UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

FELIPE DA SILVA NASCIMENTO

**Desenvolvimento de protótipo de gaseificador de resíduos
combustíveis em leito horizontal**

versão corrigida

São Carlos – SP

2014

FELIPE DA SILVA NASCIMENTO

Desenvolvimento de protótipo de gaseificador de resíduos combustíveis em leito horizontal

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Nivaldo Aparecido Corrêa

São Carlos

2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Nascimento, Felipe da Silva

N244d Desenvolvimento de protótipo de gaseificador de
resíduos combustíveis em leito horizontal / Felipe da
Silva Nascimento; orientador Nivaldo Aparecido Corrêa.
São Carlos, 2014.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2014.

1. Bagaço de cana-de-açúcar. 2. Energia. 3.
Tratamento térmico. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **FELIPE DA SILVA NASCIMENTO**.

Título da dissertação: "Desenvolvimento de protótipo de gaseificador de resíduos combustíveis em leito horizontal".

Data da defesa: 25/09/2014

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **Nivaldo Aparecido Corrêa (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Associado **Valdir Schalch**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Luis Augusto Martins Ruotolo**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Resultado:

Aprovado

APROVADO

APROVADO

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Profa. Associada **Maria Bernadete A. Varesche Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Dedico esse trabalho à minha família, amigos e aos leitores que puderem encontrar nessas linhas um guia para realizar um grande trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço com toda sinceridade aos companheiros que mesmo em um breve encontro fizeram parte dessa caminhada.

A toda minha família, em especial minha mãe (Elizabeth), avós (Seda e Eurides) e irmãos (Alex, Livia e Flávia) que estiveram mais presentes nesses anos de mestrado.

Aos novos integrantes Francis e família.

Ao professor Nivaldo Corrêa que tem sido um grande parceiro e orientador na pesquisa, cuja convivência trouxe vários ensinamentos

À República Cooperativa dos Loucos que foi mais que uma residência durante esse tempo em São Carlos, cooperados: Zupa, Alecrim (Phillipe), Bidjei (Vinícius), Txê (Fernando), Mestre dos Magos (Rogério), Lombardi (Rafael), Bola (Marcelo), Serjão Malandro (Sérgio), Lingüine (João), Fужão (Diego - Equador), Armário (Mário), Viel (Giovani), Cachorro Loko (Gabriel), Mumuca (Murillo), Piru (Carlos Gamarra - Peru), Tiago e também, aqueles que junto à Cooperativa são grandes amigos que consideramos agregados a nossa turma: Marjô, Leandrão, Jacque, Tia Loide, Marília, Marisco, Pri.

Aos colegas e amigos que desde o início, trabalhamos e festejamos nessa estrada: Pauleta, Tetinha, Cebola, Fred, Nego, Carli, Ju, Karen, Carol, Dico, Bobo, Transão, Irlandês, Jairo, Ana Paula, Andressa, Laís, Fêr, Andrezão, Samurai, Portuga, Sami,

Aos novos colegas: Córdoba, Monstro, Xamego, Pimpão, Ivan, Gabi, Drica, Mari, Thaís, Poty, Zé, Toninha, Anne, Char, Vitória, Júlia, Perri, Quixeramobim, Bel, Marcão, Plínio, Pariconha, Goiaba, Daniê, Mineiro, Schaaf, Léo, Thalita, Tiagão, Dayane, Mahl, Roger, Pedro (espanhol), Clara, Inaê, Juliana, Leandro, Aline, Patrick, Juan, João Chiabai, Pedro Gonçalves, Marcon, Carol.

À companheira Priscila que me apoiou com uma grande amizade.

Aos “irmãos” que foram acolhidos pelo pai Nivaldo: Nayara, Andreza, Elaine, Guilherme e Natália.

Aos grandes amigos desde muito tempo: Cabrito (Pablo), Azul (Artur), ET (Douglas), Fred

(Frederico Nogueira), galera de Viçosa e da Engenharia Agrícola e Ambiental, Luan Giovanelli, Patetinha (Márcio), Schuery (Filipe), Lucas, Calouro (André).

Ao pessoal do Departamento de Hidráulica e Saneamento, principalmente, Rose, Valdir, Luiz Daniel, Sá, Priscila.

Aos colaboradores da pesquisa (citando alguns): Alcino, Janja e a equipe do LPB, Bérnago, Chico, Pedro e Flávio (oficina mecânica);

Aos funcionários da Us. São Martinho: Michele Pires e Cláudio Frazão pela atenção dispensada para adquirir a biomassa de cana-de-açúcar.

Nitimur in vetitum: sob este signo minha filosofia há de vencer um dia, porque até agora a única coisa que foi proibida sempre, por princípio, foi a verdade.

Friedrich Nietzsche

RESUMO

NASCIMENTO, F. S. **Desenvolvimento de protótipo de gaseificador de resíduos combustíveis em leito horizontal.** 2014. 103f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 2014

As vantagens de um sistema gaseificador como solução energética na gestão de resíduos sólidos urbanos incentivaram o desenvolvimento de um sistema de gaseificação que opere na horizontal, ou parcialmente inclinado, e que utilize vários tipos de resíduos, principalmente os classificados como biomassa para a geração de gás combustível ou de síntese. O gaseificador tem sido fortemente recomendado como uma tecnologia promissora para o tratamento térmico dos resíduos sólidos, nesse trabalho experimentou-se algumas biomassas como matéria-prima para o protótipo, e atualmente tem sido testado o bagaço da cana-de-açúcar como biomassa a testar na co-gaseificação com os resíduos sólidos municipais, devido a sua abundância na região, além da sua capacidade térmica. Com isso, desafios como a destinação final dos resíduos sólidos urbanos, eliminação dos lixões atendendo às responsabilidades estabelecidas na Lei Federal do Saneamento Básico (Lei nº 11.445/2007) e na Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (Lei nº 12.305/2010) e melhorar as fontes de energia complementares à energia das usinas hidroelétricas, base da matriz da energia elétrica brasileira, buscando uma alternativa ambientalmente segura e economicamente viável, podem ser superados. O gaseificador, ainda não demonstra resultados relevantes quanto aos seus produtos gerados, contudo, a pesquisa é inovadora e sugere mais investimentos para seu avanço, tendo como resultados parciais a detecção, pelo cromatógrafo, dos gases: Hidrogênio, nitrogênio, metano e dióxido de carbono, tanto com o reator aberto quanto fechado.

Palavras-chave: Bagaço de cana-de-açúcar. Energia. Tratamento térmico.

ABSTRACT

NASCIMENTO, F. S. Development of gasifier prototype fuel waste in horizontal bed. 2014. 103f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP. 2014

The advantages of a gasifier system as energy solution in the management of municipal solid wastes encouraged the development of a gasification system that operates horizontally, tilted or partially, and uses various types of waste, especially those classified as selective collection of waste as material to generate fuel gas or synthesis. The gasifier has been strongly recommended as a promising technology for the thermal treatment of solid waste, in this study experienced are some biomass as feedstock for the prototype, and currently it has been tested bagasse from sugar cane as biomass testing in co-gasification with municipal solid waste, due to its abundance in the region beyond its thermal capacity. Thus, challenges such as the disposal of municipal solid waste, elimination of landfills, that meet the responsibilities set out in the Federal Law of Sanitation (Law No. 11.445/2007) and the National Policy on Solid Waste - PNRS (Law No. 12.305/2010) and improve additional sources of energy from hydroelectric energy, base matrix of Brazilian electricity, seeking an alternative environmentally safe and economically viable. The gasifier, yet shows results relevant to their products as generated, however, this research is innovative and suggests more investment to its advancement, having as partial results the detection of gases, by the chromatograph: hydrogen, nitrogen, methane and carbon dioxide, with the reactor open and the closed mode.

Keywords: Sugar cane bagasse. Energy. Heat treatment

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Características dos gaseificadores	23
Tabela 02– Configurações de gaseificadores	24
Tabela 03– Contaminantes do gás de síntese.....	29
Tabela 04 – Características gás de síntese desejáveis para diferentes aplicações	35
Tabela 05 – Condições individuais de operação dos gaseificadores de RSU	38
Tabela 06 – Composição do <i>syngas</i> derivado do uso de RSU como biomassa.....	39
Tabela 07 – Emissões de gaseificação de biomassa.....	40
Tabela 08 – Análise imediata e final da biomassa madeireira (base úmida).....	44
Tabela 09 – Características nominais do gaseificador descendente com suprimento de ar em duplo estágio	45
Tabela 10 – Componentes do bagaço de cana-de-açúcar.....	58
Tabela 11 – Análise de potencial do bagaço de cana-de-açúcar como matéria-prima para o gaseificador	58
Tabela 12 – Geração média per capita de resíduos sólidos urbanos no Brasil.....	60
Tabela 13 – Emissões evitadas por tecnologia.....	64
Tabela 14 –Análise final e imediata do bagaço	66
Tabela 15 – Componentes elétricos do sistema gaseificador	68
Tabela 15 – Quantificação dos gases obtidos pela cromatografia.....	86
Tabela 16 – Média e desvio padrão dos gases obtidos pela cromatografia	86
Tabela 17 – Limites de detecção (LD) e de quantificação (LQ):.....	87
Tabela 18 – Tempo de retenção dos gases; equações de calibração e coeficiente de determinação das curvas	88

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
2.	OBJETIVOS	19
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1	Gaseificação	20
3.2	Gaseificadores - Estado da arte	27
3.2.1	Preparo da matéria-prima.....	27
3.2.2	Condicionamento do syngas	28
3.2.3	Co-gaseificação	31
3.2.4	Aplicações do gás de síntese.....	32
3.2.5	Aplicações do gás combustível	33
3.2.6	Avaliação dos resultados: Condições de operação	37
3.2.7	Composição do gás de síntese	38
3.2.8	Emissões	39
3.2.9	Equipamento de suporte	41
3.2.10	Potencial de aplicações.....	41
3.2.11	A necessidade de avaliação dos dados.....	43
3.2.12	GASEIFICAÇÃO DE MADEIRA COMO BIOMASSA	43
3.2.13	REATOR COM LEITO FLUIDIZADO – 4FBR	48
3.2.14	REATOR DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE ALIMENTADO COM CASCAS DE ARROZ	52
3.2.15	Biomassa na secagem de produtos agrícolas via gaseificação com combustão adjacente dos gases produzidos.....	56
3.3	Biomassa	56
3.3.1	Bagaço de cana-de-açúcar	57
3.3.2	Resíduos Sólidos	59
3.4	Aproveitamento Energético de Resíduos	63
4.	MATERIAL E MÉTODOS.....	65
4.1	Montagem do experimento.....	65
4.2	Sequência de funcionamento	67
4.3	Operação do sistema	71
4.4	Análise dos gases	73

5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
5.1	Desenvolvimento do sistema.....	76
5.1.1	Montagem do suporte	76
5.1.2	Sistema transportador da matéria-prima	77
5.1.3	Matéria-prima	78
5.1.4	Sistema de sucção dos gases.....	80
5.1.5	A combustão parcial	82
5.1.6	Trocador de calor	83
5.2	Produtos gerados	85
5.2.1	Compostos gasosos.....	85
5.2.2	Compostos líquidos.....	89
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:	91
7.	CONCLUSÃO	93
	REFERÊNCIAS	94
	ANEXOS	98

1. INTRODUÇÃO

Durante todo o século XX, a oferta excessiva de energia, obtida principalmente a partir dos combustíveis fósseis como petróleo e carvão mineral, deu suporte ao crescimento e às transformações da economia mundial. Já nos primeiros anos do século XXI, o cenário mudou ao ser colocado à prova por uma nova realidade: a necessidade do desenvolvimento sustentável (ANEEL, 2008).

Segundo a ANEEL (2008), desde o início dos anos 90, estudiosos e cientistas alertavam para os efeitos da deterioração ambiental provocada pela ação humana. Um deles é o aquecimento global, provocado pelo elevado volume de emissões dos gases causadores do efeito estufa (GEE), particularmente o dióxido de carbono (CO_2), liberado em larga escala nos processos de combustão dos recursos fósseis para produção de calor, vapor ou energia elétrica. Outro, é a possibilidade de esgotamento, no médio prazo, das reservas de recursos naturais mais utilizadas. Entre elas, carvão mineral e petróleo. Do ponto de vista econômico, este último, por sinal, durante quase uma década foi caracterizado pela volatilidade e tendência de alta das cotações (que superaram US\$100,00 por barril em 1980 e, mais recentemente, em 2008), o que se revelou como um forte estímulo para as iniciativas de substituição por outras fontes.

A atividade de produção de energia – e, particularmente, da energia elétrica – ingressou no século XXI, portanto, em busca do desenvolvimento sustentável, conceito que alia a expansão da oferta, consumo consciente, preservação do ambiente e melhoria da qualidade de vida. É o desenvolvimento capaz de suprir as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade de atender as necessidades das futuras gerações, ou seja, que não esgota os recursos para o futuro. Em outras palavras: o desafio é reduzir o impacto ambiental negativo e, ao mesmo tempo, ser capaz de suportar o crescimento da demanda (ANEEL, 2008).

A expansão acentuada do consumo de energia, embora possa refletir o aquecimento econômico e a qualidade de vida, tem aspectos negativos. Um deles é a possibilidade do esgotamento dos recursos utilizados para a produção de energia. Um segundo é o impacto ao meio ambiente produzido por essa atividade. Finalmente, um terceiro são os elevados investimentos exigidos na pesquisa de novas fontes e construção de novas usinas (ANEEL, 2008).

Fernandes (2003) afirma que devemos buscar o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para a geração de energia. Estas tecnologias visam apresentar uma alternativa para o petróleo como principal fonte energética da nossa civilização. Como o petróleo e o carvão não são fontes renováveis, são necessárias alternativas para suprir a demanda energética futura da sociedade.

A busca não se reduz a um único substituto para o petróleo, e sim na possibilidade de coexistirem várias fontes alternativas, propondo a mudança da estrutura tecnológica e energética. Significa que é necessário tornar economicamente viáveis, propostas como: co-geração energética, geração descentralizada de energia elétrica, pequenas centrais geradoras, combustíveis renováveis e até mesmo fontes de fornecimento irregular de energia eólica e a conversão de energia solar por células fotovoltaicas (FERNANDES, 2000; 2003).

O governo brasileiro, através das RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012; LEI Nº 10.438, DE 26 DE ABRIL DE 2002; LEI Nº 9.478, DE 6 DE AGOSTO DE 1997; entre outras, incentiva e orienta a utilização de fontes alternativas de energia para promover o desenvolvimento, ampliar o mercado de trabalho e valorizar os recursos energéticos, proteger os interesses do consumidor quanto a preço, qualidade e oferta dos produtos; proteger o meio ambiente e promover a conservação de energia; e vários outros benefícios (MMA, 2012).

A recuperação e o aproveitamento energético como objetivo da Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei 12.305 de 2 de agosto de 2010, traz consigo a adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais, a capacitação técnica continuada na área de resíduos sólidos, o incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos (MMA, 2010). Tendo metas como, reduzir a quantidade de rejeitos encaminhados para a disposição final ambientalmente adequada, remete a explorar o potencial energético desses rejeitos.

Conforme Lora et al. (2012), resíduos domiciliares e uma grande quantidade de rejeitos industriais que possuem na sua maior parte compostos orgânicos de longa cadeia de carbono, podem ser transformados em moléculas orgânicas menores para uma finalidade de oxidação para a obtenção de energia. A queima direta também pode ser viável, entretanto se forem consideradas operações de

armazenamento, transporte e usos mais nobres dos compostos reformados, outras operações de queima parcial seriam mais interessantes. Essas operações são basicamente duas, dependendo do grau de oxidação que se impõe no processamento:

- **Pirólise** – queima de material na ausência de oxigênio, onde se obtém muitos gases voláteis e óleos pirolíticos com capacidade combustível, além de grande quantidade de alcatrão.
- **Gaseificação** – queima parcial do material com quantidades reguladas de oxigênio, onde os principais produtos são os gases de reforma, metano, hidrogênio e monóxido de carbono, interessantíssimos para queima direta em motores de explosão e como moléculas básicas para reações de produtos para outros interesses.

Em qualquer um dos processos, sempre haverá formação de alcatrão, cinzas ou carvão. O alcatrão também tem seu valor comercial, como insumo agrícola biocida, ou ainda como piche para pavimentação, após sua queima. O carvão pode ser aproveitado em novas queimas. As cinzas deverão ir para o aterro ou serem encapsuladas por meio de solidificação em materiais de construção, como tijolos, telhas, pavimentos, entre outros. Evidentemente, também haverá formação de muitos outros compostos com enxofre e nitrogênio, principalmente. Muitos desses podem ser nocivos se forem emitidos no ar ou na água. Nessa etapa, com em qualquer outra de processamento industrial, é necessário que haja procedimentos operacionais de tratamento do efluente líquido ou gasoso.

Os equipamentos usuais para realizar essas operações, baseiam-se em leitos fixos deslizantes e fluidizados, sempre considerando a direção vertical de movimentação devido à ajuda da força gravitacional como agente motora ou de mistura do meio particulado. É possível ter alturas de leito que proporcionem etapas diversificadas de processamento do material, partindo desde a completa queima na parte inferior, passando por gaseificação, pirólise até a secagem na parte superior, por onde o material é alimentado. Um equipamento multioperacional é de fato muito interessante, ao se considerar que o material de resíduo sempre vem disposto de altos teores de umidade. Esses equipamentos devido a sua altura com relação a base, devem considerar um sistema de transporte vertical, seja por rampas,

gôndolas, esteiras ou helicóides, o qual tem a sua parcela energética a ser subtraída do montante produzido.

Na tentativa de aproveitar essa parcela e ainda tornar a operação mais facilitada, propõe-se testar um equipamento de queima que opere na horizontal, ou parcialmente inclinado, onde o transportador, no caso helicoidal, já pressione o material para dentro da câmara de combustão, ou que parte da combustão, ou secagem, possa ser feita dentro do próprio duto de uma helicóide (rosca sem fim ou transportador de parafuso).

2. OBJETIVOS

Desenvolver um gaseificador horizontal capaz de gerar gás combustível, ou de síntese, a partir de múltiplos resíduos.

Objetivo específicos:

- Explorar a regulação da alimentação do resíduo e do ar para se obter maior eficiência, com base em medidas de teores de algum dos componentes gasosos gerados (metano, hidrogênio ou monóxido de carbono);
- Explorar o potencial energético do rejeito da coleta seletiva como material combustível conciliando diferentes biomassas;
- Desenvolver um sistema de transporte com parafuso helicoidal;
- Propor usos para os produtos gerados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Gaseificação

A solução para vários problemas com resíduos sólidos no Brasil pode estar na gaseificação. Segundo relato da FAPESP, em 2012 a produção de biocombustível pela gaseificação de biomassa foi tema de simpósio internacional na FAPESP em 17 de Setembro. Pesquisadores brasileiros e da Alemanha, Austrália, Suécia e Reino Unido participaram de um simpósio sobre gaseificação de biomassa no dia 17 de Outubro, em São Paulo. Organizado em conjunto pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), o encontro discutiu tecnologias, processos de produção e operação de usinas piloto para obtenção de combustíveis a partir da transformação de biomateriais sólidos e líquidos em gases, para uso como biocombustíveis. Fernando Landgraf, diretor-presidente do IPT, expôs o Programa Biosyngas, desenvolvido pelo Instituto para a obtenção de gás de síntese a partir de materiais alternativos aos de origem fóssil.

A gaseificação de biomassa é a combustão incompleta da biomassa que resulta na produção de gases combustíveis contendo monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂) e traços de metano (CH₄). Esta mistura é chamada gás de síntese. Gás de síntese pode ser usado para acionar motores de combustão interna (tanto compressão e *faísca de ignição*), pode também ser um substituto para óleo de forno em aplicações de calor direto e para produzir, de forma economicamente viável, metanol - um produto químico extremamente atrativo o qual é útil tanto como combustível para máquinas térmicas bem como matéria-prima química para indústrias. Já que, qualquer biomassa pode ser submetida à gaseificação, este processo é mais atrativo que a produção de etanol ou biogás, onde apenas certos tipos de biomassa pode produzir o combustível (RAJVANSKI, 1986).

A produção de gás gerador (gás de síntese) chamada gaseificação, é a combustão incompleta de combustível sólido (biomassa) e ocorre em temperaturas em torno de 1000 °C. O reator onde isto ocorre é o gaseificador (RAJVANSKI, 1986).

Os produtos da combustão completa de biomassa geralmente contém nitrogênio (N_2), vapor d'água ($H_2O_{(g)}$), dióxido de carbono (CO_2) e um excesso de oxigênio (O_2). Contudo na gaseificação onde existe um excesso de combustível sólido (combustão incompleta) os produtos da combustão são gases combustíveis como monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H_2) e traços de metano (CH_4) e outros produtos como alcatrão e cinzas. A produção destes gases é pela reação do vapor d'água e dióxido de carbono através de uma camada fulgurosa de carvão. Então, a chave para um projeto de gaseificação é criar condições que a) a biomassa é reduzida (transformada) em carvão e, b) o carvão é convertido na temperatura adequada para produzir CO e H_2 (RAJVANSHI, 1986). Abaixo, na figura 1, tem-se uma ilustração básica da gaseificação.

Figura 01: Gaseificação de biomassa

Fonte: Rajvanshi (1986)

A gaseificação tem como vantagens: permanência das cinzas e do carbono residual no gaseificador, diminuindo assim a emissão de partículas; obtenção de combustível resultante limpo, não havendo na maioria dos casos necessidade de controle de poluição; associada a catalisadores, como alumínio e zinco, a gaseificação aumenta a produção de hidrogênio e de monóxido de carbono e diminui a produção de dióxido de carbono. A gaseificação tem pois impacto não só na economia do hidrogênio, como na captura do dióxido de carbono. A gaseificação da

biomassa, aparece, como alternativa limpa e renovável de energia, com grande possibilidade de aplicação em países com grandes áreas cultiváveis, em climas tropicais, onde a taxa de crescimento dos vegetais é alta (SANTOS et al, 2010).

De acordo com Vale et al. (2000) quanto menor o teor de umidade maior será a produção de calor por unidade de massa, na madeira, o que determina que o teor de umidade é uma característica a ser controlada ao utilizar biomassa para gerar energia, haja vista que, segundo Brito¹ (1986, apud GONÇALVES et al., 2009), a presença de água representa poder calorífico negativo, pois parte da energia liberada é gasta na vaporização da água e se o teor de umidade for muito variável, poderá dificultar o processo de combustão, havendo necessidade de constantes ajustes no sistema.

Um dos maiores desafios na produção de biocombustíveis a partir da gaseificação e síntese é a formação, durante o processo de gaseificação, de espécies com alto peso molecular chamadas alcatrões. Alcatrões diminuem a partir da produção do gás de síntese (syngas) e tem que ser removido previamente ao passo de síntese de combustível para prevenir a desativação dos catalisadores e incrustantes do equipamento do processo (GASTON et. al., 2011).

No gaseificador as paredes são geralmente forradas com materiais refratários e isolantes, que servem a três propósitos: (1) eles reduzem a perda de calor através das paredes, (2) eles agem como um armazenador térmico para auxiliar na ignição de biomassa fresca, e (3) eles protegem o metal da corrosão (BASU, 2010). As reações chegam a temperaturas de aproximadamente 850 °C, sob condições de pressão atmosférica ou sob elevada pressão Brand (2010 apud FEAM, 2012).

Na tabela 01 estão reportadas algumas características gerais dos gaseificadores:

¹ BRITO, J. O. Madeira para a floresta: A verdadeira realidade do uso de recursos florestais. Silvicultura, v.11, n.41, p.188-193. 1986.

Tabela 01 – Características dos gaseificadores

Características	Variações
Poder calorífico do gás produzido	Baixo: até 5 MJ/Nm ³ (997 kcal/kg) Médio: 5 a 10 MJ/Nm ³ (997 a 1.993 kcal/kg) Alto: 10 a 40 MJ/Nm ³ (1.993 a 7.972 kcal/kg)
Tipo de agente gaseificador	Ar, vapor d'água, oxigênio, hidrogênio (hidrogaseificação)
Tipo de leito	Fixo: corrente paralela ou contracorrente Fluidizado: borbulhante ou circulante
Pressão de trabalho	Baixa: pressão atmosférica Pressurizado: até 6 Mpa (59,2 atm)
Natureza da biomassa	Resíduos agrícolas, industriais ou sólidos urbanos (lixo) Biomassa <i>in natura</i> , peletizada ou pulverizada

*Para gases é expresso em unidade de energia por volume. Para converter MJ/Nm³ em kcal/kg, deve-se multiplicar o valor por 239,2 kcal/MJ e dividir pela massa específica em kg/Nm³. As conversões nesta tabela, reportadas entre parênteses, adotam massa específica média de 1,2 kg/Nm³, considerando dados de Caputo (2009): valores para biomassa entre 1,07 e 1,25 kg/Nm³, conforme a composição do *syngas*, decorrente do processo de gaseificação.

Fonte: FEAM (2012)

Uma variedade de gaseificadores de biomassa têm sido desenvolvidos. Eles podem ser agrupados em 4 grandes classificações: Leito fixo ascendente, leito fixo descendente, leito fluidizado borbulhante e leito fluidizado circulante. A diferenciação está baseada nos meios de suporte da biomassa no reservatório do reator, a direção do fluxo da biomassa e do oxidante, e o modo como o calor é suprido para o reator.

Na tabela 02 listam-se as configurações mais usadas (CIFERNO; MARANO, 2002). E mais abaixo, na figura 2, encontra-se algumas ilustrações dos fluxos do material e das zonas formadas no processo.

Tabela 02– Configurações de gaseificadores

Tipo de gaseificador	Direção do fluxo		Velocidade do combustível	Suporte	Fonte de Calor
	Combustível	Oxidante			
Leito fixo contracorrente	Descendente	Ascendente	Nenhuma	Grelha	Combustão do carvão
Leito fixo concorrente	Descendente	Descendente	Nenhuma	Grelha	Combustão parcial de voláteis
Leito fluidizado borbulhante	Ascendente	Ascendente	1 m/s	Nenhum	Combustão parcial de voláteis e carvão
Leito fluidizado circulante	Ascendente	Ascendente	7 a 10 m/s	Nenhum	Combustão parcial de voláteis e carvão

Fonte: Reed; Siddhartha (2001). Bridgwater; Evans (1993). Paisley et al. (2001). Ciferno e Marano (2002).

Figura 02: Zonas de gaseificação nos gaseificadores: 1) Fluxo ascendente; 2) Fluxo descendente e 3) Fluxo cruzado

Fonte: Rajvanshi (1986, tradução do autor).

Para formar a base de suporte de um leito fluidizado, normalmente se utiliza areia, que representa um grande reservatório térmico capaz de atenuar grandes variações de umidade por períodos relativamente longos, no combustível alimentado, ao contrário de caldeiras de grelha (FEAM, 2012).

Para a geração de energia em ciclos termelétricos utiliza-se principalmente a gaseificação pressurizada, entretanto esses sistemas apresentam problemas ainda não solucionados, como a alimentação de combustível, a redução do teor de alcatrão do gás, os óxidos de nitrogênio produzidos e a filtragem do gás quente, Henriques¹ (2004 apud FEAM, 2012).

¹HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos:** uma abordagem tecnológica. Rio de Janeiro: UFRJ, 2004, 204 p. Originalmente apresentada como tese de mestrado

A técnica de gaseificação é, em princípio, extremamente versátil, mas existem muitos problemas em transformar este potencial teórico em uma tecnologia viável e prática. Na maior parte dos casos, as dificuldades residem não no processo básico de gaseificação, mas sim no projeto de um equipamento que deve produzir um gás de qualidade, com confiabilidade e segurança, adaptado às condições particulares do combustível e da operação (FEAM, 2012).

Segundo a FEAM (2012), as principais exigências técnicas operacionais considerando informações em literaturas, referentes a pesquisas e implantações comerciais principalmente para gaseificação de madeira, casca de arroz, palha e outros resíduos agrícolas, verificam-se:

- Taxa de alimentação do gaseificador;
- Pressão e temperatura do processo;
- Relação ar/combustível;
- Sistema de limpeza dos gases antecedendo seu aproveitamento energético;
- Sistema de remoção de cinzas.

Brand¹ (2010 apud FEAM, 2012) orienta que os materiais mais indicados para a gaseificação como forma de aproveitamento energético são resíduos lignocelulósicos com baixa umidade (menos de 40%) como palha de cereais, cavacos de madeira, cascas de frutos, serragem, resíduos urbanos, resíduos animais, lodo de esgoto e outros.

Os sistemas de tratamento/controle das emissões atmosféricas devem contemplar os principais problemas a respeito dos gases de gaseificação: material particulado (causa a erosão das palhetas das turbinas a gás), metais alcalinos (devido à corrosão e deposição nas palhetas) e o alcatrão (causa o bloqueio dos filtros de particulados) (FEAM, 2012).

em Ciências em Planejamento Energético, Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

¹ BRAND, M. A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131p.

3.2 Gaseificadores - Estado da arte

Na figura 03, tem-se um resumo do histórico da gaseificação:

Figura 03: Marcos históricos no desenvolvimento da gaseificação

Fonte: Basu (2010)

Os trabalhos a seguir são algumas das atualidades relacionadas à tecnologia dos gaseificadores, tanto plantas em operação quanto estudos científicos, a presente pesquisa identificou que a gaseificação tem sido amplamente estudada o que sugere que seu potencial deve estar além dos trabalhos apresentados.

3.2.1 Preparo da matéria-prima

O preparo da matéria-prima da biomassa pode ser dividido em dois passos: Seleção/redução do tamanho do material e sua secagem. Os custos aumentam pela dificuldade de manusear o material (por exemplo, a palha) e material com umidade alta (>30%) que requerem uma extensiva secagem prévia para a gaseificação. Vários métodos são adequados para prover um abastecimento contínuo de matéria-prima para o gaseificador. Há um consenso, no entanto, que algumas dificuldades

continuam a existir na manutenção de uma biomassa de manuseio seguro, armazenamento, e sistema de alimentação, no caso de um gaseificador atmosférico ou pressurizado. Estes resultados inconsistentes de umidade, densidade, tamanho e teor de energia térmica da maioria das matérias-primas da biomassa, por exemplo, a manipulação mecânica de palha é difícil, devido à sua baixa densidade ($<200 \text{ kg/m}^3$). Ela deve ser tratada ou picada em fardos ou peletizada para permitir a manipulação mecânica ou pneumática (PAISLEY et al., 2001 tradução do autor). Alguns tipos de madeira são leves, úmidas e fibrosas e tendem a interferir em certos métodos de alimentação mecânicos, como alimentadores de parafuso. A biomassa pode ser redimensionada e remodelada usando vários métodos, incluindo lâminas rotativas, rolos, martelos de moagem, cortes, retalhamento, pulverização e peletização. A biomassa é transportada de silos de armazenamento ou “lock hoppers” para o gaseificador via uma transportadora ou um sistema pneumático (CIFERNO; MARANO, 2002 tradução do autor).

A maioria das tecnologias de gaseificação revisadas requerem que a umidade da matéria-prima esteja abaixo de um nível específico. Este nível varia de menos de 10% para um gaseificador Lurgi para menos que 70% para um Foster Wheeler. Os métodos de secagem Rotary, vapor e ciclones usam calor fornecido por uma caldeira, turbina de combustão, ou gases de exaustão de motor (GEM) ou são abastecidos diretamente pelo gás produzido no Lurgi. A gaseificação de biomassa com alto teor de umidade é possível à custa de um sistema que requer um alto gasto de energia e um syngas mais sujo (BRIDGWATER; EVANS¹, 1993apud CIFERNO; MARANO, 2002 tradução do autor). Combustíveis com alto teor de umidade geralmente decrescem a temperatura de operação do reator e, além disso, podem aumentar o teor de metano e reduzir o de hidrogênio.

3.2.2 Condicionamento do syngas

O gás de síntese produzido pela gaseificação de biomassa pode conter um

¹ BRIDGWATER, A. V.; EVANS, G. D. **An assessment of thermochemical conversion systems for processing biomass and refuse**. Energy Technology Support Unit (ETSU) on behalf of the Department of Trade, ETSU B/T1/00207/REP, 1993.

ou mais dos contaminantes listados na tabela 03. A identidade e quantidade destes contaminantes dependem do processo de gaseificação e o tipo de matéria-prima.

Tabela 03– Contaminantes do gás de síntese

Contaminante	Exemplo	Problema potencial
Particulados	Cinzas, coque (char), material fluido no leito	Erosão
Metais alcalinos	Compostos de sódio e potássio	Corrosão quente, envenenamento catalisador
Compostos nitrogenados	NH ₃ e HCN	Emissões
Alcatrões	Aromáticos refrativos	Entupimento dos filtros
Enxofre e cloro	H ₂ S e HCl	Corrosão, emissões, envenenamento catalisador

Fonte: Gray, Tomlinson e Berger¹ (1996 apud CIFERNO; MARANO, 2002).

Alcatrões são, em sua maioria, hidrocarbonetos polinucleares (tal como pireno e antraceno) que podem entupir válvulas dos motores, causar deposição nas lâminas das turbinas ou incrustações no sistema de uma turbina levando à redução da performance e aumentando a manutenção.

Sistemas convencionais de lavagem são geralmente a escolha de tecnologia para remover alcatrão do gás de síntese produzido. Contudo, a lavagem esfria o gás e produz um fluxo de resíduos indesejados. Uma opção é a remoção de alcatrões pelo craqueamento catalítico que reduz os hidrocarbonetos de cadeia longa ou elimina este fluxo de resíduos, elimina a ineficiência de arrefecimento de lavagem, e aumenta a produção de gás em qualidade e quantidade.

¹ Gray, D.; Tomlinson, G.; Berger, M. **Techno-Economic Assessment of Biomass Gasification Technologies for Fuels and Power**. Produced by The MITRE Corporation for The National Renewable Energy Laboratory, Under Contract No.AL-4159, January. 1996.

Um exemplo de tecnologia de craqueamento de alcatrão é um desenvolvido pela Battelle usando catalisador de craqueamento descartável em conjunto com a adição de vapor Wiant, Bryan e Miles¹ (1998 apud CIFERNO; MARANO, 2002 tradução do autor). O craqueamento é realizado através da seguinte reação [1]:

O catalisador de Battelle tem também atividade de deslocamento água/gás (*water-gas shift*). Isto aumenta o teor de hidrogênio do gás produzido de modo que seja adequado para a célula de combustível e outras aplicações.

A biomassa convertida incompletamente e a remoção de cinza particulada é realizada com ciclones, lavagem de gases (*wetscrubbing*), ou filtros de alta temperatura Carty, Lau, De Long, Wiant, Bachovchin e Ruel² (1995 apud CIFERNO; MARANO 2002), Carty, Bryan, Lau e Abbasian³ (1995 apud CIFERNO; MARANO). Lavagem “à água” de gases (*waterscrubbing*) pode remover até 50% de alcatrão no gás produzido, e quando seguida de um lavador Venturi, o potencial de remoção dos alcatrões remanescentes aumenta para 97% Stultz e Kitto⁴, (1992 apud CIFERNO; MARANO, 2002 tradução do autor).

¹ WIANT, B.; BRYAN, B.; MILES, T. **Hawaiian Biomass Gasification Facility: Testing Results and Current Status**. Institute of Gas Technology. BioEnergy 1998 Conference, Madison WI, October 1998.

² CARTY, R. H.; LAU, F.S.; DELONG, M.; WIANT, B.C.; BACHOVCHIN, D.M.; RUEL, R.H. **Commercialization of the Renugas Process for Biomass Gasification**, Institute of Gas Technology. 13^a EPRI Conference on Gasification Power Plants. 1994.

³ CARTY, R. H.; BRYAN, B. G.; LAU, F.S.; ABBASIAN, J.M. **Status of the Commercialization of IGT Gasification Technologies**. Institute of Gas Technology. EPRI Conference on New Power Generation Technology, San Francisco CA, October. 1995.

⁴ STULTZ, S.C.; KITTO, J.B. **Steam - it's generation and use**. The Babcock & Wilcox Company, Barberton, Ohio USA, 1992.

3.2.3 Co-gaseificação

A co-gaseificação de carvão e biomassa é uma área relativamente nova de pesquisa. Resultados preliminares de vários estudos pilotos têm mostrado efeitos promissores em termos de qualidade do gás de síntese e redução do impacto ambiental negativo. Embora o carvão seja o combustível fóssil mais abundante no mundo e extensivamente usado na geração de energia, ele tem causado um sério impacto no ambiente como evidenciado pela chuva ácida provocada pelas emissões de SO_x e NO_x (LAU¹, 1997 apud CIFERNO; MARANO, 2002). Emissões de gás CO_2 do efeito estufa durante a combustão do carvão também se tornaram um dos maiores interesses globais. A biomassa tem um teor energético menor que o carvão; contudo, seu uso para produção de energia pode contribuir significativamente para a redução de emissões da rede de CO_2 . Esses dois combustíveis, quando co-gaseificados, exibem sinergia com respeito às emissões totais, incluindo as emissões de gases de efeito estufa, sem sacrificar o teor de energia do produto gasoso.

Lau e Carty² (1994 apud CIFERNO; MARANO, 2002 tradução do autor) apresenta um bom número de opções para integrar carvão e biomassa dentro de um processo de co-gaseificação. Elas estão apresentadas a seguir:

- 1) Co-alimentação biomassa e carvão no gaseificador com uma mistura;
- 2) Co-alimentação biomassa e carvão na gaseificação usando sistemas de alimentação separados;
- 3) Pirolisando a biomassa e seguindo pela co-alimentação de carvão pirolisado e carvão para o gaseificador;
- 4) Gaseificando a biomassa e o carvão em gaseificadores separados seguindo para uma limpeza combinada de gás.

¹LAU, F. S. **The Hawaiian Project**. Institute of Gas Technology, Presented at the Biomass Gasification Utility Scale Demonstration Projects Meeting, Brussels, Belgium, October. 1997.

² LAU, F.S.; CARTY, R. H. **Development of the IGT Renugas Process**. Institute of Gas Technology, Presented at the 29th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference", Monterey CA, August. 1994.

Cada abordagem, como na figura 04, tem benefícios e desvantagens e em última análise, a melhor escolha dependerá dos resultados de mais pesquisas e análises.

Figura 04: Opções de integração para co-gaseificação de carvão/biomassa

Fonte: Ciferno e Marano (2002)

3.2.4 Aplicações do gás de síntese

A composição do gás de síntese proveniente da gaseificação de biomassa irá variar baseada em vários fatores, incluindo o tipo de reator, matéria-prima e condições de processo (temperatura, pressão etc.). A figura abaixo retrata as opções de uso final discutidas no estudo de Ciferno e Marano (2002). Neste estudo são considerados o combustível específico e as aplicações químicas: combustíveis obtidos pelo método de Fischer-Tropsch, metanol e hidrogênio. Na figura 05 está apresentado um resumo das opções conhecidas de conversão do syngas.

Figura 05: Opções de conversão do gás de síntese

fonte: Ciferno e Marano (2002)

3.2.5 Aplicações do gás combustível

A biomassa pode produzir energia elétrica por meio de uma combustão direta numa caldeira a vapor. A eficiência total de conversão da biomassa para eletricidade é limitada pela eficiência teórica da geração de energia numa turbina a vapor, a alta umidade inerente da biomassa como matéria-prima, e por causa dos tamanhos da planta do sistema de biomassa, tipicamente os menores. A eficiência do sistema de biomassa para turbina a vapor está entre 20 e 25%. A geração de energia pode ser completada via gaseificação de biomassa, seguida por um motor de combustão, turbina de combustão, turbina a vapor ou célula de combustível. Estes sistemas podem produzir tanto calor quanto energia (Associação calor e energia) e pode alcançar ótimas eficiências no sistema em torno de 30 a 40% (TURN¹, 1999 apud CIFERNO; MARANO, 2002). O sistema de geração de energia empregado estabelece as especificações do gás de síntese. Há uma maior amplitude no que diz respeito à composição do gás de síntese para combustão em motor do que para

¹ TURN, S.Q. **Biomass integrated gasifier combined cycle technology: Application in the cane sugar industry.** Int. Sugar JNL, 1999, Vol. 101, NO. 1205.

combustão em turbina. Turbinas a gás têm emergido como o melhor meio para transformar calor em energia mecânica e são agora peças-chave para a maior eficiência dos sistemas de geração elétrica (CIFERNO; MARANO, 2002).

Hidrogênio

Hidrogênio é produzido atualmente em grandes quantidades via reforma a vapor de hidrocarbonetos sobre um catalisador de Ni a 800 °C (1472 °F), Nieminen (1999). Este processo produz um gás de síntese que deve ser processado novamente para produzir hidrogênio de alta pureza. O gás de síntese condicionado, necessário para reforma a vapor, é semelhante ao que seria necessário para um *syngas* derivado da gaseificação de biomassa; no entanto, alcatrões e partículas não se tornam uma preocupação. Para aumentar o teor de hidrogênio, o gás de síntese produzido é alimentado em um ou mais reatores de deslocamento de água/gás (*water-gas shift*), que convertem CO em H₂ (CIFERNO; MARANO, 2002).

Metanol

A síntese de metanol comercial envolve a reação de CO, H₂ e vapor sobre um catalisador de óxido de cobre-zinco na presença de uma pouca quantidade de CO₂ a uma temperatura por volta de 260 °C (500 °F) e uma pressão aproximada de 70 bar (1015 psi) (PAISLEY; ANSON, 1997).

Ciferno e Marano (2002) constata que para melhor uso do produto bruto do gás de síntese na síntese de metanol e limitar a extensão de um tratamento adicional do gás de síntese e reforma a vapor, é essencial manter:

- Uma relação H₂/CO₂ no mínimo em 2;
- Uma taxa de CO₂/CO por volta de 0,6 para prevenir a desativação do catalisador e manter o catalisador em um estado ativo reduzido;
- Baixas concentrações de N₂, CH₄, C₂⁺ etc para prevenir a acumulação de inertes dentro do circuito de síntese de metanol;
- Baixas concentrações de CH₄ e C₂⁺ para limitar a necessidade para uma posterior reforma a vapor.

Combustíveis sintéticos de Fisher-Tropsch (FT)

Combustíveis sintéticos como a gasolina e o diesel podem ser produzidos a partir do gás de síntese via processo de FT. O gaseificador precisa produzir gases com uma taxa de H_2/CO em torno de 0,5 a 0,7 recomendada como matéria para o processo de FT quando se usa catalisador de ferro (CIFERNO; MARANO, 2002).

Como ilustra a tabela 4, a composição pretendida do gás de síntese para aplicação como gás combustível é diferente daquela para combustíveis sintéticos ou síntese química. Um conteúdo alto de H_2 , baixo CO_2 , baixo CH_4 é necessário para produção de químicos e combustível. Já um teor alto de H_2 não é necessário para produção de energia, enquanto um suficientemente alto poder calorífico é fornecido através dos hidrocarbonetos de CH_4 e C_2^+ .

Tabela 04 – Características gás de síntese desejáveis para diferentes aplicações

Produto	Combustíveis Sintéticos	Metanol
FT Gasolina & Diesel		
H_2/CO	0,6 ^a	~2,0
CO_2	Baixo	Baixo ^c
Hidrocarbonetos	Baixo ^d	Baixo ^d
N_2	Baixo	Baixo
H_2O	Baixo	Baixo
Contaminantes	Enxofre <1ppm Poucos particulados	Enxofre <1ppm, Poucos partic.
Poder calorífico	Irrelevante ^h	Irrelev ^h
Pressão (bar)	~20-30	~50 (fase líquida) ~140 (fase vapor)
Temperatura (°C)	200-300 ^j 300-400	100-200

Produto	Hidrogênio	Gás combustível	
		Caldeira	Turbina
H ₂ /CO	Alto	Irrelev	Irrelev
CO ₂	Irrelev ^b	Não crítico	Não crítico
Hidrocarbonetos	Baixo ^d	Alto	Alto
N ₂	Baixo	Nota ^e	Nota ^e
H ₂ O	Alto ^f	Baixo	Nota ^g
Contaminantes	Enxofre <1ppm poucos particulados	Nota ^k	poucos partic. poucos metais
Poder calorífico	Irrelev ^h	Alto ⁱ	Alto ⁱ
Pressão (bar)	~28	Baixa	~400
Temperatura (°C)	100-200	250	500-600

(a) Depende do tipo de catalisador. Para um catalisador de ferro, o valor mostrado é satisfatório; para um catalisador de cobalto, deve ser usado próximo de 2,0.

(b) Deslocamento água/gás (*Water-gas shift*) terá que ser usada para converter CO para H₂; O CO₂ no gás de síntese pode ser removido ao mesmo tempo que é gerado pela reação de deslocamento água/gás (*water-gas shift*).

(c) Algum CO₂ pode ser tolerado se a razão H₂/CO estiver acima de 2,0 (como pode ocorrer com a reforma a vapor do gás natural); se o excesso de H₂ está disponível, o CO₂ será convertido em metanol.

(d) Metano e hidrocarbonetos mais pesados precisam ser reciclados para a conversão para gás de síntese e representam a ineficiência do sistema.

(e) N₂ reduzem o poder calorífico, mas o nível é irrelevante desde que o syngas possa ser queimado com uma chama estável.

(f) Água é necessária para a reação de deslocamento água/gás (*water-gas shift*).

(g) Pode-se tolerar níveis relativamente altos de água; o vapor algumas vezes adicionado para moderar a temperatura de combustão para controle do NOx.

(h) Desde que H₂/CO e os níveis de impurezas forem atendidos, o valor do poder calorífico não é crítico.

(i) A eficiência melhora a medida que se aumenta o poder calorífico.

(j) Dependendo do tipo de catalisador; os de ferro normalmente operam a temperaturas maiores que os catalisadores de cobalto.

(k) Quantidades pequenas de contaminantes podem ser aceitas.

Fonte: Ciferno e Marano (2002, tradução do autor)

3.2.6 Avaliação dos resultados: Condições de operação

As matérias-primas primárias, para as quais os dados de composição do gás de síntese do produto foram analisados estão identificados na tabela 6 (p. 18) do artigo. Estes foram tipicamente madeira, lodo de celulose, resíduo sólido municipal, combustíveis derivados de resíduos e palha de milho. A taxa de alimentação variou de 136 a 7.575 kg.h⁻¹ (300-16.665 lb.h⁻¹); pressões de 1 a 33 bar (14,7-480 psi); e alcançaram temperatura do reator de 725 a 1400 °C (1337-2550 °F). Abaixo, na tabela 5 citou-se apenas os resíduos sólidos municipais (RSU) (CIFERNO; MARANO, 2002).

A operação de gaseificadores de biomassa com pressão atmosférica ou superior tem tanto vantagens quanto desvantagens dependendo da aplicação que se busca para o gás de síntese. Gaseificadores pressurizados são complexos, custosos e têm um alto custo de capital, tanto para o gaseificador quanto seus sistemas de suprimento associados. Por outro lado, se o gás fornecido para uma turbina de combustão ou processo de conversão sob pressão, evita-se a necessidade dispendiosa de compressão do gás. As temperaturas de saída variam consideravelmente, refletindo na limpeza do gás e no sistema de recuperação do calor (CIFERNO; MARANO, 2002).

As principais fontes de oxigênio usadas na gaseificação de biomassa são o ar, oxigênio puro e vapor, ou as combinações destes. O ar é o oxidante mais usado, evitando a necessidade de produção de oxigênio, e mais de 70% dos gaseificadores que se pesquisou têm usado ar. Contudo, o uso de ar provoca um gás de poder calorífico baixo, de 4 a 6 MJ/Nm³ (107-161 Btu/ft³), adequado apenas para caldeira e motor. Algumas tecnologias de gaseificadores de resíduos sólidos urbanos conhecidas são a Purox da Union Carbide e a Sofresid/Caliqua e na tabela 05 estão apresentadas as condições conhecidas desses sistemas (CIFERNO; MARANO, 2002).

Tabela 05 – Condições individuais de operação dos gaseificadores de RSU

	Purox	Sofresid
Tipo	Leito fluidizado	Leito fluidizado
Matéria-prima principal	Resíduos sólidos urbanos	Resíduos sólidos urbanos
Rendimento (tonelada/dia)	181	195
Pressão (bar)	1	1
Temperatura (°C)	-	1300-1400
Gaseificante	O ₂	Ar
Gás de saída (m ³ /h)	-	33.960
Poder calorífico (MJ/Nm ³)	-	7,92

Fonte: Ciferno e Marano (2002).

3.2.7 Composição do gás de síntese

Ciferno e Marano (2002) afirmam que um grande número de parâmetros influenciam na composição, incluindo a matéria-prima, a pressão, a temperatura e o oxidante. Poucos estudos de gaseificação falharam em reportar o teor de alcatrão e outras impurezas no singás. A composição do gás de síntese proveniente do uso de resíduos sólidos municipais no gaseificador Purox está apresentada na tabela 06.

Tabela 06 – Composição do *syngas* derivado do uso de RSU como biomassa.

Purox	
Tipo	Leito fluidizado
Matéria-prima	Resíduos sólidos urbanos
H ₂	23,4
CO	39,1
CO ₂	24,4
H ₂ O	seco
CH ₄	5,47
C ₂ ⁺	4,93
Alcatrões	(em C ₂ ⁺)
H ₂ S	0,05
O ₂	-
NH ₃	-
N ₂	-
Taxa H ₂ /CO	0,6
Poder calorífico (MJ/Nm ³)	-

Fonte: Ciferno e Marano (2002).

3.2.8 Emissões

Apenas uma quantidade limitada de dados sobre emissões de gaseificadores de biomassa estão disponíveis. Alguns destes estão apresentados na tabela 07. Emissões são altamente variáveis e dependem do tipo de gaseificador, matéria-

prima, condições de processo (temperatura e pressão) e sistema de condicionamento do gás, Ciferno e Marano (2002). Por exemplo, sistemas indiretos de gaseificação geram emissões de gás de combustão a partir da combustão de combustíveis adicionais, coque (char), uma porção da biomassa alimentada, ou no caso de manufatura e tecnologia de conversão internacional (MTCI), gás natural (PAISLEY et al. 2001). Para Ciferno e Marano (2002), a gaseificação de resíduos sólidos municipais e lodo de esgoto resultam em cinzas contendo metais pesados. A maior preocupação com estas matérias-primas está no potencial de se filtrar metais pesados através do ambiente após o descarte das cinzas.

Tabela 07 – Emissões de gaseificação de biomassa

Tecnologia Sofresid	
Tipo de reator	Leito fluidizado
Matéria-prima	Resíduos sólidos urbanos
Resíduo líquido (alcatrão/óleo) (kg/kg biomassa)	0
Resíduos sólido (coque/cinza) (kg/kg biomassa)	10
Teor de alcatrão	Queimado
CO	-
NOx	120 ppm
SO ₂	79 ppm
Carbono orgânico	<10 ppm
NH ₃	-
H ₂ S	-

Fonte: Ciferno e Marano (2002).

3.2.9 Equipamento de suporte

Ciferno e Marano (2002) observa que a maioria das tecnologias de gaseificadores requerem secagem da matéria-combustível para um teor específico de umidade antes da gaseificação. Esta etapa requer energia e, portanto, diminui a eficiência global. A peletização é o processo pelo qual a biomassa é transformada em um compacto, denso, matéria de fácil manipulação, mas isto não é praticado ou necessário para a maioria dos gaseificadores de biomassa. A separação é usada primariamente ao manusear combustíveis derivados de rejeitos para separar os resíduos mais pesados e os mais leves. Redução de tamanho e pressurização estão especificados em vários sistemas de alimentação manual. Equipamentos, tal como o silo de armazenamento, transportadores, parafuso de avanço, funil com trava, sistemas de pesagens etc, que é necessário para quase, se não, todas as tecnologias de gaseificação consideradas.

3.2.10 Potencial de aplicações

Gaseificadores de leito fluidizado borbulhante (LFB)

Ciferno e Marano (2002) reconhece que a gaseificação em leito fluidizado borbulhante aquecido diretamente tem sido amplamente estudada entre as tecnologias consideradas. Ela tem sido operada em uma ampla faixa de condições, como temperatura, pressão e rendimento, usando uma variedade de biomassas como matéria-prima. Os gaseificadores de leito fluidizado são, provavelmente, a opção de menor custo capital entre as tecnologias de gaseificação de biomassa mais avançadas. Existe informação suficiente para conduzir um estudo-projeto conceitual destes sistemas.

Gaseificadores de leito fluidizado circulante (LFC)

A gaseificação em leito fluidizado circulante aquecido diretamente não tem sido estudada na mesma extensão da gaseificação em leito fluidizado borbulhante. Pouquíssimos experimentos têm sido realizados em pressões elevadas; e, assim como com os gaseificadores em leito fluidizado borbulhante, todos os resultados reportados são para temperaturas menores que 1000 °C. Operações em pressões

elevadas foram testadas, mas não para pressões tão altas quanto com gaseificadores de LFB (no máximo 18,75 contra 35,53 atm (19 contra 36 bar)). A redução do tamanho da partícula da matéria-combustível provavelmente será necessária para gaseificadores LFC, e a biomassa poderia ser seca para aumentar a temperatura de operação (CIFERNO; MARANO, 2002).

Gaseificadores em leito fixo (LFX)

Gaseificadores em leito fixo também têm sido demonstrados ao longo de um intervalo limitado de condições. Por causa da tendência deles para produzir largas quantidades de outros alcatrões ou coque (char) não-convertido, eles não têm sido as primeiras escolhas para serem desenvolvidos. Sua principal vantagem é a habilidade para manusear matéria-prima extremamente heterogênea como resíduo sólido urbano, e não deve ser descartada sua aplicação para resíduos-combustíveis (CIFERNO; MARANO, 2002).

Gaseificadores de aquecimento indireto

Os sistemas de gaseificação de biomassa por aquecimento indireto, tanto LFC (BCL/FERCO) quanto LFB (MTCI), estão num estágio precoce de desenvolvimento, sua flexibilidade para uma variedade de aplicações não tem sido explorada. Estas unidades têm sido apenas testadas sob pressão atmosférica. Eles são inerentemente mais complicados que os sistemas de aquecimento direto devido à necessidade de uma câmara de combustão separada, mas podem produzir um gás de síntese com um poder calorífico alto, ideal para aplicações combinadas de calor e energia. Isto está também refletido no seu alto custo capital. Mas, eles não requerem oxigênio ou ar como reagente para a gaseificação, uma vantagem em todas as aplicações, uma vez que uma instalação de oxigênio não é necessária (assim, uma penalidade de custo de capital e eficiência não é constituída por esta unidade), e a diluição do nitrogênio não ocorre (CIFERNO; MARANO, 2002).

Co-Gaseificação e Co-Produção

Como foi apontado anteriormente, a biomassa pode ser co-gaseificada com carvão. Um sistema combinado oferece significantes vantagens operacionais e ambientais para ambos, o carvão e a biomassa. Num tom similar, a co-produção de energia com combustíveis, químicos ou hidrogênio podem melhorar o desempenho dos sistemas de gaseificação de biomassa. Pureza baixa, teor de metano alto no gás de síntese poderiam ser um problema a menos para tal cenário (CIFERNO; MARANO, 2002).

3.2.11 A necessidade de avaliação dos dados

É necessário desenvolver mais trabalho para estabelecer os limites de operação para a maioria das tecnologias de gaseificação de biomassa. A maioria das demonstrações anteriores de gaseificador de biomassa tem sido para geração de processos como calor, vapor e eletricidade, e atividades de desenvolvimento atuais são focadas em produzir eletricidade mais eficientemente integrando o sistema de gaseificação com turbina a gás. As seguintes orientações de Pesquisa & Desenvolvimento para produção do gás de síntese para combustíveis, químicos e produção de hidrogênio, podem preencher a falta de dados identificada pelo autor (CIFERNO; MARANO, 2002):

- Gaseificadores LFC e LFB pressurizados acima de 20 bar com várias taxas de O₂ e vapor como co-alimentação;
- Todos os sistemas de gaseificação de biomassa, tanto LFB quanto LFC, a temperaturas maiores que 1200 °C;
- Todos os sistemas de gaseificação de biomassa numa ampla faixa de matéria-prima potencial;
- A co-gaseificação de biomassa/carvão em sistemas de gaseificação de carvão.

3.2.12 GASEIFICAÇÃO DE MADEIRA COMO BIOMASSA

Martínez et. al. (2011) em seu trabalho experimental de gaseificação da biomassa madeireira de eucalipto na forma cilíndrica com dimensões menores que 6 cm tanto em diâmetro quanto em altura e umidade em torno de 10,32%, no qual

trabalhou com um reator em fluxo descendente no leito móvel com suprimento de ar em dois estágios obteve em porcentagem de volume de CO, CH₄ e H₂ concentrações de 19,04, 0,89, 16,78% v, respectivamente, a um fluxo de ar de 20 Nm³.h⁻¹ e razão do fluxo de ar entre os primeiro e segundo estágios de 80%, obtendo nessas condições um gás com um poder calorífico baixo de 4.539 kJ.Nm⁻³.

Nas tabelas 8 e 9, os dados de análise do material:

Tabela 08 – Análise imediata e final da biomassa madeireira (base úmida)

Análise imediata (b.u.%)	
Cinzas	1,87
Voláteis	83,02
Carbono fixo	15,11
Análise final (b.u.%)	
Carbono	44,31
Hidrogênio	5,63
Nitrogênio	3,23
Enxofre	0,91
Oxigênio	44,05
LHV (kJ/kg)	18.140

Fonte: Martínez et al. (2011)

Tabela 09 – Características nominais do gaseificador descendente com suprimento de ar em duplo estágio

Característica	Valor	Unidade
Energia térmica	50	kW
Energia térmica específica	1200 $\pm$ 500	kW.m ⁻²
Consumo de biomassa (a 15% de umidade na base úmida)	12	Kg.h ⁻¹
Tamanho da biomassa	2-6	cm
Razão de equivalência (ER)	0,35	-

Fonte: Martínez et al (2011)

O gaseificador usado por Martínez et al. (2011) foi construído de aço carbono com revestimento interno de material refratário. Ao longo do reator estão arranjos seis termopares tipo K, que permanecem registrando as temperaturas do reator em diferentes pontos. Os termopares são projetados até a parede interna do reator, de forma a evitar possíveis problemas com o fluxo de biomassa à medida que ela é consumida. Contudo, este arranjo não favorece uma leitura confiável da temperatura, mas evita-se um dos maiores problemas na gaseificação em leito móvel: A formação de canais preferenciais (canalizando e colmatando). Desse modo para reduzir este fenômeno, um dispositivo de vibração no topo do gaseificador, acoplado com um temporizador, favorece uma distribuição e consumo homogêneo da biomassa dentro do reator. E além disso, outro vibrador também acoplado com um temporizador no fundo do gaseificador, permite a descarga das cinzas através da grade. O sistema de limpeza inclui um ciclone, trocadores de calor, e um filtro de manga.

Martínez et al. (2011) comprova que os resultados encontrados corroboram com os dados reportados na literatura para gaseificação de biomassa num reator descendente convencional. García-Bacaicoa et al.¹ (1994 apud MARTÍNEZ et al. 2011), em um reator tipo descendente com estreitamento e usando madeira como combustível, encontrou concentrações de 22,1%v (volume) de CO, 2,9%v de CH₄ e 13,4%v de H₂ para um poder calorífico baixo a médio em torno de 5.590 kJ.Nm⁻³. Bui et al. (1994), em um gaseificador descendente com estreitamento multi-estágio em um modo dos estágios obteve um poder calorífico de 3.720 kJ.Nm⁻³ sendo as composições de CO, CO₂, H₂ e CH₄ de, 17,6, 13,6, 10,7 e 1,2%v, respectivamente. Jain e Goss² (2000 apud MARTÍNEZ et al. 2011), com casca de arroz e um reator descendente do tipo estratificado obteve um gás com poder calorífico baixo de 4.000 kJ.Nm⁻³. Dogru et al.³ (2002 apud MARTÍNEZ et al. 2011), nos experimentos de gaseificação de cascas de avelã e também em um gaseificador Imbert (reator descendente com estreitamento) obteve um gás combustível com poder calorífico de 4.550 kJ.Nm⁻³ sendo que as concentrações de CO, CH₄ e H₂ foram 16,8 %v, 1,7 %v, e 14,12%v, respectivamente. Trabalhando em um gaseificador descendente com estreitamento, Pathak et al.⁴ (2008 apud MARTÍNEZ et al. 2011), com uma taxa consumo de madeira de 55 kg.h⁻¹ encontrou poder calorífico de 4.240 kJ.Nm⁻³ (obtido pelo método de Junker).

De acordo com Chen et al. (2009), as reduções das emissões de alcatrões em um gaseificador descendente em dois estágios são relacionadas aos radicais mais reativos produzidos em condições oxidativas devido à alimentação de ar diluído

¹ GARCÍA-BACAICOA, P.; BILBAO, R.; ARAUZO, J.; SALVADOR, M. L. Scale-up of downdraft moving bed gasifiers (25-300 kg/h) - design, experimental aspects and results. *Bioresource Technology*. 48:229-35. 1994.

² JAIN, A. K.; GOSS, J. R. Determination of reactor scaling factors for throatless rice husk gasifier. *Biomass Bioenergy* 18:249-56. 2000.

³ DOGRU, M.; HOWARTH, C. R.; AKAY, G.; KESKINLER, B.; MALIK, A. A. Gasification of hazelnut shells in a downdraft gasifier. *Energy*; 27:415-27. 2002.

⁴ PATHAK; B. S., PATEL; S. R., BHAVE; A. G., BHOI; P. R., SHARMA; A. M., SHAH; N. P. Performance evaluation of an agricultural residue-based modular throat-type down-draft gasifier for thermal application. *Biomass Bioenergy*. 32:72-7. 2008.

no segundo estágio de ar. Segundo Bhattacharya, Siddique e Pham(1999), a implementação de dois estágios de suprimento nos gaseificadores descendentes resulta num decréscimo nos valores de alcatrões nos gases produzidos, como também no aumento das concentrações de CO em comparação com o gaseificador descendente convencional simples estágio.

Velocidade superficial do gás

A velocidade superficial é considerada por muitos autores como o principal fator que determina a performance dos gaseificadores descendentes. De acordo com Reed e Das¹ (1988 apud MARTÍNEZ, 2011), a velocidade superficial tem um efeito importante na taxa de produção de gás, no conteúdo energético do gás, na taxa de consumo do combustível, na energia de saída e taxa de produção de coque (char) e alcatrões, e é independente das dimensões do reator. A baixa velocidade superficial resulta em uma lentidão relativa nas condições de pirólise principalmente favorecendo a obtenção de um gás com alta quantidade de alcatrão. E ao contrário, uma velocidade superficial alta provoca um aumento nas condições pirolíticas favorecendo a produção de coque (char) e gases com temperatura superior na zona em chamas. Ainda assim, existe ainda um efeito negativo considerável, dado o declínio do tempo de residência resultando numa desfavorável condição para a quebra do alcatrão quando o vapor do gás atravessa as zonas de combustão e gaseificação.

Foi observado por Fagbemi, Khezami e Capart² (2002 apud MARTÍNEZ, 2011) que o alcatrão nos gases pirolíticos da biomassa decresce pelo tempo de residência na faixa de 0,3-4 segundos, alcançando maior eficiência no craqueamento térmico a temperaturas maiores e tempos mais elevados.

Martínez (2011) encontrou que em relação à razão de equivalência (ER) também conhecida como fator de ar, o poder calorífico baixo do gás aumentou com

¹ REED, T. B.; DAS, A. Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems: solar energy research institute. US Department of Energy; 1988.

²FAGBEMI, L.; KHEZAMI, L.; CAPART, R. Pyrolysis products from different biomasses: application to the thermal cracking of tar. Applied Energy; 69:293-306. 2002.

sua redução e vice-versa. Porém, esse gaseificador apresenta uma estabilidade considerável no baixo poder calorífico do gás produzido para todas as vazões de ar estudadas (de 16 a $24 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), com valores entre 3.890 e $4.637 \text{ kJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$.

Eficiência fria e potência útil

Os valores de eficiência fria (η_c) e potência útil (E_{useful}) que obtiveram para a vazão total de ar na faixa estudada e de cada condição da razão da vazão de ar entre o primeiro e segundo estágios (AR) podem ser encontrados no artigo. A potência útil mostra uma mesma tendência ascendente para as AR de 0 e 80% (testes A e C): resultando em valores em torno de 42 e 44 kW, respectivamente para $22 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Além disso, a eficiência fria tem um comportamento com variações na faixa de 65 a 67%, indicando a robustez e estabilidade do gaseificador. Para um AR igual a 0% (teste A), a eficiência fria mostra um valor estável em torno de 66% na faixa entre 16 e $22 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Maiores vazões de ar guiam para uma redução na potência e eficiência do gás. A eficiência fria para AR de 40% (teste B), mostra um pico de 67,38% na vazão de $22 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Superiores vazões de ar indicam a tendência de redução devido ao poder calorífico baixo do gás. Também, para AR de 40%, a maior potência (46,63 kW) é alcançada em $24 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (ponto B5), apesar de, para esta condição de poder calorífico baixo do gás ser inferior comparando com o ponto anterior (B4), nesse caso, a vazão dos gases gerados compensa o teor energético inferior do gás produzido alcançando tal potência. Para AR igual a 80% na vazão total de ar de $20 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (onde foi obtido a menor concentração de CH_4) os valores de eficiência fria e potência útil apresentam valores de 67,93% e 40,57 kW, respectivamente. Segundo o autor, este fato indica que o gaseificador operando sob estas condições produz um gás combustível com boas características operando com uma eficiência superior (MARTÍNEZ, 2011).

3.2.13 REATOR COM LEITO FLUIDIZADO – 4FBR

Gaston et al. (2011 traduzido pelo autor) estudaram um novo reator de leito fluidizado com 102 mm de diâmetro (4FBR) e usaram para avaliar o efeito do tamanho da partícula da biomassa na produção de gases leves (CO , CO_2 , H_2 e CH_4) e compostos de alcatrão durante a gaseificação usando um agente gaseificante

inerte. Experimentos foram realizados em lote com carvalho branco moído em quatro tamanhos de esfera com diâmetro de 6, 13, 18 e 25 mm, em temperaturas do leito do reator de 500, 600, 700, 800 e 900 °C. Os componentes orgânicos foram caracterizados usando um espectrômetro de massa de feixe molecular (MBMS), enquanto gases leves foram medidos usando detectores de infravermelho não dispersivo (NDIRS).

Como resultado, os teores de gás leve aumentaram com a temperatura, mas, em seguida, atingiu-se um platô acima de 800 °C. A medida que o tamanho da partícula aumenta, é observada uma diminuição na formação de gases leves, acompanhada por um aumento na formação de coque (char). As medições dos compostos orgânicos presentes no gás de síntese foram realizadas utilizando um espectrômetro de massa de feixe molecular (MBMS). Estas medidas indicam que, quando o tamanho das esferas aumenta, a formação de alcatrão e hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP) aumenta. Estas observações enfatizam ainda mais a importância do papel das restrições de transporte de massa e calor para as partículas maiores na evolução dos produtos durante a gaseificação e suas possíveis implicações na economia do processo de gaseificação (GASTON et al., 2011).

Gaston et al. (2011) constatou que um dos maiores desafios na produção de biocombustíveis a partir da gaseificação e síntese é a formação de espécies com alto peso molecular, chamadas alcatrões, durante o processo de gaseificação. Alcatrões impedem a produção de gás de síntese e têm que ser removidos antes do passo de síntese do combustível para prevenir a desativação dos catalisadores e incrustações do equipamento no processo.

Os modelos de cinética globais que descrevem a conversão de biomassa para coque (char), gás, e alcatrão podem ser acoplados às equações de transporte de calor e massa para fornecer a taxa daquelas classes de produtos quando eles

liberam as partículas, Di Blasi¹; Miller e Bellan^{2,3} (2008; 1996 e 1997 apud GASTON et al. 2011), mas poucos estudos investigaram o elo entre os processos de intra-partículas e as quantidades atuais de alcatrão na escala do reator. Experimentos de gaseificação a temperaturas relativamente baixas (até 800 °C) por Herguido, Corella e Gonzalez-Saiz⁴ (1992 apud GASTON et al. 2011) sugerem uma produção alta de gás e redução de alcatrão para partículas menores, mas o uso de matérias-primas diferentes impede uma conclusão definitiva. Estudos sistemáticos demonstraram experimentalmente que a redução do tamanho da partícula leva para uma melhoria significativa nos parâmetros de gaseificação, especialmente em termos de quantidade de alcatrão e eficiência do gás produzido (JAND; FOSCOLLO⁵, 2005; RAPAGNÀ; CELSO⁶, 2008; HERNANDEZ; ARANDA-ALMANSA; BULA⁷, 2010 apud GASTÓN et al. 2011).

O aparato denominado 4FBR foi projetado para investigar as gaseificação e pirólise em escala de bancada para permitir pelo escaneamento rápido das condições experimentais e habilitar um entendimento detalhado das condições do reator e seus impactos nos produtos. O reator está integrado numa caçamba

¹ DI BLASI, C. **Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis**. Prog. Energy Combust. Sci. 34 (1), 47–90. 2008.

² MILLER, R. S.; BELLAN, J. **Analysis of reaction products and conversion time in the pyrolysis of cellulose and wood particles**. Combust. Sci. Technol. 119, 331–373. 1996.

³ _____. **A generalized biomass pyrolysis model based on superimposed cellulose, hemicellulose and lignin kinetics**. Combustion Science and Technology. 126 (1), 97–137. 1997.

⁴ HERGUIDO, J.; CORELLA, J.; GONZALEZ-SAIZ, J. **Steam gasification of lignocellulosic residues in a fluidized bed at a small pilot scale: Effect of the type of feedstock**. Industrial & Engineering Chemistry Research. 1992.

⁵ JAND, N.; FOSCOLO, P. U. Decomposition of wood particles in fluidized beds. Industrial & Engineering. Chemistry. Research, 44 (14), 5079–5089. 2005.

⁶ RAPAGNÀ, S.; DI CELSO, G. M. Devolatilization of wood particles in a hot fluidized bed: Product yields and conversion rates. Biomass Bioenergy, 32 (12), 1123–1129. 2008.

⁷ HERNANDEZ, J. J.; ARANDA-ALMANSA, G.; BULA, A. Gasification of biomass wastes in an entrained flow gasifier: Effect of the particle size and the residence time. Fuel Processing Technology. 91 (6), 681–692. 2010.

portável contendo todos os equipamentos necessários para sua operação: tubulação, aquecedores e isolamento, equipamentos de limpeza de gases, instrumentação, equipamentos de sistema de controle, e um painel de distribuição de energia. Este sistema está projetado para operar sob temperaturas internas até 950 °C e pressões até 80 kPa. Todas as partes aquecidas do reator são feitas de Inconel ou Incoloy para suportar as altas temperaturas e eventual exposição a gases contendo enxofre; da mesma forma, todas as conexões no reator são flangeadas ou soldadas. De Incoloy/cerâmica, juntas em espiral se encaixam entre cada flange, com duas juntas em ambos os lados da placa de distribuição na flange inferior (GASTÓN et al. 2011).

Gaston et al. (2011) observou que a 500 °C, a maioria do material volátil é vaporizado das partículas na biomassa mas evoluiu-se principalmente como vapores orgânicos condensáveis com apenas uma pequena produção de gases leves. À medida que a temperatura aumentou, esses produtos pirolíticos foram craqueados e mais gases leves foram formados. A 800 e 900°C, retornos decrescentes foram vistos enquanto se aumenta a temperatura de reação, na tentativa de aumentar a produção de gás leve. Estes resultados foram consistentes com Carpenter et. al. (2010) que encontrou que o total de produção de gases leves aumenta com o aumento da temperatura até estabilizar na faixa de 750-870 °C, para partículas menores que as deste trabalho. A produção total de gás aparentou reduzir com o aumento do tamanho da esfera, embora as análises estatísticas mostram que pode-se apenas verificar isto para 600 °C e o menor contra dois tamanhos acima para 500 e 700 °C, não encontrou-se diferenças entre o tamanho das partículas para 800 e 900 °C. Nas mais altas temperaturas, a taxa de transferência de calor e massa aumentaram, partículas aqueceram mais rápido e se formaram menos alcatrões e coque (char). Como resultado, o tamanho da partícula tem menos influência na evolução dos gases leves num reator nas mais altas temperaturas.

Os dados de coque (char) indicam que com significância estatística, as taxas de aquecimento mais rápidas produzem menos coque (char). Para as partículas maiores e temperaturas menores, o carbono tende a formar mais coque (char), e isso, em última análise reduz a produção de gases leves. Estes resultados para produção coque (char) e gás leve, concordam com as observações de outros,

Herguido, Corella e Gonzalez-Saiz¹; Jand e Foscolo²; Rapagnà et al.³ (1992; 2005; 2008 apud GASTÓN et al. 2011), como se descobriu bem as diferenças entre pirólise lenta para produzir carvão (*charcoal*) contra a pirólise rápida para produzir óleos.

Gastón et al. (2011) concluíram que a formação de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos deve estar a ocorrer no interior da partícula, para formar as concentrações mais elevadas para as partículas maiores, dado que, as reações das biomoléculas fora da partícula iriam ter velocidades de reação mais lenta com base na concentração.

3.2.14 REATOR DE LEITO FLUIDIZADO BORBULHANTE ALIMENTADO COM CASCAS DE ARROZ

Behaine e Martinez (2014 tradução do autor), na Colômbia, trabalharam num reator de leito fluidizado borbulhante (com capacidade nominal de 150 kWh) alimentado com cascas de arroz através de um sistema automático de parafuso transportador que tem uma câmara de arrefecimento tanto externamente quanto internamente para evitar a pirólise e carbonização da matéria-prima antes de entrar no reator desenvolvido para trabalhar em condições de gaseificação. Este sistema foi aferido usando um projeto estatístico de experimentos baseado na metodologia de superfície de resposta, de forma a obter correlações empíricas para traçar o comportamento de operação em termos de razão de equivalência (ER) e o estado normal da velocidade de fluidização (U_{nc}). O *baixo* poder calorífico, a produção volumétrica de gás, a potência do gás e a eficiência fria de gaseificação foram as variáveis de saída. Condições ótimas com respeito, a uma vazão de alimentação da

¹ HERGUIDO, J.; CORELLA, J.; GONZALEZ-SAIZ, J. **Steam gasification of lignocellulosic residues in a fluidized bed at a small pilot scale. Effect of the type of feedstock.** Industrial & Engineering Chemistry Research.31 (5), 1274–1282.1992.

² JAND, N.; FOSCOLO, P. U. Decomposition of wood particles in fluidized beds. Ind. Eng. Chem. Res. 2005, 44 (14), 5079–5089.]

³ RAPAGNÀ, S.; DI CELSO, G. M. Devolatilization of wood particles in a hot fluidized bed: Product yields and conversion rates. BiomassBioenergy.32 (12), 1123–1129. 2008.

casca de arroz em $56,0 \text{ kg.h}^{-1}$, e temperatura $828 \text{ }^{\circ}\text{C}$, tanto o baixo poder calorífico ($3,78 \text{ MJ/Nm}^3$) e a potência do gás ($73,82 \text{ kW}$) foram obtidas a uma ER de 0,24 e U_{nc} de $0,19 \text{ m/s}$, e também $36,51 \%$ de eficiência fria, $1,25 \text{ Nm}^3.\text{kg}^{-1}$ na produção de gás. Contudo, a altura do leito fixo inicial de inertes exige que seja maior de modo que aumente as condições de transferência de massa e energia e por conseguinte, a conversão do carbono. As correlações estatísticas obtidas foram consideradas aceitáveis levando em conta a complexidade do fenômeno de gaseificação no leito fluidizado. Os resultados são considerados como uma base para projetar unidades de geração de energia descentralizadas em pequena escala tendo como matéria-prima a casca de arroz.

Behaine e Martinez (2014), a partir dos resultados experimentais, observaram que U_{nc} de $0,19 \text{ m/s}$ e ER de 0,24 aparentam serem as condições ótimas em relação as concentrações de gases combustíveis resultando em $14,07 \%$ de CO, $5,58 \%$ de H_2 e $3,93 \%$ de CH_4 , além de $54,37 \%$ de N_2 , $10,69 \%$ de CO_2 , $0,45 \%$ de O_2 e $10,91 \%$ de H_2O .

A tecnologia de leito fluidizado para a valorização energética dos resíduos de biomassa, como casca de arroz, bagaço de cana-de-açúcar e serragem, tem experienciado um desenvolvimento considerável nos últimos anos. Reatores de leito fluidizado têm sido altamente provados como uma tecnologia eficiente para altas capacidades específicas e foram considerados como a melhor opção para converter biomassa em energia devido a sua flexibilidade de combustíveis e pela possibilidade de alcançar uma operação limpa (SINGH; MOHAPATRA; GANGACHARYULU¹, 2008 apud BEHAINE; MARTINEZ, 2014). Algumas das principais características da tecnologia de leito fluidizado são: distribuição homogênea da temperatura na câmara do reator, bom contato superfície gás-sólido, ampla tolerância para variações na qualidade do combustível, fácil de ligar e desligar, rápido aquecimento, alta eficiência

¹ SINGH R. I.; MOHAPATRA S. K.; GANGACHARYULU D. Studies in an atmospheric bubbling fluidized-bed combustor of 10 MW power plant based on rice husk. Energy Convers Manage. 49:3086–103. 2008.

na conversão do carbono e investimento relativamente baixo (KUNII; LEVENSPIEL¹, 1991; ANTHONY², 1995; BASU³, 2006 apud BEHAINE; MARTINEZ, 2014). Adicionalmente, esses tipos de reatores apenas oferecem vantagens importantes quando são usados para gaseificação de baixa densidade, alto conteúdo de cinzas e irregulares/complexas biomassas como cascas de arroz. Reatores convencionais como os de leito fixo não são adequados para o processamento de cascas de arroz dadas as propriedades físico-químicas e o baixo ponto de fusão para as cinzas. Neste sentido, a gaseificação, além de permitir a produção de produtos gasosos, para energia e/ou geração térmica ou para a síntese de componentes químicos, geralmente guiam para uma temperatura baixa de reação em comparação a combustão. Então, os problemas associados com sinterização e aglomeração de cinzas durante a combustão são prevenidos (NATARAJAN; NORDIN; RAO⁴, 1998; MANSARAY et al.⁵, 1999 apud BEHAINE; MARTINEZ, 2014).

Mansaray et al.⁵(1999 apud BEHAINE; MARTINEZ, 2014) demonstraram os efeitos da velocidade de fluidização (U_f) e razão de equivalência (ER) usando uma placa distribuidora dupla e obtiveram que a uma U_f de 0,22 m/s e ER de 0,25, as concentrações volumétricas de produção de gás foram 4% de H_2 , 5% de hidrocarbonetos (CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 e C_2H_6), 15% de CO_2 , 20 % de CO e 57% de N_2 .

¹KUNII; LEVENSPIEL. **Fluidization Engineering**. 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann; 1991.

²ANTHONY. **Fluidized bed combustion of alternative solid fuels; status successes and problems of the technology**. Progress in Energy and Combustion Science. 1995; 21:239–68.

³BASU. **Combustion and Gasification in Fluidized Beds**. Florida: CRC/Taylor & Francis Group LLC; 2006.

⁴NATARAJAN; NORDIN; RAO. **Overview of combustion and gasification of rice husk in fluidized bed reactors**. Biomass Bioenergy 1998; 14:533–46.

⁵MANSARAY; GHALLY; AL-TAWEEL; HAMDULLHPUR; UGURSAL. **Air gasification of rice husk in a dual distributor type fluidized bed gasifier**. Biomass Bioenergy 1999; 17:315–32.

Seleção de variáveis de entrada e saída

Gómez-Barea, Arjona e Ollero¹ (2005 apud BEHAINE; MARTINEZ, 2014) constataram que para um gaseificador não aquecido externamente, há apenas duas variáveis importantes que podem ser variadas de uma forma independente entre uma gama limitada de opções: o rendimento da biomassa e a taxa de fluxo de ar. Estes dois parâmetros determinam a razão de equivalência e a velocidade superficial do gás. Como sabe-se bem, a razão de equivalência é uma das variáveis operacionais mais importantes na gaseificação de biomassa utilizando ar como agente gaseificante. A razão de equivalência (ER) é definida como a taxa de ar-combustível usado atualmente no processo ($\text{Nm}^3.\text{kg}^{-1}$), dividida pela taxa de ar-combustível nas condições estequiométricas de combustão ($\text{Nm}^3.\text{kg}^{-1}$), usualmente varia entre 0,20 e 0,40, segundo Lora et al. (2012). De acordo com Natarajan et al.² (1998 apud BEHAINE; MARTINEZ, 2014) o limite inferior de ER é decidido pela quantidade mínima de ar necessária para queimar uma fração de combustível, e assim para liberar calor suficiente para suportar as reações endotérmicas envolvidas na gaseificação. De outra forma, o limite superior é determinado pela análise combinada, considerando a temperatura do reator (de forma a evitar o ponto de fusão das cinzas), a qualidade de fluidização, o poder calorífico do gás e o conteúdo de alcatrões no gás produzido.

Behaine e Martinez (2014) reconhecem que a velocidade de fluidização é a principal variável envolvida nos processos de fluidização e está ligada com o tempo de residência aparente, tanto do coque quanto dos voláteis dentro do reator, e também com as taxas de transferência de massa e calor. Neste trabalho a velocidade superficial do ar na zona densa do leito a 101,3 kPa e 273,1 K tem sido considerada e designada como velocidade normalizada de fluidização (U_{nc}).

As variações nas condições de processo foram atribuídas a várias razões, tal como a composição das cascas de arroz, as propriedades dos materiais inertes que

¹ GÓMEZ-BAREA A., ARJONA R., OLLERO P. **Pilot-plant gasification of olive stone: a technical assessment**. Energy Fuels 19:598–605. 2005.

² NATARAJAN; NORDIN; RAO. **Overview of combustion and gasification of rice husk in fluidized bed reactors**. Biomass Bioenergy 1998; 14:533–46.

conduzem a condições diferentes de fluidização e o projeto do gaseificador (isolamento, placa distribuidora, ponto de alimentação da matéria-prima) (BEHAINE; MARTINEZ, 2014).

3.2.15 Biomassa na secagem de produtos agrícolas via gaseificação com combustão adjacente dos gases produzidos

Silva, Cardoso Sobrinho e Saiki (2004) estudaram a viabilidade do uso de um gaseificador/combustor que utiliza tocos de eucalipto, resíduos de serraria, cavacos de lenha e sabugo de milho como combustível na secagem de produtos agrícolas. Como teste do sistema, o café foi secado a partir da umidade inicial de 54,5% b.u. (base úmida) até $11,1 \pm 1,6\%$ b.u., utilizando cavacos de lenha. A temperatura do ar de secagem foi de 60 °C, pressão estática do ar na saída do ventilador de 9 mmca e velocidade de $46,3 \text{ m}^3\cdot\text{min}^{-1}$. Observaram que o gaseificador, usando, consumiu entre 15,3 e $18,8 \text{ kg h}^{-1}$ de biomassa, que o equipamento é viável para a secagem de café despulpado e para outros produtos agrícolas, não o impregnou o café com fumaça ou outras partículas geradas nas fornalhas de fogo direto, e que todos os combustíveis de biomassa testados são viáveis na utilização do sistema via gasificação com adjacente combustão dos gases gerados.

3.3 Biomassa

A biomassa é a matéria orgânica de seres que foram mortos a pouco tempo, incluindo matéria vegetal de árvores, gramíneas e colheita agrícola. A composição química da biomassa varia dependendo da espécie, mas basicamente consiste de alto, mas variável, teor de umidade, uma estrutura fibrosa consistindo de lignina, carboidratos ou açúcares, e cinzas Turn¹ (1999 apud CIFERNO; MARANO, 2002 tradução do autor). A biomassa é um material bastante heterogêneo nas suas condições naturais e possuem um poder calorífico menor que o do carvão. Na gaseificação, o alto teor de oxigênio e umidade resultam num poder calorífico baixo

¹ TURN, S.Q. **Biomass integrated gasifier combined cycle technology III: Application in the cane sugar industry.**Int. Sugar JNL, 1999, Vol. 101, NO. 1207.

para o gás de síntese produzido, tipicamente $<2,5 \text{ MJ/m}^3$ (67 Btu/ft^3). Isto gera problemas para os combustores “downstream” (fluxo descendente) que são normalmente projetados para combustíveis com consistente poder calorífico de médio a alto (CIFERNO; MARANO, 2002 tradução do autor)

3.3.1 Bagaço de cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é uma gramínea pertencente ao gênero *Saccharum*, proveniente da Nova-Guiné e foi levada para o sul da Ásia, onde foi amplamente usada na forma de xarope, sendo que a primeira evidência da utilização do açúcar sólido foi no ano 500, na Pérsia. Atualmente, a cana é a principal matéria-prima para a fabricação do açúcar e etanol. Dos projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), cerca de 30% dos créditos de carbono de energia renovável do Brasil vêm da co-geração de bagaço (UNICA, 2011).

AGUIAR FILHO, 2008, cita que o bagaço da cana-de-açúcar é resultante do processo de moagem do colmo extraído para a obtenção do caldo que passa por processos até a obtenção de açúcar e álcool. Para cada tonelada de cana-de-açúcar colhida, aproximadamente 250 kg de bagaço é produzido, correspondendo a 30% do total de cana moída. O bagaço é um subproduto do qual ficam apenas alguns constituintes do material original e, no caso da cana-de-açúcar, resta a fibra e alguma quantidade de açúcar. Na maioria das usinas, o bagaço resultante é queimado para co-gerar energia para a própria usina, entretanto cerca de 40 a 50 kg por tonelada de cana-de-açúcar moída não é utilizada sendo preocupando em termos de espaço e material poluente. A composição química do bagaço varia de acordo com vários fatores, dentre eles, a variedade da cana, o tipo de solo de plantio, as técnicas de colheita e de manuseio. A tabela abaixo mostra a composição média característica do bagaço de cana-de-açúcar.

Tabela 10 – Componentes do bagaço de cana-de-açúcar

Componentes	Bagaço de cana-de-açúcar (in natura)	
	%	Observações
Fibra ou bagaço	45	Fração sólida orgânica insolúvel
Sólidos insolúveis	2 a 3	Fração sólida orgânica (terra, pedras e materiais estranhos oriundos da colheita e do solo)
Sólidos solúveis	2 a 3	Fração que se dissolve na água, composta por sacarose, não extraída na usina
Água	50	Retirada do bagaço (retirada por mecanismos de adsorção ou capilaridade)

Fonte: SEBRAE (2006)

Tabela 11 – Análise de potencial do bagaço de cana-de-açúcar como matéria-prima para o gaseificador

Composto	(%base seca)
Carbono – C	48 %
Hidrogênio – H	6 %
Nitrogênio – N	-- %
Oxigênio – O	42 %
Enxofre – S	-- %
Cinzas	4 %
Umidade	1%
Voláteis	80 %
Carbono fixo	15 %
Poder calorífico superior – PCS	17 MJ/kg

- As composições estão aproximadas e podem não somar 100% exatos.

- O teor de umidade da biomassa reportada é para matéria-prima seca

Fonte: Ciferno e Marano (2002)

3.3.2 Resíduos Sólidos

O desenvolvimento de um país está diretamente relacionado ao aumento do consumo energético e, conseqüentemente, ao crescimento da geração de lixo urbano por habitante. O resíduo se torna problema quando a capacidade de tratamento adequado é ultrapassada (JARDIM; WELLS¹, 1995, apud GONÇALVES et al., 2009).

Todo e qualquer tipo de material produzido nas cidades, proveniente de atividades humanas e que são lançados no ambiente é classificado Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). A composição desses resíduos pode variar conforme as características de cada cidade (CALDERONI², 1997, apud GONÇALVES et al., 2009)

A quantidade gerada de RSU depende de vários fatores, como os hábitos e costumes da sociedade, entretanto algumas bibliografias permitem uma estimativa da geração *per capita* com base no número de habitantes, conforme apresentado na Tabela 12. Nem todos os materiais potencialmente recicláveis possuem mercado atualmente, seja por inviabilidade tecnológica ou econômica. E nem todo material orgânico é biodegradável (FEAM, 2012).

Mesmo a compostagem precisa ser bem planejada, por exemplo, se a oferta exceder a demanda como é na maioria dos casos, seu uso em recuperação de áreas degradadas apesar de uma boa opção pode acarretar problemas de logística. Além disso, a incineração de resíduos combinada com a produção de energia elétrica têm uma eficiência de conversão baixa. Isto implica que o potencial energético dos resíduos de biomassa e outros resíduos é mal utilizado. No entanto, movido a biomassa, um gaseificador integrado de ciclo combinado de tecnologia (BIGCC) é uma alternativa promissora para o tratamento de resíduos orgânicos. O potencial de elevada eficiência em comparação com a queima de massa e os custos

¹JARDIM, N. S.; WELLS C. **Lixo municipal - Manual de gerenciamento integrado**. São Paulo: IPT/CEMPRE, 1995. 59p.

²CALDERONI, S. **Os bilhões perdidos no lixo**. São Paulo: Humanitas, 1997, 343p.

potencialmente baixos de investimentos têm sido demonstrados em vários estudos. Esta tecnologia pode, portanto, contribuir significativamente para a mitigação das emissões de CO₂ (FAAIJ et al. 1997 tradução do autor).

Tabela 12 – Geração média per capita de resíduos sólidos urbanos no Brasil.

Tamanho da cidade	População urbana (hab)	Geração <i>per capita</i> (kg/hab/dia)
Pequena	Até 30 mil	0,50
Média	30 a 500 mil	0,50 a 0,80
Grande	500 mil a 5 milhões	0,80 a 1,00
Megalópole	> 5 milhões	> 1,00

Fonte: Monteiro et al. (2001)

Na fração reciclável estão inclusos alguns materiais também formados por substâncias orgânicas, como papel, papelão e plásticos, de interesse nas tecnologias de aproveitamento energético, pois, apesar de terem potencialidade para a reciclagem, não possuem mercado, por razões como sujeidade ou tecnologia viável. E também alguns materiais de interesse, como couro, trapos e madeira (FEAM, 2012). A seguir na figura 06 está um diagrama que representa o passo para seleção do material a ser utilizado no sistema gaseificador.

Figura 06. Diagrama de blocos dos Resíduos Domiciliares (RD)

O estímulo ao consumo e à produção em larga escala na sociedade atual, gera grandes quantidades de RSU, dentre os quais se encontram os Rejeitos de Resíduos Sólidos Urbanos (RRSU) em diversos setores do mercado, cujo destino diz respeito aos aterros municipais Tillman; Rossi e Vick¹, (1989 apud GONÇALVES et al., 2009).

Segundo o MMA (2011), em 2008, 29% dos municípios no Brasil faziam a disposição final em aterros sanitários, ou seja, a maioria deles (71%) ainda dispõe seus resíduos e rejeitos em aterros controlados e lixões. Com relação aos aterros controlados, o país possuía ainda 1.310 unidades distribuídas em 1.254 municípios, sendo que cerca de 60% estão na região Sudeste.

No Brasil, apenas em 766 municípios (cerca de 14%) operavam programas de coleta seletiva. Do material selecionado tem-se 17,4% de rejeitos (CEMPRE, 2012). O aproveitamento de biomassa como fonte energética primária para geração de eletricidade e, completando a economicidade do processo, calor, é uma alternativa completamente condizente com a realidade (CENBIO, 2002).

Como as fontes de combustíveis renováveis ou “limpas” de energia, em geral, necessitam de grandes áreas para sua capacitação, por serem de baixa densidade energética, a utilização dos resíduos aparece como condição inicial importante na geração termoelétrica com biomassa, pois, além de apresentar um custo zero ou até negativo nos casos de despoluição e manejo do resíduo, seu aproveitamento faz-se quase que exclusivamente junto à fonte geradora (CENBIO, 2002).

A composição gravimétrica dos RSU, bem como seu poder calorífico (indica a capacidade potencial de um material liberar determinada quantidade de energia quando submetido à queima), pode ser influenciada por vários fatores, tais como o número de habitantes, poder aquisitivo, nível educacional, hábitos e costumes da população, condições climáticas e sazonais, mudanças na política econômica do país e na política nacional de resíduos sólidos (FEAM, 2012).

¹ TILLMAN; ROSSI; VICK. Incineration of municipal and hazardous solid wastes. New York: Academic Press, 1989.184p.

3.4 Aproveitamento Energético de Resíduos

Segundo o Jornal da Ciência (2012), os combustíveis renováveis vão ganhar espaço na matriz energética. Dados indicam que, para produzir 1 TWh, o setor elétrico brasileiro emite cerca de 8 vezes menos do que o setor elétrico dos Estados Unidos, 5 vezes menos que o europeu e 12 vezes menos que o da China. Além de outras fontes renováveis, o potencial técnico a partir da biomassa de cana-de-açúcar deve superar os 10 GW médios até 2021, dos quais cerca 1,2 GW médios contratado nos leilões e com início de suprimento até 2016, segundo o plano Decenal do Governo Federal. O potencial dessa fonte está localizado em São Paulo, Goiás, Mato Grosso do Sul e Paraná.

O aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos(RSU), desde que utilize rotas tecnológicas apropriadas e devidamente analisadas quanto aos riscos de implementação, é uma alternativa ambientalmente correta de tratamento desses resíduos e uma oportunidade de negócios (FEAM, 2012).

Conforme Decreto Federal 7.404/10 que regulamenta a PNRS, a recuperação energética dos resíduos deverá ser ainda disciplinada em ato conjunto dos Ministérios do Meio Ambiente, de Minas e Energia e das Cidades, exceto quanto ao aproveitamento energético dos gases gerados na biodigestão e na decomposição da matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários (FEAM, 2012).

A PNRS estabelece que “poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo Órgão Ambiental”, como consta no parágrafo 1º, art 9º da lei 12.305/2010 (FEAM, 2012).

Como instrumentos econômicos da Política Nacional estão previstas várias medidas indutoras ao aproveitamento energético de resíduos, dentre elas:

- Incentivos fiscais, financeiros e creditícios;
- Cessão de terrenos públicos;
- Subvenções econômicas;
- Fixação de critérios, metas e outros dispositivos complementares de sustentabilidade ambiental para as aquisições e contratações públicas;

– Apoio à elaboração de projetos no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL ou quaisquer outros mecanismos decorrentes da Convenção Quadro de Mudança do Clima das Nações Unidas¹ (FEAM, 2012).

As alternativas de geração de energia através de RSU que resultam em reduções adicionais de emissões de GEE são passíveis de gerar créditos de carbono, uma vez que aprovadas no âmbito do MDL. Cada uma das rotas tecnológicas apresenta eficiências individuais, portanto, em cada tecnologia a quantidade de lixo consumida evita certa quantidade de emissões (Tabela 13). No Brasil, a grande maioria dos projetos implantados utiliza o biogás de aterro como fonte geradora de energia (FEAM, 2012).

Tabela 13 – Emissões evitadas por tecnologia.

	Gás do lixo (GDL)	Incineração	Digestão acelerada (DRANCO)	Biomassa- energia- materiais (BEM)
t lixo/MWh	4,2	1,3	2,8	2,1
Emissão evitada pelo consumo do lixo (tCO ₂ eq/MWh)	5,41	1,50	3,61	0,55*
Emissão evitada pela substituição do gás natural (tCO ₂ eq/ MWh)	449	449	449	449
Emissão evitada (tCO ₂ eq/ MWh) total	5,87	1,95	4,06	1,0

*Só 20% da matéria-prima é transformada em celulignina.

Fonte: Tomalsquim² (2003 apud FEAM 2012).

¹ Convenção Quadro de Mudança do Clima das Nações Unidas (UNFCCC): criada em 1992 durante a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento com o objetivo de reunir países em um esforço conjunto para estabilizar as concentrações de gases de efeito estufa, em níveis que não resultem em uma mudança do clima perigosa. Seu braço executivo é a Conferência das Partes (COP), que se reúne anualmente.

²TOLMASQUIM, M. T. **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Montagem do experimento

O protótipo gaseificador foi montado parcialmente na Oficina Mecânica da EESC-USP e está sendo desenvolvido no laboratório de Hidráulica Ambiental no CCEAMA- USP (antigo CRHEA-USP) que se localiza ao lado da represa no Broa que faz parte do município de Itirapina-SP.

O corpo do gaseificador é basicamente uma caixa armazenadora de resíduos, uma tubulação com um parafuso transportador, um tubo flangeado como reator de combustão com uma chapa de metal frontal que serve como tampa para controle da entrada dos gases e conexões para saída dos gases, tem-se, também, uma tubulação para os gases com o sistema de sucção e resfriamento deles. Este corpo do sistema está adaptado a uma estrutura de cantoneiras com rodízios podendo movimentar o sistema para fora do galpão de forma a operar com segurança, reduzindo o risco de incêndio, além de evitar que se impregne o ambiente com fumaça.

Após montar a primeira configuração do equipamento:

- 1) Foi testado o funcionamento do parafuso helicoidal, sem realizar a queima do resíduo, para verificar falhas de deslocamento da matéria-prima no sistema, nesse processo trocou-se várias vezes o jogo de polias em v com correia e optou-se pelo uso de polia dentada com corrente, o qual se utiliza atualmente e tem sido efetivo.
- 2) Trabalhou-se na queima sem nenhuma coleta para verificar se haviam eventuais problemas de escape de gases nas juntas, se há perda excessiva de calor, a necessidade de isolamento térmico, dilatação térmica prejudicial ao deslocamento, desgaste e corrosão do ferro.

Primeiramente, os testes foram feitos com material seco para testar a movimentação no helicóide, tal como, carvão ativado em pó, resíduo de varrição do jardim (folhas secas, pequenos galhos, palha etc.) e, por último, bagaço de cana-de-açúcar. Com esses materiais, foram feitas regulagens de velocidade e admissão necessária de ar. O bagaço-de-cana apresentou melhor desempenho no transporte e na queima, decidiu-se que ele seria o material base, e se possível seria testado

uma mistura dele com os rejeitos da coleta seletiva triturados. Utilizou-se o bagaço-de-cana com as respectivas análises dos gases. Verificou-se a quantidade de líquido (alcatrão e água) que poderá ser condensada após o resfriamento para poder purgá-lo adequadamente, antes da bomba de sucção.

A caracterização da biomassa se deu a partir dos autores Arteaga-Pérez, et al. (2013) que obtiveram esses valores para as análises físico-químicas da biomassa apresentados na tabela 14, os quais se repetem e vários outros trabalhos. Tem-se, ainda que, o poder calorífico inferior (PCI) do bagaço de cana com 50% de umidade é 2.130 kcal/kg (EPE, 2012):

Tabela 14 –Análise final e imediata do bagaço

Análise final dos elementos	Bagaço da cana-de-açúcar (% b.u.)
Carbono	48
Hidrogênio	6,2
Oxigênio	43,1
Nitrogênio	0,4
Enxofre	0
Cinzas	2,3
Análise imediata das propriedades	
Carbono fixo	14,7
Voláteis	47,8
Umidade	35
Cinzas	2,5

Fonte: Arteaga-Pérez, et al. (2013)

4.2 Sequência de funcionamento

O funcionamento se faz a partir da caixa armazenadora (96 L) que tem parte do helicóide com um passo de 8,3 cm e move-se a 23,7 cm/min no fundo que é onde esses resíduos caem, ele é movido por um conjunto motor-redutor com transmissão por polias dentadas e corrente, sendo transportados e pressionados para dentro do reator cilíndrico (46,2 L) que conta com uma tampa na outra extremidade que bloqueia a saída da fumaça e auxilia na entrada de ar. A admissão do ar se faz por sucção para dentro do reator de combustão, ou seja, a pressão relativa dentro do tambor é ligeiramente negativa. Na saída dos gases do reator está instalado um sistema de bombeamento a vácuo, que funciona com um exaustor simples que ao succionar a fumaça a 0,74 Nm³/h (na tensão 110v), faz com que esta passe por 4 tubulações de cobre com 13 mm de diâmetro, conectadas por luvas rosqueáveis nas duas pontas. Após essa tubulação de cobre se encontra um trocador de calor que faz um pré-resfriamento dos gases utilizando água abastecida por uma mangueira flexível ligada na conexão inferior do trocador de calor que circula no interior da sua parede externa e sai por outra mangueira flexível na parte superior. Os gases continuam por uma tubulação com diâmetro de 32 mm até passar pelo exaustor e chegar ao amostrador do gás, uma tubulação em PVC com 32 mm de diâmetro com válvulas nas 2 pontas e um septo para cromatografia instalado na região central.

De acordo com Wander et al.¹ (2004 apud LORA et al. 2012), valores típicos para a relação ar-combustível real, em unidades pequenas de gaseificação de madeira em leito fixo, estão em torno de 2 e 2,4 kg/kg. E Dogru et al.² (2002 apud LORA et al. 2012), para experimentos com biomassa em leito fixo, reportam valores para a relação ar-biomassa na faixa de 1,37 e 1,47 Nm³.kg⁻¹, para valores entre 4,02 – 4,70 Kg/h de alimentação úmida.

Em reatores de leito fixo a relação ar-combustível (neste caso, biomassa)

¹WANDER, P. R.; ALTAFINI, C. R.; BARRETO, R. M. **Assesment of a small sawdust gasification unit. Biomass and Bioenergy**, vol. 27, p. 467-476. 2004

²DOGRU, M.; HOWARTH, C. R.; AKAY, G.; KESKINLER, B.; MALIK, A. A. **Gasification of hazelnut shells in a downdraft gasifier**. Energy, vol. 27, p 415-427. 2002.

depende principalmente da capacidade de processamento, e, portanto, das características físicas do reator. O fator de ar pode ser calculado a partir da quantidade total de biomassa consumida no teste, a vazão volumétrica do ar e o tempo total do teste. Neste trabalho, essa relação está perto de $0,26 \text{ Nm}^3.\text{kg}^{-1}$.

Na tabela 15 pode-se constatar algumas características dos componentes elétricos do sistema gaseificador:

Tabela 15 – Componentes elétricos do sistema gaseificador

Componente	Características
Motor WEG	0,5 cv /FL 55606 – 1720 rpm
Redutor TT	Tipo MDU 74; nº série 259417; Fc IA1D; redução exata 11500; rpm na entrada 1750; capacidade nominal 0,22 kw
Exaustor	motor ELAM-mod MSE.05, 0,5 cv bivolt (110/220v), 3450 rpm, 2,8/1,4 ampères)

Na figura 07 está um croqui com os principais componentes e as fotografias nas figuras de 8 a 10, mostram o estágio em que se encontra o protótipo do sistema de gaseificação.

Figura 07: Croqui do protótipo

Figura 08: Gaseificador em vista lateral. Tambor de combustão; duto da rosca transportadora; caixa de alimentação; sistema moto-redutor de giro do transportador; tubulação de gases, trocador de calor; mangueira de abastecimento do trocador de calor.

Figura 09: Gaseificador em perspectiva lateral. Reator de combustão com a tampa fechada; duto da rosca transportadora; caixa de alimentação; sistema de sucção, resfriamento, saída e coleta dos gases.

Figura 10: Vista por trás da caixa de alimentação com a transmissão do sistema motor por polias dentadas e corrente.

4.3 Operação do sistema

A operação do sistema se fez nos seguintes passos, não obrigatoriamente nessa ordem:

1. Seleciona-se (tratar, se necessário) a biomassa a ser utilizada no processo;
2. A caixa armazenadora é preenchida com a biomassa e, então o parafuso transportador é acionado;
3. Após o reator estar parcialmente cheio de material combustível e a caixa armazenadora completamente cheia, faz-se a partida do gaseificador controlando a entrada de resíduos pelo acionamento do parafuso transportador que está com vazão mássica de 2,85 kg/h (deve-se realizar o auxílio manual da alimentação do parafuso devido ao ângulo de repouso do bagaço não ser suficiente para entrar por gravidade).

4. Ao perceber acúmulo de fumaça no reator, ativa-se o exaustor a meia tensão elétrica (o exaustor estava configurado para funcionar em 220 volts, contudo, devido ao forte entupimento da linha de gases, trabalhou-se em 110 volts) o que reduz sua vazão de ar pela metade (740 L/h), medida com rotâmetro na condição de reator cheio;
5. Por conseguinte, abre-se a válvula de água da mangueira do trocador de calor;
6. Com o sistema e seus dispositivos funcionando, faz-se uma checagem frequente do material-alimento na caixa armazenadora, verifica-se vazamentos de ar na linha de sucção, água, e transporte de biomassa;
7. Não ocorrendo nenhum contratempo, coleta-se o gás gerado depois de 50 minutos de funcionamento, considerando que é tempo suficiente para o sistema homogeneizar o processo.

Foi feita uma pré-secagem, ao ar livre nos dias ensolarados, do bagaço-de-cana devido a sua umidade inicial de aproximadamente 50% (a Usina nos forneceu as seguintes informações sobre o bagaço: pol (sacarose aparente) de 0,8 a 2,20 % e umidade de 45,00 a 53,00 %), e uma separação manual para a retirada de rejeitos como fragmentos de rochas, solos e outros materiais indesejados para o processo que poderiam danificar o sistema promovendo desgaste, principalmente do parafuso transportador e da tela de proteção da saída do gás.

No gaseificador ocorrem vaporização, oxidação e redução. Podendo, a partir de dados da instrumentação, estabelecer as zonas: secagem do combustível, pirólise, combustão e redução. Essas reações produzirão os gases e as cinzas e com isso, dever ser regulada a entrada de ar e resíduos para otimizar o processo reduzindo a geração de alcatrões e cinzas. Resultaria em algo similar a esse diagrama na figura 11, abaixo:

Figura 11: Estágios da gaseificação num gaseificador de fluxo ascendente – updraft gasifier. Fonte: Basu (2010)

4.4 Análise dos gases

A análise dos gases é feita *off-line* por cromatografia, utilizando o cromatógrafo de gases (GC-2010 da Shimadzu) disponível no LPB (Campus 2) que está calibrado para avaliar os gases H_2 , CO_2 , CH_4 e N_2 , além destes, é necessário analisar a produção de CO , fechando assim, os principais produtos gasosos na saída do sistema. Outros elementos como poder calorífico desse composto gasoso, e outros componentes não estão no escopo desse trabalho, tal como a análise do material liquefeito. Contudo, o poder calorífico superior (PCS) e o inferior (PCI) são características importantes do combustível para realização da etapa de combustão e fornecimento de ar para gaseificação. O PCS pode ser calculado segundo Parikh,

Channiwala e Ghosal (2005) e PCI de acordo com Brito¹ (1993 apud Gonçalves, Sartori e Leão, 2009). O poder calorífico inferior do gás produzido (PCIg): calculado a partir das espécies gasosas combustíveis (H_2 , CO e CH_4) presentes na composição do gás produzido. As concentrações volumétricas de cada um desses gases citados serão conhecidas por cromatografia gasosa (ver tópico 4.9) e multiplicadas pelos respectivos valores de PCI de cada espécie gasosa. Nas figuras 12 e 13 estão ilustrados o tubo para coleta da fumaça, a seringa para amostragem e o cromatógrafo do laboratório.

Figura 12: A esquerda, seringa de amostragem e septo de cromatografia e à direita imagem do cromatógrafo.

¹BRITO, J. O. **Expressão da produção florestal em unidades energéticas.** In Congresso Florestal Panamericano, 1, Congresso Florestal Brasileiro, 7, 1993, Curitiba, Anais...Curitiba: Sociedade Brasileira de Silvicultura, p.280-282, 1993.

Figura 13: Tubo amostrador acoplado ao sistema em funcionamento.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Desenvolvimento do sistema

Na montagem do sistema demonstrou ser um desafio fazer a alimentação do reator e circulação dos gases produzidos, a partir das peças disponíveis. Inicialmente, buscou-se utilizar materiais disponíveis no laboratório, após encontrá-los, desenhou-se um croqui e levou para a oficina mecânica da EESC. Após alguns meses obteve-se a primeira configuração do sistema, como está ilustrado na figura 14, partindo para as etapas de montagem do suporte-base, sistemas de transporte da matéria-prima, sucção, resfriamento, armazenamento e coleta da fumaça.

Figura 14: Vista lateral da montagem feita na oficina da EESC.

5.1.1 Montagem do suporte

E depois, na montagem no suporte, utilizou-se uma estrutura comprida com cantoneiras, esse suporte precisou ser cortado, furado e soldado para que fossem encaixados os componentes do sistema de gaseificação, e também os rodízios para garantir a mobilidade, essa etapa que foi uma das mais demoradas, contou com o apoio de um técnico da prefeitura do Campus, esses serviços de soldagem e serralheria foram realizados no próprio laboratório, tais como a adequação da base de sustentação para o sistema e outros vários pontos como ilustrados nas figuras.

5.1.2 Sistema transportador da matéria-prima

Nos ensaios do sistema transportador, após estudar as opções de transmissão do movimento para o helicóide, foram testados conjuntos de polias em v ligadas por correia. O primeiro conjunto de polias efetuou o transporte de uma forma muito lenta, o que causou a necessidade de um aumento da polia geradora (ligada ao eixo motor-redutor) e redução da receptora (ligada ao eixo do parafuso), chegando às maior e menor encontradas no mercado com condições de adaptação ao sistema e aparentemente eram satisfatórias, contudo, o parafuso transportador não funcionou muito bem na alimentação do reator enquanto utilizou-se o sistema de correias. A ideia de utilizar o sistema de correias era para que, caso tivesse mais material do que o reator suporta na queima, a correia deslizaria e evitaria-se possíveis acidentes, e ainda sim, ocorreria uma leve compressão do material dentro do reator. Após tentar com correias duplas, não conseguiu-se resolver o efeito negativo do deslizamento da correia nas polias, assim, decidiu-se trabalhar com polias dentadas e corrente. A corrente funcionou muito bem no transporte da biomassa, apesar de não conseguir os mesmos tamanhos de polias do sistema de correia. Na figura 15 e 16 tem-se os dois principais sistemas de transmissão testados.

Figura 15: À esquerda uma das fases do sistema de transmissão por correias e à direita o sistema motor-redutor acoplado à maior polia.

Figura 16: Sistema de transmissão do movimento, conjunto de polias dentadas e corrente com rolete extensor.

5.1.3 Matéria-prima

Quanto à matéria-prima para alimentação do reator, primeiro testou-se um carvão ativado que estava em desuso ao lado do laboratório, apesar de ser muito bem transportado para o reator, ele não apresentou queima satisfatória, talvez pelo fato de ser muito cominuído, guardar muita umidade e outros contaminantes impregnados pelo período parado sem uso. Então, partiu-se para resíduos de varrição do jardim local, folhas secas, pequenos galhos, dentre outros similares, estes obtiveram uma boa queima, entretanto, problemas quanto à oclusão no parafuso gerou a necessidade de se realizar o seu tritramento, para obter um material granular como o carvão ativado, o que provavelmente seria preciso quando fosse trabalhar com os rejeitos da coleta seletiva. Como o processo de trituração mostrou-se inviável pelo tempo disponível, buscou-se um material combustível que já estivesse granulado e abundante como resíduo, e optou-se por testar o bagaço de cana-de-açúcar, já que na região existem muitas usinas de cana. Após contatar várias usinas, obteve-se retorno e autorização da Us. São Martinho (em www.saomartinho.com.br/) em Pradópolis-SP na qual buscou-se aproximadamente 100 kg de bagaço. Na figura 17 estão alguns resíduos na caixa armazenadora.

Figuras 17: Vários tipos de biomassa testados para uso como combustível: Carvão ativado, o material heterogêneo da varrição: folhas, pequenos galhos e palha testados no sistema.

Foi necessário realizar um pré-tratamento no bagaço, pois ele estava com umidade próxima de 50% e continha muitos fragmentos de rochas e resquícios de solo, principalmente, sendo assim, fez-se uma catação do material, e secagem ao ar livre, após isso, ainda foi preciso ajuda manual para uma parte do material adentrar no duto do parafuso pois o ângulo de repouso depois da secagem não foi suficiente para que o abastecimento fluísse constantemente. Com isso o material abasteceu satisfatoriamente o reator, chegando a preencher sua metade sem problemas, e com ótimas condições de queima.

A secagem foi parcialmente feita dentro de sacos plásticos de 100 L, como ilustra a figura 18, pois, apesar de limpar o piso asfaltado, nessa época, segundo semestre, os ventos eram constantes, o que complicava a manipulação sem perdas do material, e também era necessário o uso de máscara e óculos para evitar a inalação da poeira e agressão nos olhos. Ocorreram alguns transtornos devido à rápida mudança do tempo para chuvas. Foi uma secagem demorada, já que, é inverno e fez bastante frio durante essa fase do experimento.

Figura 18: Ambiente de secagem do bagaço de cana-de-açúcar.

Figura 19: Alguns dos fragmentos de rocha encontrados em meio ao bagaço.

5.1.4 Sistema de sucção dos gases

No início do desenvolvimento do sistema de sucção foi necessário saber o desempenho do reator, já que se trata de uma nova tecnologia, e essa foi uma incógnita para começar essa parte do trabalho. Foi feita uma montagem teste e a dificuldade de se enxergar vazamentos sem o sistema estar em funcionamento apresentou-se como um dos desafios encontrados. Buscou-se anular qualquer entrada de ar atmosférico perceptível na tubulação depois da saída do reator, no qual, a entrada do gaseificante (ar) é, preferencialmente, pela portinhola com dobradiça, e para eliminar essa contaminação externa foram feitos reparos com cola de vedação que suporta altas temperaturas e borracha de vedação nos pontos onde foram identificados entrada de ar. Na figura abaixo, encontra-se um dos registros de vazamento no sistema, foi possível identificá-lo devido ao alto teor de água do gás succionado que saiu pela falha na solda.

Figura 20: Na esquerda vazamento pela solda da conexão da entrada da sucção e na direita vedação por cola

Entupimentos na tubulação de sucção ocorreram várias vezes devido a presença de particulados que não reagiram e formavam aglomerações na pequena tubulação, principalmente na saída do reator, uma das alternativas seria trocar a tubulação por uma de maior diâmetro, ficando uma sugestão para o futuro.

Figura 21: Na esquerda uma entrada da sucção com entupimento e na direita novas entradas de sucção para melhorar o sistema.

Além disso, a fumaça produzida continha muito líquido vaporizado, que poderia ser um risco para o compressor, decidiu-se trocá-lo pelo exaustor, conforme estão ilustrados na figura 22. Visualmente a sucção não foi prejudicada quanto à vazão e, também, melhorou a mobilidade do sistema.

Figuras 22: Compressor de ar à esquerda e à direita o exaustor.

5.1.5 A combustão parcial

O processo de queima no reator é iniciado com facilidade, a biomassa queima com certa rapidez durante um tempo, à medida que se diminui o oxigênio interior essa velocidade vai decrescendo e também por falta de material combustível. Parte do material combustível que não reagiu dentro do reator se torna disponível com o giro das hastes no eixo do parafuso transportador, favorecendo o contato da brasa com a matéria-prima. Quando o reator se enche de fumaça, o exaustor é ligado e começa o ciclo da gaseificação, sendo que o alimento-combustível é fornecido pelo parafuso constantemente e considerando que existe pouco ar entrando no reator, ocorre a combustão incompleta da biomassa. O exaustor succiona a fumaça e sopra para fora após passar pelo amostrador. O ideal é que a fumaça saia escura, o que é característico dessa queima, talvez se aumentar a temperatura no reator ajude no processo, pois apesar de ficar muito quente junto à parede do reator era possível ficar nas proximidades do sistema sem incômodo. A figura 23 mostra alguns pontos do sistema em funcionamento.

Figura 23: A da esquerda tem a visão interna do reator com fumaça e a da direita, o sistema em funcionamento.

5.1.6 Trocador de calor

O resfriamento dos gases é feito pelo trocador de calor preenchido com água. Ele está bem adaptado à estrutura base, é um componente bem pesado, e por isso mesmo comprovando a eficiência de apenas um, foram mantidos os dois instalados, sendo que, a principal função do secundário é contrabalancear o peso, as conexões das mangueiras de entrada e saída foram fáceis de instalar. Adicionalmente, pode-se utilizar o outro resfriador para promover um tratamento extra ao gás, além do que, caso consiga-se aumentar a temperatura interna no reator poderá ser necessário um segundo resfriamento do produto gasoso. Na figura 24, estão mostrados os trocadores de calor e o ponto de abastecimento da água para o trocador de calor.

Figura 24: Válvula da água de abastecimento para o trocador de calor.

O sistema gaseificador é um sistema móvel e tem sua operação com o reator posicionado no lado externo do prédio, junto à porta, como se vê na figura abaixo, e após os testes recolhe-se o sistema para dentro do laboratório. Em dias chuvosos não é possível operar o reator e quando foi viável trabalhar no laboratório, apenas experimentou-se as outras partes, como testes na estrutura, na mobilidade do sistema, no transporte do combustível pelo parafuso etc. As figuras 25 e 26 mostram uma visão geral do sistema gaseificador.

Figura 25: Vista lateral parcial do sistema

Figura 26: Vista lateral parcial do sistema

5.2 Produtos gerados

O processo de criação do sistema de gaseificação e seus componentes busca construir um sistema prático e facilmente adaptável as necessidades locais, sendo que nessa etapa do trabalho foram descobertos os seguintes:

5.2.1 Compostos gasosos

O cromatógrafo a gás do Laboratório de Processos Biológicos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento detectaram presença de hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2), metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e alguns gases desconhecidos que não foram calibrados no equipamento. Os principais resultados das análises estão nas tabelas de 15 a 17:

Tabela 15 – Quantificação dos gases obtidos pela cromatografia

Composto		Reator aberto		Reator fechado	
		área	μmols/mL	área	μmols/mL
1ª Repetição	H ₂	53239	-1,028	18528	-1,211
	N ₂	933965	50,275	887456	47,709
	CH ₄	9758	-0,977	7167	-1,017
	CO ₂	155444	6,396	81913	2,817
2ª Repetição	H ₂	47435	-1,058	7647	-1,268
	N ₂	924228	49,738	982208	52,936
	CH ₄	14878	-0,898	0	-1,128
	CO ₂	94682	3,439	40680	0,811
3ª Repetição	H ₂	67800	-0,951	29833	-1,151
	N ₂	773929	41,446	926683	49,873
	CH ₄	19885	-0,820	6051	-1,035
	CO ₂	174246	7,311	79543	2,702

*Tabela com os valores em tréplica encontrados segundo a metodologia escolhida, nos anexos estão os dados gerados pelo cromatógrafo utilizado.

Tabela 16 – Média e desvio padrão dos gases obtidos pela cromatografia

Composto	Reator aberto		Reator fechado	
	média ± desvio padrão			
	área	μmols/mL	área	μmols/mL
H ₂	56158 ±10491	nq	18669 ±11093	nq
N ₂	877374 ±89718	47,15 ±4,95	932115 ±47609	50,17 ±2,63
CH ₄	14840 ±5063	nq	4406 ±3856	nq
CO ₂	141457 ±41585	5,71 ±2,02	67378 ±23152	2,11 ±1,13

*nq – não quantificado por não existir concentração negativa.

Tabela 17 – Limites de detecção (LD) e de quantificação (LQ):

Gás	LD (μmols)	LQ (μmols)
Hidrogênio	0,717	2,173
Nitrogênio	0,663	2,010
Metano	0,743	2,250
Gás Carbônico	5,733	17,373

Sendo assim, os resultados das amostragens quando retornam um valor de área significa que detectaram a presença desses gases, e se após o cálculo a partir das equações das respectivas curvas retornarem um valor positivo é que estão acima do limite de quantificação (LQ), valores negativos significa que estão abaixo desse limite, estatisticamente. Com isso, entende-se que o cromatógrafo detectou a presença de H_2 e CH_4 mas não foi possível suas quantificações, provavelmente por estarem abaixo da curva calibrada para quantificação. Pela tabela 16 sabe-se que os valores se encontram entre 0,717 e 2,173 μmols para o H_2 e entre 0,743 e 2,250 μmols para o CH_4 nos 0,5 mL de amostra injetada no cromatógrafo. Já o N_2 e o CO_2 foram detectados e quantificados, o que indica a forte presença desses dois, abaixo a os cálculos para quantificar o CO_2 em uma das amostras. Na tabela 17 se encontram os dados de calibração do aparelho.

Tabela 18 – Tempo de retenção dos gases; equações de calibração e coeficiente de determinação das curvas

Gás	Tempo De Retenção (min)	Reta de calibração	R ²
Hidrogênio	2,01	y = 379450,996x + 248244,4005	0,9778
Nitrogênio	2,32	y = 36252,44674x + 22674,55378	0,9808
Metano	3,22	y = 129206,3061x + 72884,95267	0,9791
Gás Carbônico	4,61	y = 41099,9595x + 24014,26514	0,9776

Sendo que: y é a área e x a concentração do respectivo gás.

$$[CO_2] = \frac{(area - 24014,26514)}{41099,9595} \quad \text{eq. 02}$$

Para a área de 155444:

$$[CO_2] = \frac{(155444 - 24014,26514)}{41099,9595} = 3,198 \frac{\mu mol}{0,5 mL}$$

Uma análise estatística utilizando o teste-t para os valores de N₂ e CO₂ indica que não houve diferença significativa entre o N₂ na saída do sistema nos dois modos de operação (tampa do reator aberta e fechada) e o CO₂ foi mais produzido com o reator aberto do que com o reator fechado, pode indicar que a queima foi mais completa no reator aberto, mas só se poderá confirmar quando obter valores de CO (monóxido de carbono), o que não foi possível, contudo já se tem uma prévia da melhor situação de queima incompleta.

5.2.2 Compostos líquidos

As reações do sistema produziram um líquido de cor escura obtido no dreno do trocador de calor e no ponto de coleta dos gases, Na figura 27 estão ilustradas as amostras:

Figura 27: Amostra dos líquidos produzidos no gaseificador, sendo a da esquerda obtido na drenagem do trocador de calor e a da direita obtida no ponto de coleta dos gases.

A amostra “a” parece conter bastante água, pois além de ser mais clara é menos viscosa que a amostra “b”. Após um certo tempo verificou-se que a amostra “b” endureceu e se tornou vítrea, além de pegajosa, foi difícil remover dos locais onde ocorreu deposição, como na estrutura e nas peças, no exaustor, principalmente. Ao retirar a amostragem do gás, o sistema continuou funcionando e ficou visível a produção desses compostos. Na saída de gases do sistema, esse material é expelido de forma pulverizada, o que torna difícil a visualização, apenas após o seu acúmulo ao redor do ponto de saída é que se atentou para sua formação. Abaixo são apresentadas algumas imagens de como afetou o sistema.

Figura 28: Exaustor com incrustação do composto líquido.

Figura 29: À esquerda tem a vista superior da saída da fumaça e ao fundo a barra coberta do composto líquido e à direita mostra o exaustor com vazamentos e respingos do líquido.

Segundo a bibliografia, existe grande possibilidade desse material ser alcatrão misturado com água, porque dentre os componentes que se forma na gaseificação, ele é o principal produto indesejado que aparece quando o sistema não está com bom funcionamento, além de ser comum quando se utiliza o ar como agente gaseificante, e também sua descrição, de acordo com Brown¹ (2005 apud FUKUROZAKI, 2011), é de um líquido escuro e viscoso que cheira a naftalina.

¹BROWN, R. C. Biomass Refineries based on Hybrid Thermochemical/Biological Processing – an Overview. Biorefineries, Biobased Industrial Processes and Products, Kamm, B., Gruber, P. R., Kamm, M. (eds). Wiley – VCH Verlag, Weinheim, Germany, 2005.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS:

Entendendo que o desenvolvimento do sistema está apenas na sua fase inicial, existem várias sugestões de melhorias descritas no material consultado, e também adaptações que com a experiência no funcionamento do gaseificador podem otimizar o processo:

- Cortar uma parte da tubulação que funciona como uma calha na caixa armazenadora, para que o ângulo de repouso do resíduo interfira menos na alimentação;
- Promover a trituração inicial do material combustível deixando-o granulado;
- Prolongar o parafuso transportador alguns centímetros para dentro do reator;
- Trocar o parafuso por um diâmetro que se adeque à granulometria do material;
- Desenvolver um novo sistema de tampa frontal para melhor estudar a entrada de ar e considerar a possibilidade de funcionar como grelha;
- Cortar o reator pela metade, aproximadamente, já que, o material não se arrastou com facilidade até a frente;
- Utilizar um material refratário no reator, como cerâmica de forno, para reduzir as perdas térmicas do processo;
- Desenvolver uma saída melhor para os gases, para que se reduza o entupimento e a saída de material que não reagiu, uma sugestão é utilizar algo como uma chaminé;
- Aumentar a tubulação de passagem dos gases;
- Alterar a posição do exaustor, evitar que ele seja impregnado com esses líquidos, a ideia é que se adapte ele na saída do segundo trocador de calor;
- Utilizar o outro trocador de calor como parte do tratamento dos gases, para evitar que o produto líquido seja coletado junto com os gases;
- Pode-se adaptar um bujão para armazenar uma quantidade maior de gases antes de levar para análise do produto;

- Fazer um monitoramento completo do processo como cromatografia em linha, por exemplo;

É necessário melhorar a instrumentação para melhor análise do comportamento e dos resultados do sistema;

- O material líquido pode ser qualificado e quantificado.

7. CONCLUSÃO

Uma análise pré-matura indica que no equipamento funcionando com a tampa aberta em relação à fechada:

- A temperatura do reator alcançou valores maiores do que com a tampa fechada;
- O líquido escuro e grudento foi menos produzido;
- O CO₂ foi mais produzido;
- O cromatógrafo apresentou valores maiores de área para o hidrogênio, o metano e o gás carbônico, contudo, as equações obtidas pela curva de calibração apenas quantificaram o CO₂ em $\mu\text{mols/mL}$;
- O nitrogênio não apresentou diferença significativa nos 2 processos.

Conclui-se também que, a médio e longo prazo, um equipamento, de baixo custo, promove redução na utilização de outras energias, o que será benéfico economicamente, para as empresas e/ou entidades que o adotarem. Tanto pode ser utilizado por entidades como em residências que buscam a produção de energias alternativas e tratamento adequado aos rejeitos dos resíduos sólidos.

Pois “tudo o que se joga fora, fica aqui mesmo, no nosso planeta; portanto, há que se retirar pouco da Natureza e transformar tudo, a fim de que a vida se perpetue!”

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3ª ed, Brasília: Aneel, 236p. 2008. ISBN: 978-85-87491-10-7

AGUIAR FILHO, J. M. M. **Análise enzimática de fungos lignocelulolíticos cultivados em vinhaça e bagaço de cana-de-açúcar**. José Mário Mamede Aguiar Filho. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2008.

ARTEAGA-PÉREZ, L. E.; CASAS-LEDÓN, Y.; PÉREZ-BERMÚDEZ, R.; PERALTA, L. M.; DEWULF, J.; PRINS, W. **Energy and exergy analysis of a sugar cane bagasse gasifier integrated to a solid oxide fuel cell based on a quasi-equilibrium approach**. Chemical Engineering Journal (228: 1121–1132). 2013.

BASU, P., **Biomass Gasification and Pyrolysis - Practical Design and Theory**. Elsevier, UK, 365p. 2010. ISBN 978-0-12-374988-8.

BHATTACHARYA, S. C.; SIDDIQUE, A. H. M. D.; PHAM H. L. **A study on wood gasification for low-tar gas production**. Energy; 24:285-96.1999.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. **Biomassa, biocombustíveis e Energia**. Elab: COELHO, Jorge Cals. Brasília, 100p. 1982.

BRIDGWATER, A. V.; EVANS, G. D. **An assessment of thermochemical conversion systems for processing biomass and refuse**. Energy Technology Support Unit (ETSU) on behalf of the Department of Trade, ETSU B/T1/00207/REP, 1993.

BUI, T.; LOOF, R.; BHATTACHARYA, S. C. **Multi-stage reactor for thermal gasification of wood**. Energy. 19(4):397-704.1994.

CARPENTER, D. L.; BAIN, R. L.; DAVIS, R. E.; DUTTA, A.; FEIK, C. J.; GASTON, K. R.; JABLONSKI, W.; PHILLIPS, S. D.; NIMLOS, M. R. **Pilot-scale gasification of corn stover, switchgrass, wheat straw, and wood: 1. Parametric study and comparison with literature**. Industrial & Engineering Chemistry Research. 49 (4), 1859–1871. 2010.

CEMPRE. **Pesquisa Ciclosoft**. 2012.

CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Comparação entre tecnologias de gaseificação de biomassa existentes no Brasil e no exterior e formação de recursos humanos na região Norte**. Convênio FINEP/CETERNERG 23.01.0695.00.

Estado da Arte da Gaseificação. São Paulo. 2002.

CHEN Y.; LUO Y-H.; WU W-G.; SU, Y. **Experimental investigation on tar formation and destruction in a lab-scale two-stage reactor**. Energy and Fuels; 23:4659-67. 2009.

CIFERNO, J. P. MARANO, J. J. **Benchmarking Biomass Gasification Technologies for Fuels, Chemicals and Hydrogen Production**. In: U. S. Department of Energy/National Energy Technology Laboratory. 2002.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE-Brasil). **Balanco Energético Nacional 2012: Ano base 2011**.Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro. 2012.

FAAIJ, A.; REE, R. V.; WALDHEIM, L.; OLSSON, E.; OUDHUIS, A.; WIJK, A. V.; DAEY-OUWENS, C.;TURKENBURG, W. **Gasification of biomass wastes and residues for electricity production**. Biomass and Bioenergy Vol. 12, No. 6, pp. 387-407, 1997.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais**. Fundação Estadual do Meio Ambiente. 163p. Belo Horizonte: FEAM, 2012.

FERNANDES, M. C., SANCHEZ, C. G. **Projeto gaseificação de gramínea (Pennisetum purpureum)**. In: 3 Encontro De Energia No Meio Rural, Campinas, 2000.

_____**Projeto gaseificação de gramínea (Pennisetum purpureum)**. In: An. 3º Encontro de Energia no Meio Rural. 2003.

FUKUROZAKI, Sandra Harumi. **Avaliação do ciclo de vida de potenciais rotas de produção de hidrogênio: estudo dos sistemas de gaseificação da biomassa e de energia solar fotovoltaica**. 2011. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, University of São Paulo, São Paulo, 2011.

GASTON, K. R.; JARVIS, M. W.; PEPIOT, P.; SMITH, K. M.; FREDERICK, W. J.; NIMLOS, M. R. **Biomass Pyrolysis and Gasification of Varying Particle Sizes in a Fluidized-Bed Reactor**. In: Energy & Fuels. National Bioenergy Center, National Renewable Energy Laboratory. US. 2011.

GONÇALVES, J. E., SARTORI, M. M. P., LEÃO, A. L. **Energia de briquetes produzidos com rejeitos de resíduos sólidos urbanos e madeira de Eucalyptus grandis**. In: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v13, no.5, p.657-661. Campina Grande, PB. 2009.

LORA, E. E. S., ANDRADE, R. V., ÁNGEL, J. D. M., LEITE, M. A. H., ROCHA, M. H., de SALES, C. A. V. B., MENDOZA, M. A. G.; CORAL, D. D. S. O. **Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis**. Biocombustíveis, vol. 2, editora: Interciência. 2012.

MARTÍNEZ, J. D., LORA, E. E. S., ANDRADE, R. V., JAÉN, R. L. **Experimental study on biomass gasification in a double air stage downdraft reactor**. In: Biomass and Bioenergy, vol 35, ed 08, p. 3465-3480, ISSN 0961-9534, 2011, <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.04.049>.

Ministério do Meio Ambiente - MMA. **Comitê Interministerial de Acompanhamento do Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília. 2011.

MONTEIRO, J. H. P.; FIGUEIREDO C. E. M.; MAGALHÃES A. F.; MELO M. A. F.; BRITO J. C. X.; ALMEIDA T. P. F.; MANSUR G. L.; ZVEIBIL, V. Z. (coord.). **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. 200 p. Disponível em: <<http://www.resol.com.br/cartilha4/manual.pdf>>. Acesso em: 08 ago. 2014

NIEMINEN, J. **Biomass CFB Gasifier Connected to a 350 MWth Steam Boiler Fired with Coal and Natural Gas**. Thermie Demonstration Project in Lahti, Finland. Foster Wheeler Development Corporation, 1999.

PAISLEY, M. A.; ANSON, D. **Biomass Gasification for Gas Turbine Based Power Generation**. Presented at the International Gas, Turbine & Aeroengine Congress & Exhibition, 1997.

PAISLEY, M. A.; FARRIS, M. C.; BLACK, J.; IRVING, J. M.; OVEREND, R. P. **Commercial demonstration of the Battelle/Ferco biomass gasification process: Startup and initial operating experience**. Presented at the 4th Biomass Conference of the Americas, Volume 2. 2001.

PARIKH, J.; CHANNIWALA, S. A.; GHOSAL, G. K. **A correlation for calculating hhv from proximate analysis of solid fuels**. Fuel, v. 84, n. 5, p. 487-494, 2005.

RAJVANSHI, A. K. **Biomass Gasification - Nimbkar Agricultural Research Institute PHALTAN**. In: "Alternative Energy in Agricultura" – Chapter 4, Vol II, Ed. D. Yogi Goswami, CRC Press, Maharashtra, India. 83-102p. 1986.

REED, T.B., SIDDHARTHA, G. **A survey of biomass gasification**. 2001. 2nd edition.

SANTOS, D.; GULYURTLU, I.; CABRITA, I. **Materiais e Energia: Conversão**

Termoquímica de Combustíveis. In: Corrosão e Protecção de Materiais, vol 29, no. 03. Lisboa, Portugal. 2010.

SILVA, J. N.; CARDOSO SOBRINHO, J.; SAIKI E. T. **Utilização de biomassa na secagem de produtos agrícolas via gaseificação com combustão adjacente dos gases produzidos.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.24, n.2, p.405-411, maio/ago. 2004

ÚNICA. 2011. Disponível em: <<http://www.unica.com.br>>

ANEXOS

ANEXO A - 1ª. CORRIDA COM A TAMPA ABERTA

Analysis Date & Time : 30/6/2014 15:47:02
 User Name : Admin
 Vial# : 1
 Sample Name : 30-06-2014 - 500 uL
 Sample ID : 30-06-2014 - 500 uL
 Sample Type : Unknown
 Injection Volume :
 ISTD Amount :

Data Name : D:\GCSOLUTION\Data\Felipe - campus 1\30-06-2014 - 500 uL.gcd
 Method Name : D:\GCSOLUTION\Métodos\Janja e Andréa\Metano Rampa 17 marco 10.gcm

[Description]

30-06-2014 - 500 uL

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0,156	42817	4998	0,000				
2	0,295	37056	12473	0,000		V		
3	0,472	1381	448	0,000		V		
4	0,669	136575	23286	0,000				
5	0,814	62553	9443	0,000		V		
6	0,934	72790	7519	0,000		V		
7	1,797	15670	1162	0,000				
8	1,989	53239	13530	0,092	Micrn	V		1 Hidrogênio
9	2,318	933965	306182	0,000				
10	2,458	29817	9614	0,000		V		
11	2,888	3823	1026	0,000				
12	3,251	9758	2461	0,000				
13	4,577	155444	24744	0,000				
Total		1554888	416886					

ANEXO B - 2ª. CORRIDA COM A TAMPA ABERTA

Analysis Date & Time : 3/7/2014 16:17:31
 User Name : Admin
 Vial# : 1
 Sample Name : AMOSTRA 03-07-2014 b
 Sample ID : AMOSTRA 03-07-2014 b
 Sample Type : Unknown
 Injection Volume :
 ISTD Amount :

Data Name : D:\GCSOLUTION\Data\Felipe - campus 1\AMOSTRA 03-07-2014 b.gcd
 Method Name : D:\GCSOLUTION\Métodos\Janja e Andréa\Metano Rampa 17 marco 10.gcm
 [Description]
 AMOSTRA 03-07-2014 - b, do amostrador - 500uL
 Intensity

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0,158	55537	4932	0,000				
2	2,005	47435	10380	0,084	Micrn		1	Hidrogênio
3	2,337	924228	237754	0,000				
4	2,478	38110	9604	0,000		V		
5	3,272	14878	3215	0,000				
6	4,639	94682	17222	0,000				
Total		1174870	283107					

ANEXO C - 3ª. CORRIDA COM A TAMPA ABERTA

Analysis Date & Time : 18/7/2014 14:45:44
 User Name : Admin
 Vial# : 1
 Sample Name : 18-07-2014 a
 Sample ID : 18-07-2014 a
 Sample Type : Unknown
 Injection Volume :
 ISTD Amount :

Data Name : D:\GCSOLUTION\Data\Felipe - campus 1\18-07-2014 a.gcd
 Method Name : D:\GCSOLUTION\Métodos\Janja e Andréa\Metano Rampa 17 marco 10.gcm
 [Description]
 18-07-2014 a 500 uL

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0,159	54818	4898	0,000				
2	2,007	67800	18791	0,113	Micrn		1	Hidrogênio
3	2,339	773929	247812	0,000				
4	2,479	44112	13963	0,000		V		
5	3,274	19885	5098	0,000				
6	4,599	174246	26608	0,000				
Total		1134790	317170					

ANEXO D - 1ª. CORRIDA COM A TAMPA FECHADA

Analysis Date & Time : 7/7/2014 15:03:12
 User Name : Admin
 Vial# : 1
 Sample Name : 07-07-2014 - 500 uL b
 Sample ID : 07-07-2014 - 500 uL
 Sample Type : Unknown
 Injection Volume :
 ISTD Amount :

Data Name : D:\GCSOLUTION\Data\Felipe - campus 1\07-07-2014 - 500 uL b.gcd
 Method Name : D:\GCSOLUTION\Métodos\Janja e Andréa\Metano Rampa 17 marco 10.gcm
 [Description]
 07-07-2014 - 500 uL b

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0,161	57374	5008	0,000				
2	1,997	18528	5355	0,042	Micrn			1 Hidrogênio
3	2,331	887456	284145	0,000				
4	2,472	29351	9264	0,000		V		
5	3,271	7167	1875	0,000				
6	4,644	81913	15729	0,000				
Total		1081789	321376					

ANEXO E - 2ª. CORRIDA COM A TAMPA FECHADA

Analysis Date & Time : 14/7/2014 16:24:32
 User Name : Admin
 Vial# : 1
 Sample Name : 14-07-2014 a
 Sample ID : 14-07-2014 a
 Sample Type : Unknown
 Injection Volume :
 ISTD Amount :

Data Name : D:\GCSOLUTION\Data\Felipe - campus 1\14-07-2014 a.gcd
 Method Name : D:\GCSOLUTION\Métodos\Janja e Andréa\Metano Rampa 17 marco 10.gcm
 [Description]
 14-07-2014 a

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0,161	57005	4969	0,000				
2	2,008	7647	2365	0,027	Micrn		1	Hidrogênio
3	2,341	982208	347999	0,000				
4	2,483	8632	2926	0,000		V		
5	4,683	40680	8945	0,000				
Total		1096172	367204					

ANEXO F - 3ª. CORRIDA COM A TAMPA FECHADA

Analysis Date & Time : 17/7/2014 15:50:31
 User Name : Admin
 Vial# : 1
 Sample Name : 17-07-2014 a
 Sample ID : 17-07-2014 a
 Sample Type : Unknown
 Injection Volume :
 ISTD Amount :

Data Name : D:\GCSOLUTION\Data\Felipe - campus 1\17-07-2014 a.gcd
 Method Name : D:\GCSOLUTION\Métodos\Janja e Andréa\Metano Rampa 17 marco 10.gcm
 [Description]
 17-07-2014 a - 500 uL

Peak#	Ret.Time	Area	Height	Conc.	Unit	Mark	ID#	Cmpd Name
1	0,162	55509	4926	0,000				
2	2,005	29833	8851	0,058	Micrn		1	Hidrogênio
3	2,339	926683	307799	0,000				
4	2,480	22551	7403	0,000		V		
5	3,277	6051	1602	0,000				
6	4,652	79543	15408	0,000				
Total		1120170	345989					