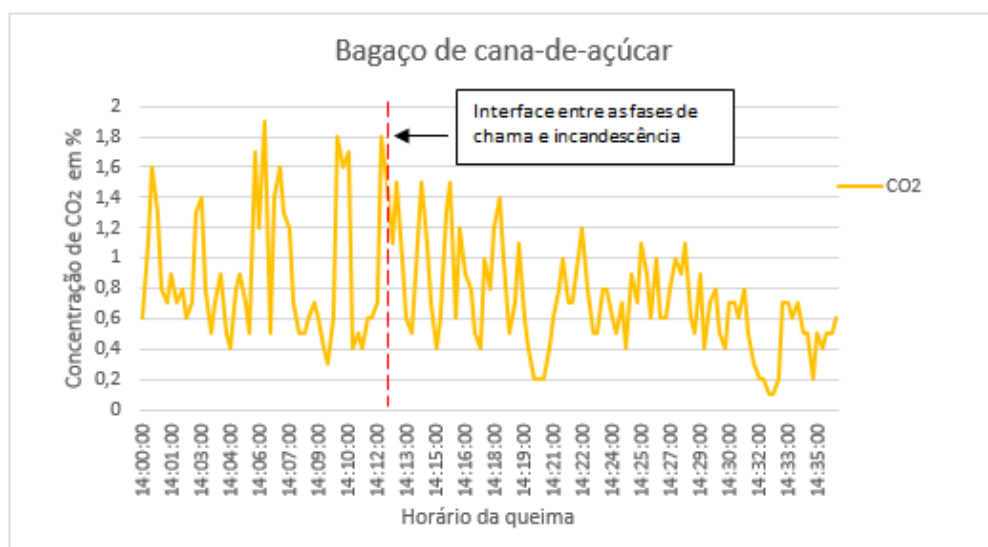
As emissões dos gases liberados na queima do bagaço de cana-de-açúcar foram amostradas como descrito no item 3.3. Conforme especificado anteriormente a amostragem foi realizada com o amostrador de gases Unigas 3000+, o teor de umidade do material queimado era de 14,3% e seu poder calorífico superior era 4.269 kcal/kg. As figuras 9, 10 e 11 mostram as concentrações de CO (ppm), CO₂ (%) e NO_x (ppm) emitidos com a queima de bagaço de cana-de-açúcar em função do tempo de queima.

Figura 9 – Concentração de CO em função do tempo de queima

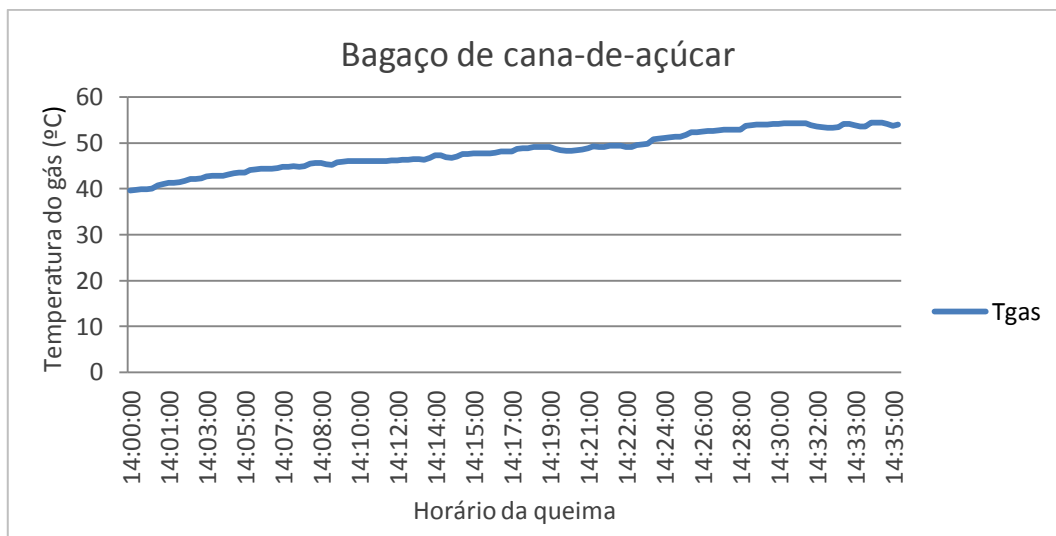


Fonte: Resultados sobre concentração de CO como função do tempo de queima.

As maiores concentrações de CO encontradas foram de 1.643 ppm na fase de chama e de 4000 ppm na fase de incandescência. Estes valores seguem o mesmo comportamento dos resultados encontrados por Soares Neto et al. (2011) confirmando a ideia de que a concentração de CO é maior na fase de incandescência do que na fase de chama.

Figura 10 – Concentração de CO₂ e temperatura do gás em função do tempo de queima

(a)

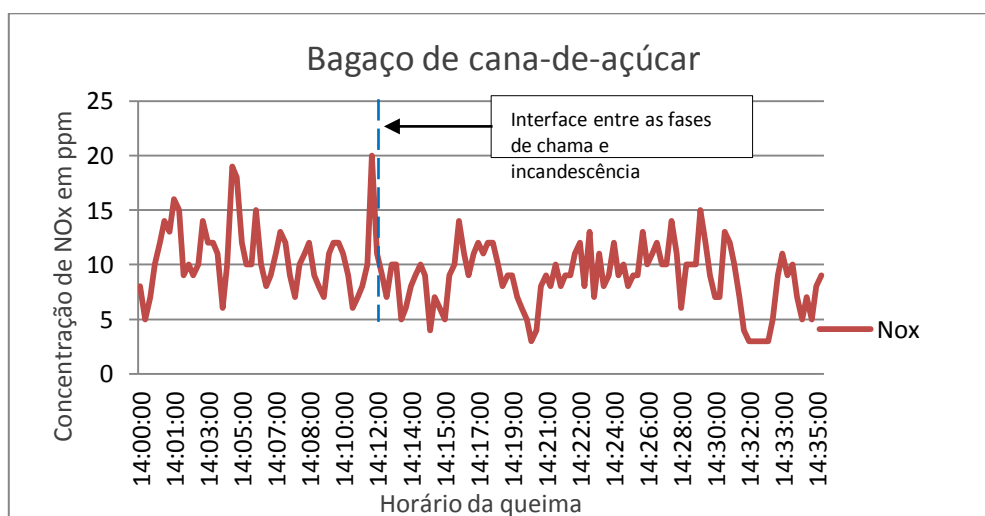


(b)

Fonte: Resultados da concentração de CO_2 , e da temperatura do gás em função do tempo de queima.

Soares Neto et al. (2011), observaram também que a concentração de CO_2 aumenta de acordo com o aumento da temperatura do gás, o que como pode-se observar na Figura 10 (a) e 10 (b), não ocorreu neste trabalho pois a concentração diminuiu ao longo da queima com o aumento da temperatura do gás. As máximas concentrações de CO_2 encontradas foram de 1,9 % na fase de chama e 1,5% na fase de incandescência.

Figura 11 – Concentração de NO_x em função do tempo de queima.



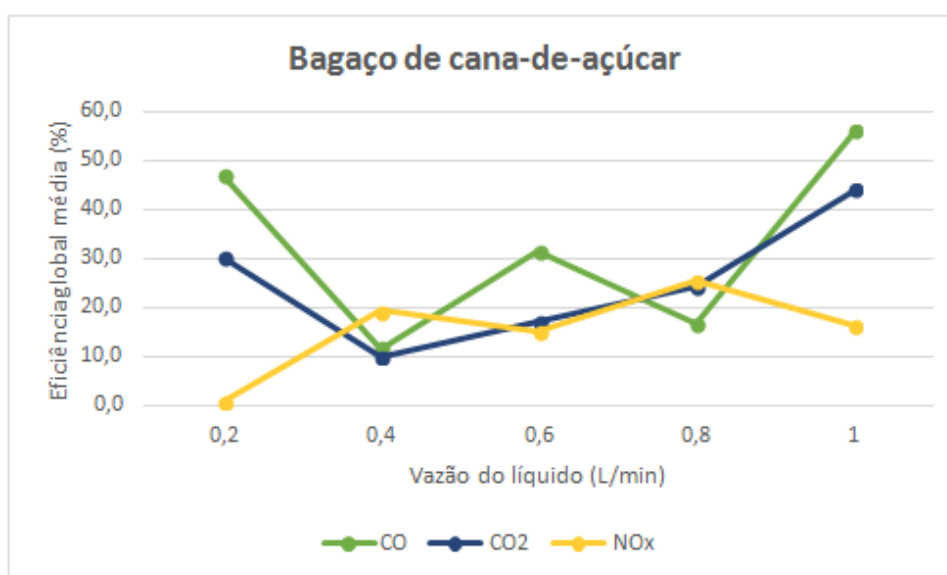
Fonte: Resultados da concentração de NO_x em função do tempo.

França et al. (2012) observaram que as máximas concentrações de NO_x foram encontradas na fase de chama da combustão, o que se confirma nos resultados mostrados no gráfico acima, onde a concentração máxima também ocorreu na fase de chama com valor de 20 ppm.

5.3. Queima da biomassa – controle de gases

O controle dos gases emitidos na queima do bagaço de cana-de-açúcar foi realizado como descrito no item 3.3. Os resultados de eficiência global média de coleta dos gases CO , CO_2 e NO_x (%) em função da vazão de líquido (L/min) encontram-se na Figura 12.

Figura 12 – Eficiência global média de coleta de gases em função da vazão de líquido.



Fonte: Resultados da eficiência global média em função da vazão do líquido.

Pode-se observar através da Figura 12 que a eficiência máxima para CO e CO_2 foram respectivamente de 56,1% e 44,1% com a vazão de 1L/min, e o melhor resultado para o controle de NO_x foi de 25,5%, com vazão de 0,8 L/min.

No trabalho de Silva et al. (2014) a eficiência máxima no controle do CO e CO_2 foram de 96,69% e 92,1% respectivamente, ambas alcançadas com a vazão de 1L/min. O mesmo ocorreu neste trabalho onde as maiores eficiências para CO e CO_2 também foram alcançadas com a vazão de 1L/min.

Para o controle de NO_x a máxima eficiência foi alcançada na vazão de 0,8 L/min, a mesma vazão onde Silva et al. (2014) conseguiu sua melhor eficiência de controle para este poluente, com valor de 97,14%.

6. CONCLUSÃO

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

- As maiores concentrações de CO foram emitidas na fase de incandescência na queima do bagaço de cana-de-açúcar chegando a 4000 ppm. Confirmando o que é encontrado na literatura.
- A máxima concentração de NO_x foi observada na fase de chama da queima 20 ppm, confirmando os resultados encontrados na literatura.
- No controle de gases a máxima eficiência de coleta para CO e CO_2 foram alcançadas para a vazão de 1L/min, e para NO_x a maior eficiência foi alcançada com a vazão de 0,8L/min. Um dos fatores que podem ter influenciado neste resultado é que o jato do líquido nestas vazões pode ter alcançado o centro do tudo, assim captado uma maior quantidade de poluentes.
- O bagaço de cana-de-açúcar produzido nas feiras de rua, nos tradicionais carrinhos de garapa é um material ainda pouco estudado. Este trabalho mostrou que a biomassa estudada é viável como fonte de energia através de sua combustão, e que os poluentes emitidos podem ter sua emissão controlada, assim diminuindo a poluição na atmosfera.

7.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ARBEX, M. A. et al. Queima de biomassa e efeitos sobre a saúde. **Jornal Brasileiro de Pneumologia**, São Paulo, p. 158-175, 2004.

BRAGA, Alfesio et al. Poluição atmosférica e saúde humana. **Revista Usp**, São Paulo, v. 1, n. 51, p.58-71, nov. 2001.

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.

BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131p.

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 JUNIOR, J. A; MCQUAY, M. Q. **Princípios de combustão aplicada**. Florianópolis: Editora da Ufsc, 2007. 176 p.

CIESLINSKI, J. E. F. **Estudo da emissão e controle dos gases e particulados provenientes da queima de biomassa**. 2014. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

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

CORTEZ, Luís; MAGALHÃES, Paulo; HAPPI, Júlio. Principais subprodutos da agroindústria. **Revista Brasileira de Energia**, Campinas, v. 2, n. 2, p.1-17, dez. 2000.

COSTA, M. A. M. **Eficiência de coleta de partículas em lavadores Venturi**. 2002. 262 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

DASHEFSKY, H. Steven. **Dicionário de educação ambiental: Um guia de A Z**. São Paulo: Gaia, 2001. 313 p.

DIAS, Romulo Rezende et al. **Controle de poluição utilizando lavador venturi: A influência da injeção de líquido**. Itapeva: Unesp, 2007. 1 p.

GENOVESE, Alex Leão; UDAETA, Miguel Edgar Morales; GALVÃO, Luiz Cláudio Ribeiro. Aspectos Energéticos da Biomassa como Recurso no Brasil e no Mundo. **Revista Usp**, São Paulo, p.1-10, jan. 2006.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. **Energia e meio ambiente no Brasil**. Estudos Avançados 21, São Paulo, v. 1, n. 59, p.7-20, fev. 2007.

GONÇALVES, Heber Albuquerque; SOARES NETO, Turibio Gomes. **Concentrações das Espécies Químicas Liberadas Durante a Combustão de Biomassa**. Lorena: 2013. 50 p.

GUERRA, V. G. **Investigação do efeito de injeção de líquido por orifícios múltiplos na formação de gotas em um lavador Venturi**. 2009. 154 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

LEWANDOWSKI, I.; KICHERER, A.. Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of Miscanthus x giganteus. **European Journal Of Agronomy**, Stuttgart, n.6, p.163-177, ago. 1997.

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

MARCONDES, F. F. **Amostragem de poluentes gasosos e particulados finos emitidos pela combustão do bagaço da cana-de-açúcar.** 2015. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Madeireira, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Itapeva, 2015.

MARTINI, Paulo Roberto Rodrigues. **Conversão Pirolítica de Bagaço Residual da Indústria de Suco de Laranja e Caracterização Química dos Produtos.** Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, v. 1, n. 11, p.1-136, nov. 2009.

MCKENDRY, Peter. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. **Bioresource |technology**, Colchester, v n. 83, p.37-46, jul. 2002.

MENEGUELLO, L. A.; CASTRO, M. C. A. A. O protocolo de Kyoto e a geração de energia elétrica pela biomassa da cana-de-açúcar como mecanismo de desenvolvimento limpo: interações, Campo Grande. **Revista Internacional de Desenvolvimento Local**, Campo Grande, v. 8, n. 1, p. 33-45, mar. 2007.

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

RABELO, E.R.C. **Análise teórica e experimental sobre a incandescência em espécimes de madeira.** 2003. 120 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Energia, Unesp, Guaratinguetá, 2013.

RENDEIRO, Gonçalo; NOGUEIRA, Manoel. Combustão e |Gasificação de Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia. **Programa Luz Para Todos**, Brasília, v. 1, n. 1, p.52-63, nov. 2008.

RIBEIRO, Ana Paula Rodrigues Alves. **Estudo da eficiência de coleta em um lavador venturi com injeção e líquido por multi-orifícios**. 2005. 109 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005.

RICCO JUNIOR, E. **Materiais Filtrantes**: publicado em 2007. Disponível em: <<http://meiofiltrante.com.br/materias.asp?action=detalhe&id=285>>. Acesso em: fev. 2016.

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.

SILVA, A.p.s da et al. **Avaliação da eficiência do lavador de gases do tipo venturi no controle das emissões de gases e particulados emitidos na combustão de maravalha de pinus**. Itapeva: Cobeq, 2014. 8 f.

SILVA, Diogo Aparecido Lopes et al. **Avaliação experimental do desempenho de dois lavadores Venturi na coleta de particulados emitidos com a queima da biomassa madeirável**. Itapeva: Unesp, 2008.10 p.

SIMONEIT, Bernd R. T.. Biomass burning: a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion. **Applied Geochemistry**, Corvallis, v17, p.129-162, mar. 2002.

SOARES, R.V. Queimas Controladas: Prós e Contras. In: Fórum Nacional sobre Incêndios Florestais, 1., 1995, São Paulo. **Anais...**São Paulo, p. 6-10

THEODORE, L.; BUONICORE, A. **Air pollution control equipment**. CRC Press, 1988.

WILLIAMS, A. et al. Pollutants from the combustion of solid biomass fuels.
Progress In Energy And Combustion Science, [s.l.], v. 38, n. 2, p.113-137, abr.
2012. Elsevier BV.