



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
UNIDADE ACADÊMICA CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

RAMIRO BATINGA DOS SANTOS

**MONTAGEM E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UMA PLANTA PILOTO DE
GASEIFICAÇÃO OPERANDO COM CARVÃO VEGETAL E BRIQUETE DE
CANA-DE-AÇÚCAR.**

Maceió
2011

RAMIRO BATINGA DOS SANTOS

MONTAGEM E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UMA PLANTA PILOTO DE GASEIFICAÇÃO OPERANDO COM CARVÃO VEGETAL E BRIQUETE DE CANA-DE-AÇÚCAR.

Dissertação apresentada ao curso de pós-graduação em Engenharia Química, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Sandra H.V.Carvalho

Co-Orientador: Prof^o. Dr. João Inácio Solett

Maceió
2011

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

S237m Santos, Ramiro Batinga dos.
Montagem e avaliação experimental de uma planta piloto de gaseificação operando com carvão vegetal e briquete de cana-de-açúcar / Ramiro Batinga dos Santos. – 2011.
61 f. : il., tabs., graf.

Orientadora: Sandra Helena Vieira de Carvalho.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2011.

Bibliografia: f. 59-61.

1. Planta piloto de gaseificação. 2. Carvão vegetal. 3. Briquetes. 4. Cana de açúcar. 5. Biomassa – Produção de energia. I. Título.

CDU: 66.07

Ramiro Batinga dos Santos

**MONTAGEM E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UMA PLANTA PILOTO
DE GASEIFICAÇÃO, OPERANDO COM CARVÃO VEGETAL E BRIQUETE
DE CANA-DE-AÇÚCAR**

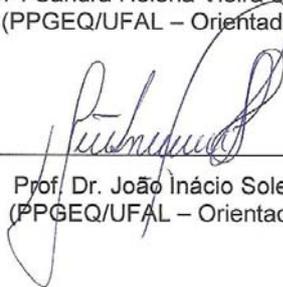
Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Alagoas, como requisito para a
obtenção do Título de Mestre em Engenharia
Química

Aprovada em: Maceió, 10 de Agosto de 2011.

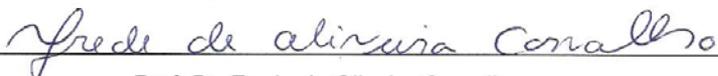
BANCA EXAMINADORA



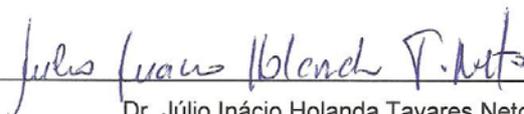
Prof^a. Dr^a. Sandra Helena Vieira de Carvalho
(PPGEQ/UFAL – Orientadora)



Prof. Dr. João Inácio Soletti
(PPGEQ/UFAL – Orientador)



Prof. Dr. Frede de Oliveira Carvalho
(PPGEQ/UFAL)



Dr. Júlio Inácio Holanda Tavares Neto
(BRASKEM S.A. – Membro Externo)

*A minha mãe em memória, Eunice Batinga dos Santos,
maior referência de retidão, honestidade e bravura.*

AGRADECIMENTOS

À DEUS por proteger e cuidar de mim nas sombras de suas asas;

À minha esposa, Adriana Gomes Fontes Batinga, por saber conduzir os afazeres do lar, o afeto e o carinho nas horas de precisão;

À professora Sandra pela orientação e por ter acreditado no meu trabalho;

Ao professor João Inácio pela paciência incansável e apoio dado em todos os momentos;

À Livia Ribeiro por sempre acreditar em mim e estar sempre pronta para ajudar;

Ao meu amigo Victor, por dividir comigo os momentos de trabalho árduo na montagem da unidade piloto de gaseificação;

À USINA SUMAÚMA (na pessoa do Engenheiro Alberon Cabral Toledo) – pela gentileza de fornecer o combustível, briquete e pélate de bagaço de cana, utilizado nessa pesquisa;

À CAPES e a FAPEAL , pelo suporte financeiro, imprescindível para a realização deste meu objetivo profissional;

À todos que, de alguma forma, me ajudaram e apoiaram para a realização de mais uma etapa da minha vida.

RESUMO

A procura por tecnologias para um desenvolvimento sustentável o qual satisfaça a viabilidade econômica e ambiental, tem proporcionado reuniões, encontros e conferências entre todas as nações. Produção de energia limpa e preservação ambiental são temas crescentes e fomentados nesses eventos em todo mundo. No cenário mundial de evolução da oferta de energia prognostica-se que seja crescente e gradual a participação de biocombustíveis (tanto etanol quanto biodiesel) na matriz energética mundial, destacando: (i) crescimento na produção de carvão para líquido (CTL, do inglês *coal to liquid*); (ii) aumento na demanda de tecnologias de transporte pouco convencionais (carros *flex fuel* e híbridos); e, (iii) aumento na capacidade e geração de energia nuclear e melhorias aceleradas em eficiência energética. Atualmente, o aproveitamento do potencial energético contido nos materiais orgânicos, tais como: resíduos agrícolas, industriais e urbanos ainda são aquém do potencial energético existente nesses insumos. A gaseificação é um processo termoquímico de conversão da biomassa em um gás com características basicamente combustíveis. Esta tecnologia permite a utilização do Ciclo Combinado com a Gaseificação Integrada (IGCC), isto é, a utilização dos gases produzidos na gaseificação em motores de Ciclo Otto ou turbina à gás para produção de energia elétrica, além da aplicação da técnica de captura e armazenamento de carbono, (*Carbon Capture and Storage-CCS*), que proporciona baixa emissão de enxofre, oferece facilidade em processar vários insumos e resulta em diversos produtos energéticos e pós processáveis. A escolha do tipo de gaseificador deve ser de acordo com os insumos abundante da região. Os maiores desafios para o avanço da tecnologia da gaseificação são os altos custos da tecnologia frente ao preço atual do barril de petróleo e a falta de mão de obra especializada para operação do sistema. Esta dissertação teve por objetivo a montagem e a avaliação experimental de uma planta piloto de gaseificação, processando insumos próprios da região (carvão e briquete de bagaço de cana), como resultados alcançaram a produção e análise dos gases de síntese e a produção de energia elétrica.

Palavras-chave: Gaseificação. Biomassa. Energia

ABSTRACT

The search for technologies for sustainable development which meets the economic and environmental viability, has provided meetings, and conferences among all nations. Clean energy production and environmental preservation are growing issues and promoted these events worldwide. On the world stage of evolution predicts energy supply that is gradually increasing and the share of biofuels (both ethanol and biodiesel) in the energy world, notably: (i) growth in the production of coal to liquid (CTL, English coal to liquid), (ii) increased demand for unconventional transportation technologies (hybrid and flex fuel cars), and (iii) increased capacity and nuclear power generation and accelerated improvements in energy efficiency. Currently, the use of the potential energy contained in organic materials such as agricultural waste, industrial and urban are still below the potential energy that exists in these inputs. Gasification is a thermochemical process for converting biomass into a gas fuel with basic features. This technology allows and the use of combined cycle with integrated gasification (IGCC), ie, the use of gases produced in gasification Otto cycle engines or gas turbine to produce electricity, and the application of the technique of capture and storage carbon (Carbon Capture and Storage, CCS), which gives low emission of sulfur, offers ease of processing multiple inputs and results in different energy products and post-processable. The choice of gasifier must be in accordance with the abundant supplies in the region. The biggest challenges for the advancement of gasification technology are the high cost of technology compared to the current price of a barrel of oil and lack of skilled labor to operate the system. This thesis aimed to assembly and assessment experiences of a pilot plant for gasification, processing inputs pertaining to the region (coal and briquette sugar cane bagasse), as the results achieved and the production of synthesis gas analysis and the production of electricity.

Keywords: Gasification. Biomass. Energy

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema do sistema integrado de gaseificação e ciclo combinado (IGCC)	20
Figura 2 - Gaseificador de Fluxo ascendente	30
Figura 3 - Gaseificador de Fluxo descendente.	30
Figura 4 - Desenho esquemático do gaseificador	32
Figura 5 - Ciclone e trocador, desmontados	33
Figura 6 - Unidade piloto de gaseificação (vista frontal).	33
Figura 7 - Unidade piloto de gaseificação (vista superior).	34
Figura 8 - Vista do galpão construído para abrigar o gaseificador.	34
Figura 9 - Fluxograma esquemático da unidade de gaseificação	35
Figura 10 - Teste de adaptação e funcionamento do motor.	37
Figura 11 - Instrumentação: termopares T1, T2 e T3.	39
Figura 12 - Instrumentação: termopares e indicador de pressão.	40
Figura 13 - Instrumentação: medidor de vazão.	40
Figura 14 - Instrumentação: indicador digital multiponto	41
Figura 15 - Analisador de gases, marca TESTO	42
Figura 16 - Mostra a utilização do analisador de gás. da TESTO.	42
Figura 17 - Carvão vegetal	43
Figura 18 - Briquete de bagaço de cana-de-açúcar	43
Figura 19 - Carregamento do gaseificador com carvão	44
Figura 20 - Acendimento do gaseificador: Introdução da fonte de chama	45
Figura 21 - Acendimento do gaseificador: leito incandescente	45
Figura 22 - Saída da chaminé: queima do gás produzido	46
Figura 23 - Trocador original	47
Figura 24 - Vista lateral do trocador já modificado	48
Figura 25 - Vista superior do trocador já modificado	48
Figura 26 - Detalhe do sistema de drenagem do alcatrão.	49
Figura 27 - Sistema de cavalete e cintas de segurança usadas na montagem e manutenção da unidade piloto de gaseificação.	50
Figura 28 - Sistema de exaustão da unidade	50
Figura 29 - Sistema de exaustão da unidade	53
Figura 30 - Dados da temperatura de operação com briquete de cana-de-açúcar	55

Figura 31 - Dados da vazão de operação com briquete de cana-de-açúcar	55
Figura 32 - (a,b,c). Problemas com a operação do briquete de cana-de-açúcar	56
Figura 33 - (a,b,c). Operação do sistema gaseificador-motor-gerador.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produção mundial dos principais produtos para obtenção de energia.	18
Tabela 2 - Composição típica do gás produzido pela gaseificação de biomassa.	21
Tabela 3 - Plantas IGCC na América do Norte.	22
Tabela 4 - Plantas IGCC em Planejamento na América do Norte.	23
Tabela 5 - Plantas IGCC em Planejamento na Ásia e Região do Pacífico.	24
Tabela 6 - Composição típica do gás produzido pela gaseificação de biomassa.	27
Tabela 7 - Faixa de determinação do Analisador de gases	41
Tabela 8 - Dados operacionais de uma corrida experimental com carvão	52
Tabela 9 - Análise dos gases da operação com carvão	53
Tabela 10 - Dados operacionais de uma corrida experimental com briquete de cana-de açúcar	54
Tabela 11 - Análise dos gases da operação com briquete de cana-de-açúcar	55

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	15
3 REVISAO BIBLIOGRAFICA E FUNDAMENTOS TEÓRICOS	16
3.1 Biomassa	16
3.2 Tecnologia do Sistema integrado de gaseificação e ciclo combinado – IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle System)	19
3.3 Princípios da gaseificação	24
3.4 Tipos de gaseificadores	28
3.4.1 Gaseificador de leito fixo	28
3.4.2 Gaseificador de leito fixo de fluxo ascendente	29
3.4.3 Gaseificador de leito fixo de fluxo descendente	30
3.4.4 Gaseificador de leito fluidizado	31
4 MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1 Montagem da planta piloto	32
4.2 Procedimento para partida da unidade de gaseificação	37
4.3 Instrumentação da unidade	38
4.4 Análise dos gases	41
4.5 Corridas Experimentais	42
4.6 Operação da unidade piloto	43
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
5.1 Testes e melhorias da unidade de gaseificação	47
5.2 Operação com carvão vegetal	51
5.3 Operação com briquete de cana de açúcar	54
5.4 Operação do conjunto motor gaseificador gerador	57
6 CONCLUSÃO	58
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

Desde 1960, o mundo já discutia sobre os riscos da degradação do meio ambiente e o desenvolvimento sustentável de todas as nações, como por exemplo, na Conferência das Nações Unidas sobre o Ambiente Humano em Estocolmo na Suécia, em junho de 1972. Sobre o mesmo tema aconteceu no Rio de Janeiro, no fim da década de 90, a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, a “Rio-92” entre 3 e 14 de junho de 1992, contando com a presença de 172 países (apenas seis membros das Nações Unidas não estiveram presentes) (SACHS, 2000; FERREIRA, e VIOLA, 1996).

O anseio da humanidade por esses temas está diretamente associado as bruscas mudanças climáticas, a uma série de acontecimentos históricos e sua própria sobrevivência. A conscientização do desenvolvimento dos direitos humanos ganhou mais força por volta da metade do século XX, após a Segunda Guerra Mundial, provavelmente pelo impacto provocado ao mundo em virtude do lançamento da bomba atômica na cidade de Hiroshima. Foi a partir deste acontecimento que o homem se deu conta de que havia criado tecnologia bélica suficiente para sua própria extinção. Assim, a opinião pública se tornou gradativamente mais consciente, tanto da limitação das riquezas naturais, quanto dos perigos decorrentes das agressões ao meio ambiente (SACHS, 2000).

A obtenção da energia elétrica de alguns países desenvolvidos baseia-se atualmente por termoelétrica a carvão, as quais emitem grandes quantidades de dióxido de carbono (CO₂). A China, por exemplo, gera atualmente 80 % do total da sua energia elétrica à base do carvão, a Índia mais de 70%, os Estados Unidos e Alemanha cerca de 50% (IEA, 2008). O CO₂ é um dos principais gases promovedores de mudanças climáticas em todo o planeta, por essa razão há um enorme empenho político e econômico global de reduzir emissões de CO₂ para a atmosfera (IPCC, 2007; STERN, 2007).

Ainda assim, as grandes potências mundiais incluindo as citadas acima relutam em minimizar ou abrir mão do uso do carvão como fonte principal direta na obtenção de energia elétrica, alegando que é uma fonte abundante de baixo custo encontrada em regiões politicamente estáveis (WCI, 2005).

Diante desse cenário, varias potências pesquisam e apostam em tecnologias que vislumbre um processo eficiente na redução de emissões do CO₂ ou reaproveitamento do

mesmo, consolidando com um dos principais objetivos da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD) “estabelecer mecanismos de transferência de tecnologias não-poluentes aos países subdesenvolvidos”.

A técnica de captura e armazenamento de dióxido de carbono (*Carbon Capture and Storage – CCS*) é uma esperança de solução para minimizar as emissões geradas pelo uso do carvão. Há três diferentes métodos de seqüestro ou captura de CO₂: pré-combustão, pós-combustão e combustão oxi - combustível. No processo de gaseificação o método utilizado na captura do CO₂ é o de 'pré-combustão'; no qual o CO₂ produzido na zona de reação dos gaseificadores, como um dos componentes da mistura é removido antes da combustão, por exemplo, em motores de combustão interna e turbina a gás e depois armazenado.

Este sistema separa o dióxido de carbono, comprimindo-o, armazenando e transportando para locais estáveis, como por exemplo, em adequadas formações geológicas.

Atualmente, técnicas de captura e armazenamento de CO₂ estão sendo pesquisadas em diferentes países. O uso dessa tecnologia em termoelétricas ainda estão em fase de pesquisas e desenvolvimento, contanto não há registro de aplicação industrial ou comercial, a previsão dos cientistas para a utilização dessa tecnologia em larga escala é de 2020 a 2030. O custo para esse fim é bastante elevado, uma vez que a pressão de trabalho ultrapassa os 14 MPa. Conseqüentemente, por serem processos de intensivas transformações de energia, causam uma redução de rendimento termodinâmico nas termoelétricas (IPCC, 2005).

A tecnologia de gaseificação é um processo de conversão termoquímica de um insumo orgânico sólido ou líquido em um gás com características basicamente combustíveis, através de sua oxidação parcial, realizado a temperaturas intermediárias, isto é, acima das recomendadas nos processos de pirólise rápida e abaixo das recomendadas nos processos de combustão. Nesse processo, são supridas quantidades restritas de oxigênio na forma de oxigênio puro ou simplesmente ar atmosférico. Isso depende, principalmente, do uso final do gás obtido. O material carbonoso pode também ser gaseificado na presença de quantidades relativas de vapor de água superaquecida sendo incorporada ao agente gaseificante (O₂ ou ar) com o objetivo de produzir uma mistura gasosa especial, conhecida com gás de síntese ou *syngas*, basicamente rica em monóxido de carbono e hidrogênio. A gaseificação, utilizando ar como gaseificante, produz um gás de baixo poder calorífico, de aproximadamente 5

MJ/Nm³ e contendo cerca de 50% em volume de nitrogênio na mistura gasosa na saída do reator (base seca).

Quando a gaseificação é realizada com oxigênio puro, ou mistura de oxigênio mais vapor de água, o gás produzido tem um maior poder calorífico, devido ao fato de que é um gás isento ou com baixo teor de nitrogênio livre na mistura; nessas condições o gás produzido pode alcançar poder calorífico de aproximadamente 10 a 15 MJ/Nm³. O conteúdo médio dos compostos combustíveis no gás resultante da biomassa é para o CO entre 15 e 30 %, para o H₂ entre 12 e 40% e para o CH₄ entre 4,5 e 9%. O poder calorífico do gás fica na faixa de 5 a 15 MJ/m³. Os menores valores correspondem à gaseificação com ar e os maiores à gaseificação com adição de vapor de água ou oxigênio puro. A mistura gasosa obtida a partir da gaseificação do material orgânico vem conquistando um lugar no mercado de energia, por exemplo, Muitas são as aplicações práticas do gás produzido em gaseificadores, desde a geração direta de calor, a combustão em motores alternativos de combustão interna (M_{ACI}) e turbinas à gás para a geração de energia mecânica e elétrica ou como matéria prima na obtenção de combustíveis líquidos, tais como: diesel, gasolina, metanol, etanol, amônia, hidrogênio e outros produtos químicos obtidos através de processos de síntese química catalítica (HOSS e GROENEVELD, 1987).

As razões para decidir por utilizar a gaseificação são numerosas, uma dessas razões é reduzir a dependência de regiões e países às flutuações nos preços de combustíveis importados, além disso apresenta vantagens significativas sobre a queima direta da biomassa ou de combustíveis fósseis, como por exemplo, a geração de eletricidade em pequena escala, a qual pode ser realizada sem a necessidade de um ciclo a vapor, simplesmente pela queima do gás em um motor de combustão interna.

As plantas de co-geração a partir de gaseificação de biomassa combinando ciclos de turbina a gás e poderão ter um futuro promissor. Essas instalações são conhecidas como sistemas BIG/GT (*Biomass Integrated Gasifier/gás Turbine*). Plantas de co-geração com potências elétricas de até 0,5 MW, 5MW e 50MW utilizando a biomassa gaseificada, com reatores do tipo de leito fluidizado atmosféricos e pressurizados, têm sido pesquisados e demonstrados resultados eficientemente satisfatório (De Ruyck et al., 1191; Blackadder et al., 1993; Overend et al., 1993). Em todos os casos há necessidade de limpeza do gás para sua utilização em motores de combustão interna e turbinas a gás na geração de eletricidade (BEENACKERS & MANIATIS, 1993).

De modo geral, pode-se mencionar que existem duas principais rotas de interesse para produção e expansão em escala industrial da tecnologia de gaseificação. A primeira é a produção combinada de calor e energia elétrica, neste caso um gás combustível de qualidade média para alta é utilizado na queima direta em fornos, fornalhas e caldeiras ou diversos tipos de acionamentos primários, tais como: turbinas a vapor, turbina a gás, motor alternativo de combustão interna etc. A segunda rota é a obtenção de gás de síntese, gás de elevada qualidade que pode ser posteriormente reformado em reator catalítico ou fermentativo para obtenção de combustíveis líquidos, tais como: hidrocarbonetos, álcoois hidrogênio, além de alguns insumos químicos e especialidades químicas, como ésteres, amônia etc.

Contudo, algumas desvantagens técnicas devem ser levadas em consideração em relação a essa tecnologia: a gaseificação é um processo tecnicamente mais complicado de realizar do que a queima direta da biomassa, devendo-se ter especial atenção com os aspectos de segurança, uma vez que o gás produzido é tóxico. Deve-se considerar ainda que dependendo das características termodinâmicas do sistema integrado de geração de energia, poderá existir uma redução de eficiência global do sistema como consequência do consumo de energia adicional devido ao maior número de máquinas de fluxo operando, perda de energia pela falta de sistemas de recuperação em processo intermediários de transformação de energia etc.

O desenvolvimento da tecnologia da gaseificação surge como alternativa e interesse industrial para geração de energia elétrica, e assim fazer parte da nossa matriz energética. Para isso, a técnica da gaseificação atualmente está sendo pesquisada e aprimorada em todos os países. As principais dificuldades são observadas na operação, tais como a limpeza seletiva dos gases e a remoção das cinzas. A montagem e operação do sistema de gaseificação nos posicionam bem próximo dessas dificuldades de tal maneira que estimula a busca por uma solução científica mais adequada para cada desafio no momento da operação.

2 OBJETIVOS

Este trabalho teve por objetivo a montagem de uma planta piloto de gaseificação com capacidade de 10 kg/h de biomassa composta por: gaseificador leito deslizante, ciclone, trocador de calor 3-1 para resfriamento dos gases e filtro para retenção de particulados residuais e alcatrão. A unidade foi acoplada a um motor do ciclo Otto e gerador de 60kva visando a co-geração de energia elétrica a partir de biogás produzido.

A planta operou utilizando diferentes biomassa. Neste trabalho, será descrita a operação utilizando como combustível carvão vegetal e briquetes de cana de açúcar. Foram monitoradas as seguintes variáveis operacionais: temperatura do leito, temperatura antes e após o resfriamento do gás, pressão do sistema e vazão do gás combustível. Além disso, foi realizada uma análise dos gases produzidos.

A gaseificação apresenta-se como uma alternativa principalmente para localidades isoladas do meio rural como fonte barata de geração de energia elétrica, podendo ainda ser utilizada em área urbana, em localidades onde existe disponibilidade de biomassa.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentada uma breve revisão bibliográfica a respeito de diferentes biomassas utilizadas na gaseificação, bem como, princípio e tipos de gaseificadores.

3.1 Biomassa

Há pouco mais de 100 anos a biomassa começou a perder cada vez mais sua liderança histórica para a energia do carvão mineral, e depois, com o crescimento contínuo do petróleo e do gás natural, a utilização da biomassa foi reduzida praticamente às residências particulares em regiões agrícolas.

Hoje, em maior ou menor intensidade, a maioria dos países, sejam eles desenvolvidos ou não, está promovendo ações para que as energias alternativas renováveis tenham participação significativa em suas matrizes energéticas. A motivação para essa mudança de postura é a necessidade de redução do uso de derivados do petróleo e, conseqüentemente, a dependência energética desses países em relação aos países exportadores de petróleo. Além disso, a redução do consumo dos derivados do petróleo também diminui a emissão de gases promotores do efeito estufa.

Analisando as tecnologias das fontes energéticas alternativas renováveis, já suficientemente maduras para serem empregadas comercialmente, somente a biomassa, utilizada em processos modernos com elevada eficiência tecnológica, possui a flexibilidade de suprir energéticos tanto para a produção de energia elétrica quanto para mover o setor de transportes.

A biomassa tem origem em resíduos sólidos (animais, vegetais, industriais e florestais), voltada a fins energéticos, abrange a utilização desses vários resíduos para a geração de fontes alternativas de energia. Apresenta diferentes tecnologias para o processamento e transformação de energia, mas todas as tecnologias de biomassa, atualmente usadas no mundo, possuem dois problemas cruciais: o custo da biomassa e a eficiência energética de sua cadeia produtiva.

A principal fonte para gerar energia da biomassa está nos resíduos. Os resíduos gerados em todo o mundo são recurso de grande potencial para a obtenção de energia apenas sob uma adequada exploração. Houve muitas tentativas para estimar a produção e o uso dos

resíduos globais, mas todas apresentaram muitas variações, pela existência dos diferentes usos alternativos, como a ração animal, o controle de erosão, o uso como fertilizante e medicinal; e também pela necessidade de se determinar o que é e o que não é um resíduo reutilizável para a obtenção de energia, e assim determinar sua verdadeira disponibilidade.

Segundo Smill (1999), os principais resíduos utilizados em nível mundial na tentativa de se estimar o potencial energético são os resíduos vegetais.

Atualmente, a produção mundial dos principais produtos agrícolas utilizados na obtenção de energia é grande, e tem muitas possibilidades de incrementar sua competitividade energética, como é apresentado na Tabela 1.

A cana-de-açúcar é a matéria-prima de maior produção em todo o mundo, produção esta liderada pelo Brasil com quase 400 milhões (Mt) de produção anual, seguido por Índia, China, Tailândia, Paquistão e México. A China é o maior produtor de arroz (187 milhões de Mt), os Estados Unidos são o maior produtor de milho (300 milhões de Mt) e de soja (86 milhões de Mt), a União Européia é a maior produtora de beterraba com quase 127 milhões de Mt. A Europa e os Estados Unidos são os principais concorrentes do maior produto energético obtido da biomassa, o álcool da cana-de-açúcar, já que a beterraba e o milho são utilizados por esses países para a obtenção do produto emergente.

Outros resíduos importantes são os resíduos sólidos urbanos e industriais, que estão sendo utilizados em alguns países devido a seu avanço tecnológico. Mas é difícil desenvolver uma análise relevante em âmbito mundial, dado que sua natureza compreende muitos materiais orgânicos e não-orgânicos, e a proporção da composição dos resíduos varia de acordo com o nível econômico e o desenvolvimento industrial de cada país, e também pelos diversos destinos desses resíduos.

Tabela 1 - Produção mundial dos principais produtos para obtenção de energia.

<i>Matéria prima</i>	<i>Produção (Mt)*</i>	<i>Produção de resíduos calculado (Mt)*</i>
Cana (bagaço)	1.318.178.070	395.453.421
Arroz (casca)	608.496.284	172.934.643,9
Mandioca (rama)	195.574.112	58.261.527,96
Milho (palha e sabugo)	705.293.226	934.442.995,1
Soja (restos de cultura)	206.409.525	320.966.811,4
Algodão	67.375.042	16.843.760,5
Beterraba	237.857.862	-

Fonte: FAO, 2008.

Os resíduos florestais constituem parte importante na disponibilidade da biomassa em alguns países pelas grandes quantidades geradas na colheita e na ação industrial. Essa fonte energética está encontrando mercado, em consequência do desenvolvimento tecnológico e dos baixos custos que representa sua utilização eficiente. Os resíduos animais representam importante quantidade de matéria-prima para a obtenção de energia gerada pelos principais rebanhos (bovino, ovino e suíno), e os países que possuem maior possibilidade para o seu aproveitamento são o Brasil em gado bovino e a China nos gados ovino e suíno, ultrapassando 160 milhões de cabeças para cada rebanho.

Certos resíduos, como por exemplo, resíduos de madeira (serragem, maravalha, lascas etc.) constituem uma forma de biomassa, ou seja, são materiais orgânicos compostos principalmente de carbono e hidrogênio. Estes resíduos são gerados em maior parte em serrarias e em indústrias moveleiras, que se forem dispersos no meio ambiente podem trazer sérios problemas de poluição, especialmente se a madeira sofrer algum tratamento químico prévio.

O carvão vegetal é obtido através da carbonização da lenha, em fornos, a uma eficiência de conversão entre 50 a 55%. Sua composição média é: 74,5% de carbono; 3% de hidrogênio; 17% de oxigênio; 1% de nitrogênio; 0,5% de enxofre; e, 4% de cinzas, (Lopes *et al.* 2010). Apresenta um poder calorífico (PC) médio de cerca de 1100 kcal/kg (poder calorífico inferior, PCI, de 950 kcal/kg e um poder calorífico superior, PCS, de 1200 kcal/kg). Injetando vapor d'água, o PC médio passa para 5.400 kcal/kg.

A lenha verde apresenta cerca de 40% de umidade. Considerando a lenha seca, sua composição é: 50,2% de carbono; 6,3% de hidrogênio; 43,1% de oxigênio; 0,06% de nitrogênio; e, 0,38% de cinzas, (Lopes *et al.* 2010).

Segundo Castro *et al.* (2009), o bagaço de cana-de-açúcar apresenta a seguinte composição: 45,15% de carbono; 5,4% de hidrogênio; 41,8% de oxigênio; 0,2% de nitrogênio; 0,02% de enxofre; e, 7,4% de cinzas.

Dentre as soluções para reduzir os efeitos nocivos ao ambiente encontram-se a incineração e a gaseificação, que de modo geral para qualquer resíduo, constituem soluções para atingir três objetivos:

- Destruir os resíduos, descaracterizando-os e transformando-os em cinzas;
- Reduzir drasticamente o volume de resíduos;
- Gerar energia a partir de resíduos combustíveis.

Esses três resultados constituem o grande mérito da incineração e da gaseificação, ou seja, além de minimizar os resíduos reduzindo sua periculosidade, podem gerar, a partir dos mesmos, energia térmica e/ou energia elétrica.

A gaseificação é uma tecnologia promissora para a utilização da biomassa e de outros resíduos, devido ao baixo impacto causado ao meio ambiente e a redução das emissões globais de CO₂ (Campoy *et al.*, 2009; Kirubakaran *et al.*, 2009). O processo de gaseificação da biomassa consiste em uma série de reações simultânea.

A mistura de gases gerada no final do processo varia consideravelmente em função de diversos parâmetros, como a temperatura utilizada, pressão, tempo de residência, concentração de oxigênio no sistema reacional e as propriedades da biomassa (FAAJ *et al.*, 2005).

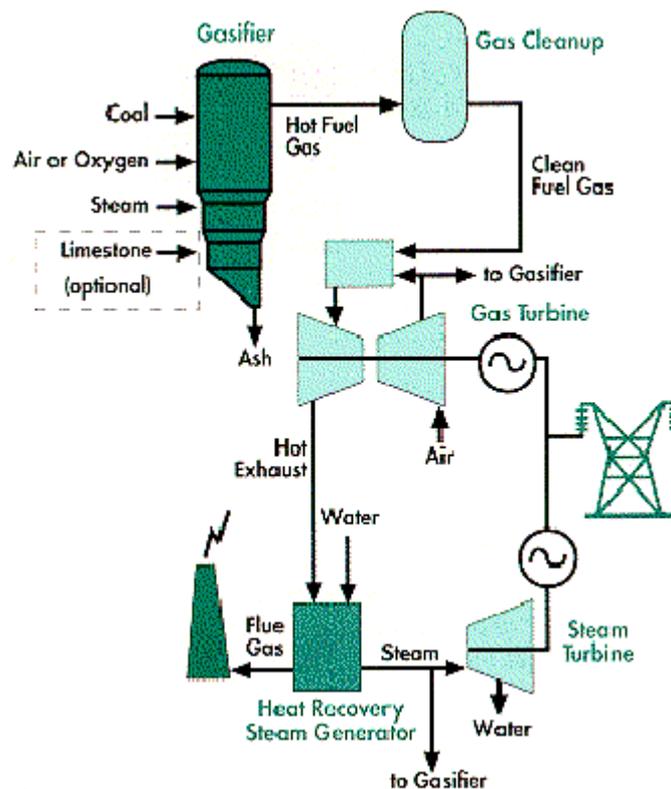
3.2 Tecnologia do Sistema integrado de gaseificação e ciclo combinado - IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle System)

Com base de dados pesquisados pelo *National Energy Technology Laboratory* (NETL) (Do/NETL, 2007a), as primeiras experiências relevantes de gaseificação no setor elétrico foram feitas já na década de 60 com plantas que processavam biomassa, resíduos municipais e resíduos de petróleo. Essas plantas, na época, ainda não operavam em ciclo

combinado. Plantas de gaseificação operando em ciclo combinado foram introduzidas a partir do início dos anos 90.

Neste sistema, como mostra a figura 1, o combustível é convertido em gás combustível pobre que, após sua limpeza (retirada de particulados e alcatrão, caso existente) alimenta uma turbina a gás, seguindo para uma turbina a vapor, responsáveis pela co-geração de energia elétrica.

Figura 1 – Esquema do sistema integrado de gaseificação e ciclo combinado (IGCC)



Fonte: Integrated Gasification Combined Cycle Systems

Nesta seção, serão apresentadas as plantas IGCC atualmente em operação, indicando o ofertante do gaseificador, insumos, o início de operação e a capacidade elétrica. Para compreender e comparar melhor as diferenças regionais no desenvolvimento da tecnologia, as plantas são apresentadas em três tabelas que separam os projetos pelas regiões Europa, América e Ásia/Pacífico. Nota-se que nestas tabelas são citadas somente as plantas que são indicadas na base de dados da NETL (DOE/NETL2007b), pois essa base de dados possui um filtro rígido em relação à relevância dos respectivos projetos. Em diferentes fontes encontram-se indicações de diversos outros projetos (Minchener, 2005, Powerclean, 2004). Esses

projetos, porém, ou nunca alcançaram a operação estável, já foram abandonados ou não possuem um porte relevante. Plantas que estão na base de dados do NETL, mas encerraram a operação por inviabilidade econômica ou geram energia através de outras tecnologias que em Ciclo Combinado (por exemplo, motor a gás), não foram incluídas aqui.

Tabela 2 - Plantas IGCC na Europa.

Planta	País	Gaseificador	Início de operação	Insumo	MW e
Värnamo IGCC Demonstration Plant	Suécia	FW PCFBG	1993	Biomassa/Resíduos	10
Buggenum IGCC Plant	Holanda	Shell	1994	Carvão	250
Vresova IGCC Plant	República Tcheca	Sasol Lurgi Dry Ash	1996	Carvão	350
Puertollano IGCC Plant	Espanha	PRENFLO	1997	Carvão	330
ISAB Energy IGCC Project	Itália	GE	1999	Asfalto	510
Thermoselece Vresova	República Tcheca	Siemens SFG	2007	Carvão	60
Sulcis IGCC Project	Itália	Shell	2009	Carvão	520

Fonte: Adaptada de DOE/NETL *MWe indica a capacidade de energia elétrica instalada, se diferenciando da medida MWt que indica a capacidade térmica, isto é a capacidade de energia que é introduzido no sistema pelo combustível.

A única planta IGCC que opera com biomassa e resíduos municipais é uma planta da Foster Wheeler PCFBG, que foi instalada em Värnamo, Suécia, em 1993. Note-se que existem diversas plantas de gaseificação de biomassa e resíduos na Europa. Como esses combustíveis apresentam mais dificuldades técnicas que a gaseificação de combustíveis fósseis, as plantas instaladas possuem um porte menor e o gás produzido geralmente é usado em co-combustão em caldeiras de carvão ou em motores a gás. Em suma, as empresas mais representadas no mercado europeu são a Lurgi, a Shell e a GE. Atualmente, essas empresas operam exclusivamente plantas a carvão ou petróleo. A Lurgi desenvolveu também gaseificadores para processar resíduos e biomassa. Por inviabilidade econômica, nenhuma planta a base destes combustíveis encontra-se atualmente em operação. A gaseificação nos EUA se concentra no processamento de carvão e coque de petróleo. Durante a última década, havia desenvolvimento menos forte que na Europa, especialmente com respeito à gaseificação

de resíduos de refinaria. Atualmente, encontram-se quatro plantas em operação, somando aproximadamente 700 MWe (veja Tabela 3). Mais que 60 % dessa capacidade são gerados por gaseificadores da GE. O gaseificador E-Gas da Conocco-Phillips é responsável pelo restante. A Shell não entrou no mercado norte-americano. Projetos para a gaseificação de biomassa não foram registrados na base de dados do NETL (DOE/NETL 2007b).

Tabela 3 - Plantas IGCC na América do Norte.

<i>Planta</i>	<i>País</i>	<i>Gaseificador</i>	<i>Início de operação</i>	<i>Insumo</i>	<i>MW e</i>
Wabash River	EUA	E-GAS	1995	Carvão/ Coque de Petróleo	260
El Dorado Gasification Power Plant	EUA	GE	1996	Coque de Petróleo	35
Polk County IGCC Project	EUA	GE	1996	Carvão	250
Delaware City Refinery	EUA	GE	2002	Coque de Petróleo	160

Fonte: Adaptada de NETL DOE/NETL (2007b)

O mercado norte-americano, diferentemente do mercado europeu, apresenta mais ações para a promoção do IGCC. Na Tabela 4 são indicados os projetos que serão realizados durante os próximos anos. Dos dez projetos planejados, oito são localizados nos EUA e somente dois no Canadá. O início de operação do primeiro projeto é indicado para o ano 2011. Nota-se que não haverá um movimento relevante em relação à participação de mercado dos ofertantes. A GE manterá a sua posição líder, seguida pela ConocoPhillips. Porém, entrarão com a Siemens e a MHI também empresas estrangeiras no mercado americano. O projeto FutureGen merece atenção especial entre os mencionados, sendo que este projeto provém de uma iniciativa do governo dos EUA para promover a demonstração da tecnologia IGCC. Para os projetos das concessionárias MHI, Siemens e GE, cujo início de operação é previsto para 2013 e até o ano de 2015, prevê a adição de um sistema de CCS, não é planejada, mas somente anunciada como opção no futuro.

Tabela 4 - Plantas IGCC em Planejamento na América do Norte.

<i>Planta</i>	<i>País</i>	<i>Gaseificador</i>	<i>Início de operação</i>	<i>CCS</i>	<i>Insumo</i>	<i>MW e</i>
Edwardsport IGCC	EUA	GE	2011	Não	Carvão	630
Taylorville Energy Center	EUA	GE	A partir de 2012	Sim	Carvão	630
Lima Energy IGCC Plant	EUA	E-GAS	2013	Não	Coque de Petróleo	540
Mesaba Energy Project	EUA	E-GAS	2013	Não	Carvão	600
Polk County IGCC Expansion	EUA	GE	2013	Não	Carvão	630
Wallula Energy Resource Center	EUA	MHI	2013	Sim	Carvão	600-700
Summit Power Group	EUA	Siemens	2014	Sim	Carvão	245
Hydrogen Energy California	EUA	GE	2015	Sim	Coque de Petróleo	500
EPCOR	Canadá	Siemens	2015	Sim	Carvão	500
Polygen Project	Canadá			Sim	Carvão / Coque Petróleo	100

Fonte: Adaptada de MIT (2009) e DOE/NETL (2007b)

Na Ásia e Austrália existem atualmente quatro projetos em planejamento, dos quais dois são situados na China e dois na Austrália. Percebe-se um forte envolvimento governamental nos projetos da região. O projeto GreenGen foi autorizado pelo Ministério de Ciência e Tecnologia da China (Ministry of Science and Technology of the Peoples Republic of China – MOST) como programa de pesquisa científica chave no décimo-primeiro período dos planos quinquenais e obtém apoio financeiro do governo (LIU *et al.*, 2010). O projeto ZeroGen foi estabelecido pelo governo de Queensland para facilitar o desenvolvimento de tecnologias de carvão de emissão zero. A instalação de um sistema de CCS é prevista para todos os projetos.

Tabela 5 - Plantas IGCC em Planejamento na Ásia e Região do Pacífico.

Planta	País	Gaseificador	Início de operação	CCS	Insumo	MW e
GreenGen	China	TPRI	2009	Sim(2015)	Carvão	250(2009) 800(2015)
NZEC	China	Não definido	2014	Sim	Carvão	Não definido
Hydrogen Energy Kwinana	Austrália	GE	Não definido	Sim	Carvão	500
ZeroGen	Austrália	MHI	2015	Sim(2017)	Carvão	530
EPCOR	Canadá	Siemens	2015	Sim	Carvão	500
Polygen Project	Canadá			Sim	Carvão / Coque Petróleo	100

Fonte: Adaptada de MIT (2009) e DOE/NETL (2007b)

A maioria desses projetos anunciou o início de operação até o ano 2015. Em quase todos, é previsto a realização de um sistema de CCS, com exceção de algumas plantas norte-americanas cujo início de operação é previsto para um prazo menor (até 2013). Tendo oito projetos em andamento, os Estados Unidos se destacam como maior ator em relação à introdução da tecnologia IGCC. Percebem-se como agentes mais ativos o Reino Unido na Europa e a China na Ásia. Vale mencionar que, em todas as regiões, as plantas se concentrarão mais na gaseificação de carvão. Resíduos de refino e Biomassa possuem pouca relevância nos projetos anunciados.

3.3 Princípios da gaseificação

Gaseificação é a conversão de combustíveis sólidos (madeira, rejeitos de agricultura, entre outros) em uma mistura gasosa combustível, através de reações termoquímicas, envolvendo vapor e oxigênio do ar. O processo de gaseificação é definido como uma combustão parcial da biomassa. A combustão parcial ocorre quando o ar ou, mais precisamente, o oxigênio está em quantidade inferior ao que seria necessário para uma queima completa da biomassa. Em uma combustão completa, dado que a biomassa contém moléculas de carbono, hidrogênio e oxigênio, obtém-se como produto o dióxido de carbono (CO₂) e vapor de água (H₂O).

Em uma combustão parcial, produzem-se monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂), ambos combustíveis. Em princípio, qualquer tipo de biomassa pode ser convertida em combustível gasoso por meio desse processo. O gás provindo da gaseificação é popularmente conhecido como gás de baixo poder calorífico, devido à grande porcentagem de nitrogênio, que não é um gás combustível.

A combustão exige uma quantidade estequiométrica de ar chamado teórico. Contudo, para assegurar uma combustão completa, é necessário um excesso de ar, determinante na eficiência combustiva, pois controla o volume, temperatura e entalpia dos produtos da combustão. Alguns autores recomendam um excesso de ar de 20 a 25% acima do ar estequiométrico (teórico), para queima de madeira em fornalha de grelha. Afirmam ainda que um grande excesso de ar é indesejável, pois aumenta as perdas de calor, reduz a eficiência e diminui a temperatura e comprimento da chama.

Apesar das perdas de energia na conversão da madeira em gás, a gaseificação ainda é um processo energeticamente competitivo com a combustão direta quando se consideram as eficiências globais de aproveitamento do combustível. Como a combustão da madeira deve ser realizada com grande excesso de ar, para evitar formação excessiva de fumos, a eficiência de queima situa-se entre 60 a 75 %, dependendo da umidade da madeira, do controle de ar e das características da fornalha. Por outro lado, a queima do gás pode ser feita com pequeno excesso de ar (de 5 a 20 %), com alta eficiência, da ordem de 80 a 90 %.

Assim, considerando a eficiência da conversão da madeira em gás de 80 %, tem-se a eficiência global na ordem de 65 a 80 %, equivalente àquela da queima direta, conforme observam D'Ávila e Makray (1981).

A gaseificação de combustíveis sólidos é um processo bastante antigo e é realizado com o objetivo de produzir um combustível gasoso, com melhores características de transporte, melhor eficiência de combustão e, também, que possa ser utilizado como matéria-prima para outros processos.

A combustão consiste na completa oxidação do material, que ocorre somente em presença de oxigênio em quantidades iguais, ou superiores à estequiométrica. Os produtos resultantes são a mistura de gases formadas principalmente por dióxido de carbono e vapor d'água (em maiores quantidades), monóxido de carbono, SO_x, NO_x e cinzas. A formação

desses gases ocorre durante todo o processo de aquecimento, mas, o que caracteriza o processo de combustão é a oxidação total da biomassa a esses produtos gasosos. Além da elevada concentração de agente oxidante, é necessário uma temperatura acima de 1200°C para que o material seja totalmente convertido.

Segundo Reed e Das (1988) os processos térmicos envolvidos na gaseificação de biomassa são: a pirólise, a gaseificação e a combustão e podem ocorrer simultaneamente dentro do gaseificador.

A pirólise lenta, ou convencional e também denominado de carbonização, tem líquidos e gasosos. A pirólise rápida (da qual existem várias versões) é dirigida à obtenção principalmente de gases e líquidos. A pirólise rápida também é denominado de *Flash* ou *Ultra*.

A gaseificação é um processo termoquímico e ocorre numa faixa de temperatura superior à da pirólise e inferior a temperatura de combustão, sob pressão atmosférica, pressurizado superiores (~2Mpa) ou vácuo. Existem estudos que tratam da gaseificação utilizando como gaseificante vapor d'água superaquecida, o que requer temperaturas bem menores (~700°C) (YANICK, *et al.*, 2007). O gás produzido possui de baixa a média capacidade calorífica (de 5 a 20 MJ/Nm³), o que depende da concentração de gases combustíveis no processo. Se em presença de ar, o gás final será diluído em N₂, o que reduz seu poder calorífico. Se o processo ocorre em ausência de ar, ou em presença somente de oxigênio, não ocorre diluição, aumentando o seu poder calorífico. Os gases produzidos formam uma mistura de monóxido de carbono e hidrogênio (em maiores quantidades), dióxido de carbono, metano e outros gases. Sua composição está intimamente ligada às condições em que o processo é executado (BAIN, 2005).

A quantidade estequiométrica de ar para a combustão completa de biomassa seca com composição típica CH_{1,4} O_{0,6} é aproximadamente 6 kg de ar/kg de biomassa. Para a gaseificação existe uma quantidade ideal de ar que produz somente CO e H₂, que é ao redor de 20% da estequiométrica, ou seja, 1,2 kg de ar/kg de biomassa. Contudo, essa reação é endotérmica sendo necessário uma fonte externa de calor para completar a reação. Tipicamente, utiliza-se uma quantidade maior de ar que fornece calor ao queimar-se com a biomassa. A composição típica do gás combustível produzido por gaseificação é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 Composição típica do gás produzido pela gaseificação de biomassa.

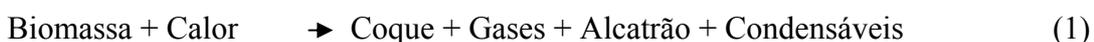
<i>Composto</i>	<i>Símbolo</i>	<i>Quantidade (%volume)</i>
Monóxido de Carbono	CO	21,0
Dióxido de Carbono	CO ₂	9,2
Hidrogênio	H ₂	14,2
Vapor de Água	H ₂ O	4,8
Metano	CH ₄	1,6
Nitrogênio	N ₂	48,4

Fonte: Reed e Das (1988)

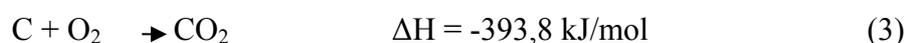
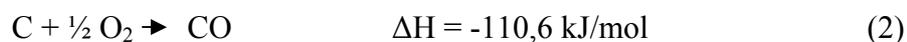
O poder calorífico desse gás produzido é da ordem de 5.500 kJ/Nm³, considerando o nitrogênio presente no ar.

O processo de gaseificação da biomassa resulta de complexas reações, ainda não bem conhecidas em sua totalidade. Porém, o atual estágio de seu desenvolvimento permite que ocorra a subdivisão destas reações em várias etapas. A localização da zona de combustão é determinada pela posição da entrada de ar e a temperatura desta zona varia normalmente entre 900°C e 1.300°C, resultado da reação exotérmica entre o combustível e o oxigênio do ar. Os gases quentes da zona de combustão passam em seguida para zona de redução, sempre adjacente, acima ou abaixo, onde na ausência de oxigênio ocorre o conjunto de reações típicas que originam os componentes combustíveis do gás produzido. A zona de pirólise fica situada acima das zonas de combustão e redução, que fornecem a energia necessária para os processos pirolíticos. As reações de pirólise começam a ocorrer a temperaturas em torno de 400°C, quando a estrutura dos materiais ligno-celulósicos começa a se decompor por ação térmica. Consideradas globalmente, as reações de pirólise são exotérmicas, formando vapor d'água, metanol, ácido acético e uma grande quantidade de alcatrão. As etapas e suas respectivas reações, podem ser divididas da seguinte forma:

- Etapa de pirólise ou decomposição térmica, que se desenvolve a temperaturas próximas de 600°C.



- Oxidação de parte do carbono fixo do combustível, método que constitui a fonte de energia térmica para o processo de volatilização e gaseificação.



- Gaseificação propriamente dita, que inclui reações heterogêneas entre os gases e o coque residual, assim como, reações homogêneas entre os produtos já formados.

Reações Heterogêneas

- a) Reação de Boudouard



- b) Reação carbono vapor



- c) Reação de formação de metano



Reações Homogêneas – fase gasosa

Reação de “deslocamento” da água



- Craqueamento do alcatrão – processo de destruição térmica das moléculas que formam o alcatrão para a obtenção de CO, CO₂, CH₄ e outros gases como produtos. (Sánchez, 2008):

3.4 Tipos de gaseificadores

Para Ciferno e Marano (2002), os gaseificadores podem ser classificados segundo a pressão, em atmosféricos ou pressurizados, e segundo ao tipo de leito, em fixo ou fluidizado.

3.4.1 Gaseificador de leito fixo

Os outros sistemas apresentam a vantagem de utilizar tecnologia simples, porém há limite de dimensionamento à planta de 10-15 t biomassa por hora, e normalmente opera à temperatura de 1000⁰C. Dependendo da direção do fluxo do ar, os gaseificadores de leito fixo são classificados em:

- Contracorrente (*updraft*);
- Concorrente (*downdraft*);
- Fluxo cruzado (*cross-flow*)

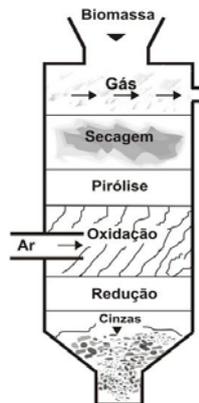
São sistemas simples e eficientes, trabalhando com combustíveis de alta densidade e granulometria (10-100mm), sendo indicados para gaseificar madeira e carvão.

Nos gaseificadores de leito fixo, a biomassa é alimentada pelo topo e passa pelos seguintes processos sucessivos: secagem, pirólise (conversão da biomassa em produtos líquidos ou gasosos), carbonização e combustão dos resíduos carbonoso, quando estes assentam no fundo do gaseificador. O gás produzido é retirado no topo do gaseificador e as cinzas no fundo. O gás produzido neste processo tem baixa velocidade e baixa temperatura. A baixa temperatura de operação cria uma quantidade considerável de óleo condensado e alcatrão no gás produzido.

3.4.2 Gaseificador de Leito Fixo de Fluxo Ascendente

Gaseificadores de fluxo ascendente (Figura 2) produzem gases com pouco particulado, mas com altos teores de alcatrão. Não é indicado para veículos motorizados. Rajadas de ar e vapor são injetados para manter as cinzas abaixo da temperatura de fusão e para facilitar a conversão de carvão. O gás produzido neste processo tem baixa velocidade e baixa temperatura. A baixa temperatura de operação cria uma quantidade considerável de óleo condensado e alcatrão no gás produzido. Entretanto, o efeito filtrante do leito e baixa velocidade de vapor produzem um gás com baixa concentração de partículas sólidas. Este requer uma grande quantidade de combustível denso e uniforme.

Figura 2 - Gaseificador de Fluxo ascendente

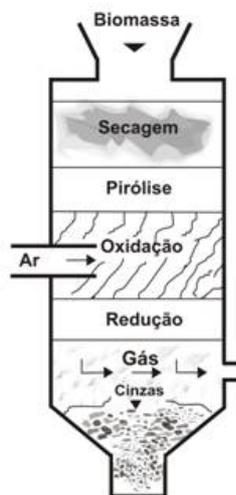


Fonte: Ciferno e Marano (2002), modificado

3.4.3 Gaseificador de Leito Fixo de Fluxo Descendente

Gaseificadores de fluxo descendente (Figura 3) produzem gases com baixos teores de alcatrão e de material particulado. O baixo rendimento e dificuldade de manuseio de alta quantidade de umidade e cinzas são problemas comuns em pequenos gaseificadores descendentes. Ele é mais indicado para motores à combustão interna do que gaseificadores ascendentes que produzem grandes quantidades de vapor de alcatrão que podem interferir seriamente nos motores de combustão.

Figura 3 - Gaseificador de Fluxo descendente.



Fonte: Ciferno e Marano (2002), modificado

3.4.4 Gaseificador de leito fluidizado

Gaseificadores de leito fluidizado têm sido utilizados na conversão termoquímica da turfa já há muitos anos, mas ainda não existe muita experiência na conversão da biomassa, pelo menos em grande escala. Nos equipamentos desse tipo, emprega-se um material como meio fluidizante, que arrasta a biomassa, aumentando o contato desta com o elemento oxidante e, conseqüentemente, aumentando as taxas de reação.

Gaseificadores de leito fluidizado são mais adequados à conversão de uma maior quantidade de biomassa sistemas com capacidade entre 10 e 20 toneladas de biomassa por hora já são operacionais. São, também, mais flexíveis quanto às características do insumo, podendo ser empregados na conversão de biomassa com mínimas necessidades de processamento anterior à alimentação. Em função dessas vantagens (além do controle mais fácil), é o princípio que tem sido empregado em quase todos os projetos de desenvolvimento de sistemas IGCC (sigla em inglês de “gaseificação integrada a ciclos combinados”). Por outro lado, além dos maiores custos operacionais, os problemas de adequação dos gases quanto à sua qualidade tendem a ser maiores.

Em função da própria natureza do processo, a quantidade de material particulado arrastada tende a ser maior; um segundo aspecto é que a maior temperatura de saída dos gases permite que os álcalis saiam ainda na fase gasosa, impondo dificuldades adicionais à limpeza.

Há dois modos de fornecer calor, direto e indireto. No fornecimento de calor direto a calor requerido para a gaseificação vem da combustão do carvão no reator.

No modo indireto o carvão removido do gaseificador é queimado num recipiente separado. A vantagem é que os subprodutos da queima do carvão não se misturam com os produtos da gaseificação.

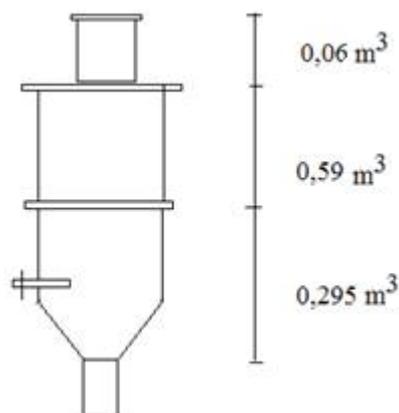
4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi conduzido no laboratório de Sistemas de Separação e Otimização de Processos (LASSOP), situado no campus da Universidade Federal de Alagoas (UFAL).

4.1 Montagem da planta piloto

O gaseificador tem geometria cilíndrica, construído em de aço carbono 1020, revestido internamente por uma camada de tijolos refratários tipo cunha, para isolamento. Apresenta configuração concorrente e, portanto, com menor formação de alcatrão que a configuração contracorrente, e está subdividido em três módulos: módulo de reação com um volume de aproximadamente $0,3 \text{ m}^3$, o qual engloba as zonas de pirólise, oxidação e redução; módulo de secagem com um volume de $0,6 \text{ m}^3$; e, módulo de alimentação com um volume inferior a $0,1 \text{ m}^3$. É munido com sistema de desobstrução da grelha com garfos oscilantes, além de uma grelha dupla. Na base apresenta um cone para retirada das cinzas, o qual fica imerso em um selo hidráulico, Figura 4.

Figura 4 - Desenho esquemático do gaseificador.



Fonte: Autor (2011)

A unidade de gaseificação foi entregue desmontada, Figura 5, tendo sido verificada a existência ou não de danos sofridos no transporte. Foram realizadas medições das peças e equipamentos desmontados, para posterior desenho de detalhamento dos equipamentos.

Figura 5 - Ciclone e trocador, desmontados.



Fonte: Autor (2011)

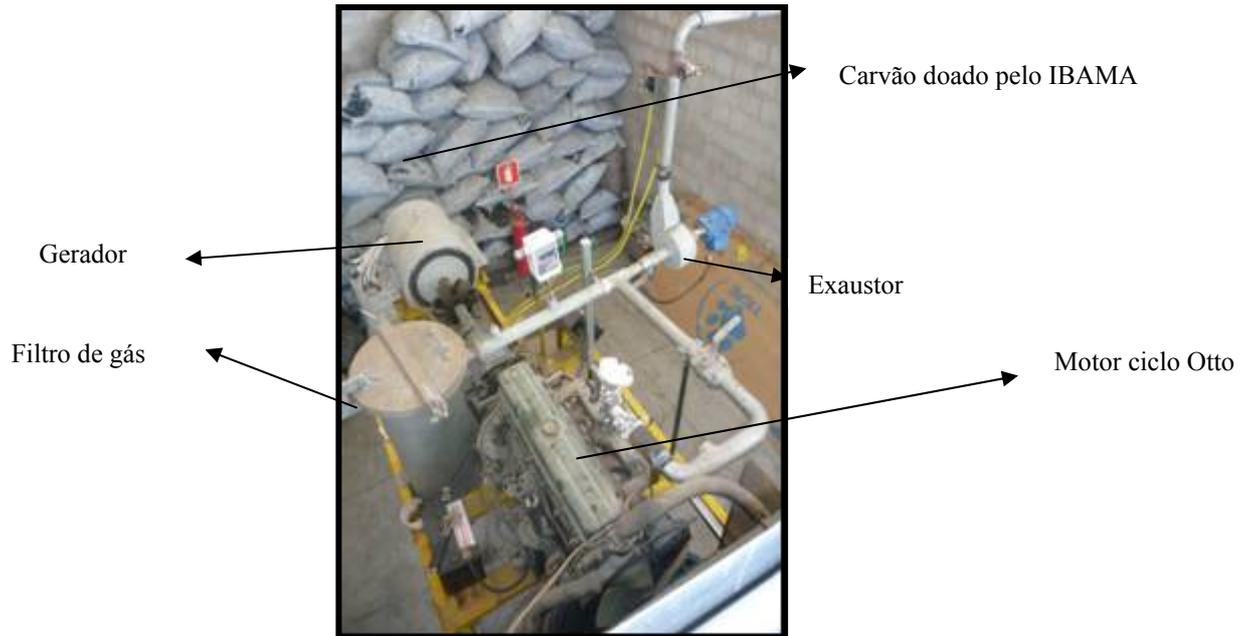
Fazem parte da unidade piloto: ciclone para retirada dos particulados; trocador de calor para retirada da umidade e parte do alcatrão; filtro para retenção de particulados residuais e alcatrão; exaustor para geração do vácuo na partida do equipamento, até atingir o estado estacionário; motor do ciclo Otto e gerador de 60 KVA, (Figuras 6 e 7).

Figura 6 - Unidade piloto de gaseificação (vista frontal).



Fonte: Autor (2011)

Figura 7 - Unidade piloto de gaseificação (vista superior).



Fonte: Autor (2011)

Existe um selo hidráulico que para garantir a integridade do equipamento. Os equipamentos devem estar 30 cm imersos na camada de água, o que dará uma pressão de 30 mmca, acima da qual, haverá a liberação dos gases para a atmosfera, com expulsão da água. A pressão de operação normal é cerca de 12 mmca.

O gaseificador foi montado em um galpão, de forma a garantir a segurança operacional, estando munido de aberturas laterais para saída dos gases, em caso de um possível vazamento, facilitando a dispersão dos gases gerados, visando à preservação da saúde da equipe e a integridade da unidade piloto de gaseificação (Figura 8).

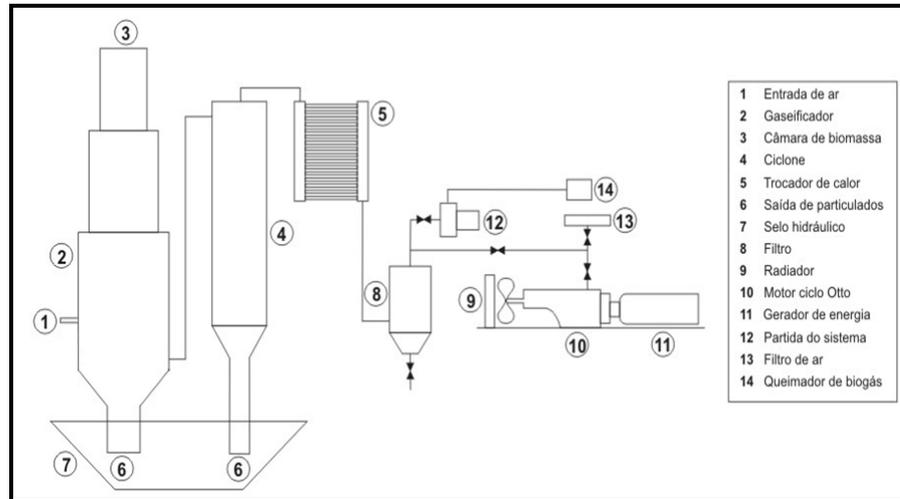
Figura 8 - Vista do galpão construído para abrigar o gaseificador



Fonte: Autor (2011)

A Figura 9 apresenta um desenho esquemático do funcionamento da unidade piloto de gaseificação.

Figura 9 - Fluxograma esquemático da unidade de gaseificação.



Fonte: Autor (2011)

Os gases combustíveis provenientes da base do gaseificador passam diretamente para o ciclone, sendo as partículas coletadas, descarregadas diretamente no selo hidráulico, situado na base do ciclone. As cinzas provenientes do gaseificador passam, através da grelha, diretamente para o selo hidráulico. Ao sair do ciclone, os gases passam em um trocador de calor, cujo projeto original utiliza ar como fluido refrigerante. Ao sair do trocador, os gases, juntamente com o alcatrão não condensado, passam por um filtro para a retirada do alcatrão remanescente. O elemento filtrante é constituído de estopa de algodão, sem compactação, para não elevar a perda de carga do sistema, sendo colocada internamente no cartucho (cesto de metal), o qual deve ser revestido externamente com feltro (elemento filtrante usado em exaustores de fogão), o qual irá reter boa parte do alcatrão.

É importante proceder com a retirada do alcatrão (óleo pirolítico de valor comercial), pois caso contrário irá condensar no coletor de admissão do motor, devido ao pequeno vácuo formado no coletor. A biomassa contém bem mais alcatrão que o carvão vegetal.

Durante a partida do gaseificador há produção parcial dos gases combustíveis, permanecendo a linha de gás alinhada para a atmosfera, passando por um exaustor, o qual fornece a tiragem necessária ao sistema. Quando o gaseificador estiver em regime

estacionário, há a produção de gases combustíveis, sendo a linha de gases alinhada para a alimentação do motor, em cujo escapamento sairá apenas CO₂ e vapor d'água.

O eixo do motor aciona um gerador de 60 KVA, promovendo, assim, a geração de energia elétrica.

O maior problema dos gaseificadores é a instabilidade da operação. Todo gaseificador, durante a operação, forma bolsas de gás, o que implica em redução da rotação do motor e da eficiência do sistema, devido à redução de temperatura e, conseqüentemente, da pressão. A formação deste vazio se dá na zona de oxidação, região no qual ocorre a alimentação do ar, havendo o consumo do combustível e a formação dos gases, o que provoca uma elevação de pressão no leito do reator, implicando em problemas de segurança. Por este motivo deve-se, a cada 35-40 minutos, movimentar o leito, de forma a redistribuir o combustível no corpo do gaseificador.

A unidade é considerada segura, principalmente quanto a risco de explosão, devido à presença do selo hidráulico na base do gaseificador e do ciclone, o que permite o alívio imediato de qualquer elevação brusca de pressão, no interior do gaseificador. O selo hidráulico é de 300 mmca, acima da qual, haverá a liberação dos gases para a atmosfera, com expulsão da água. A pressão de operação normal é cerca de 12 mmca.

Na montagem e operação da unidade foram utilizados Equipamentos de Proteção Individual (EPI's) adequado, tendo sido utilizado avental e manga de raspa de couro, bata, capacete, luvas de diferentes tipos, óculos ampla visão, máscara e sapatos de segurança, a depender do serviço a ser realizado. Sempre que possível foi utilizado Equipamento de Proteção Coletiva (EPC), como por exemplo, placa defletora, evitando o lançamento de chama pela entrada de ar, provocado pela elevação de pressão, por consequência de qualquer distúrbio no leito.

Durante o processo de montagem foi verificado que os flanges do trocador de calor e do ciclone não estavam com os furos alinhados, necessitando de ajustes de forma a amenizar o tensionamento da tubulação.

Foi realizada uma inspeção para verificação do alinhamento das peças e danos sofridos durante a estocagem e transporte. Para montagem dos flanges foram substituídas todas as juntas, sendo utilizado o papelão hidráulico grafitado.

Após o processo de montagem da unidade piloto de gaseificação, os suportes metálicos receberam uma demão de tinta tipo *primer*, dificultando assim futuros problemas com oxidação do material.

Foi realizada a montagem e teste do motor ciclo Otto com operação a gasolina, bem como, do painel de comando. Tendo sido realizada a adaptação para alimentação do motor com o gás combustível (Figura 10).

Figura 10- Teste de adaptação e funcionamento do motor



Fonte: Autor (2011)

Ao término da etapa de montagem, foi realizada uma bateria de teste, no intuito de determinar eventuais falhas dos componentes da unidade ou até mesmo falhas na montagem, como folga nos flanges, juntas mal posicionadas, etc.

4.2 Procedimento para partida da unidade de gaseificação

Foi desenvolvido um procedimento para partida da unidade, respeitando requisitos de segurança, descrito a seguir:

- a) Alimentar o gaseificador até o topo

Caso a operação seja com outra matéria-prima úmida, deve-se alimentar a zona de reação com carvão vegetal e completar o restante com biomassa, uma vez que o tempo de reação da primeira carga de carvão será suficiente para secar a biomassa. O carvão inicial irá formar o leito.

Tanto o carvão vegetal como a biomassa devem apresentar tamanho de 5 a 7 cm.

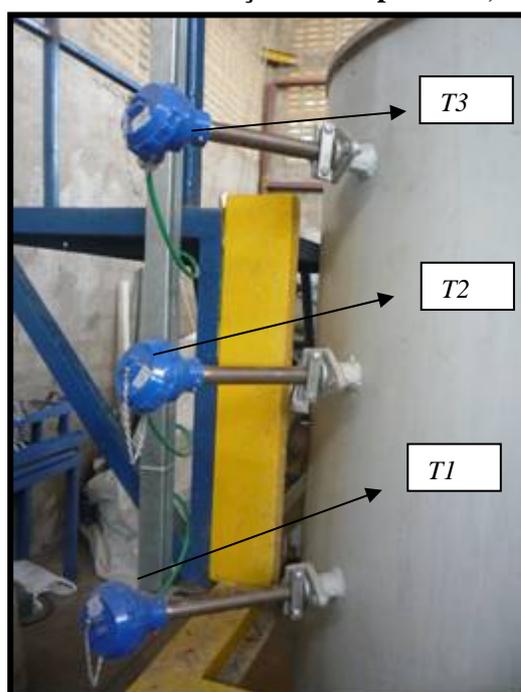
- b) Regular a entrada de ar na posição semi-aberta;
- c) Fechar a válvula de alimentação do motor;
- d) Abrir a válvula da ventoinha que direciona para a atmosfera;
- e) Ligar a ventoinha para proceder com a purga do sistema por no mínimo 10 minutos; automaticamente a entrada de ar vai permanecer semi-aberta fenda;
- f) Introduzir uma fonte de chama pela entrada de ar. Pode ser uma corda de jornal ou uma bucha embebida em líquido combustível (já acesso) em um arame. O importante é que a chama chegue até o diâmetro interno do gaseificador. Nunca colocar combustível líquida sobre o leito para a partida, pois, poderá ocorrer uma explosão.
- g) Verificar se a tubulação de saída está aquecendo, e se o leito está incandescente para confirmar o acendimento. Tempo médio de acendimento – 20 a 30 minutos.
- h) Verificar a cor da fumaça e acender a chama. Inicialmente a fumaça sairá clara (produção direta de CO_2 – combustão completa). Quando o gás combustível começar a ser formado a fumaça ficará mais escura, podendo-se acender o ignitor. Após uns 15 minutos da partida, com o ignitor já acesso, parte do gás queimará e parte não. Após 20 a 30 minutos não se vê mais a chama, apesar dela existir. O local deve ser sinalizado, pois há perigo de queima, uma vez que não se vê a chama.
- i) Proceder com a partida do motor. Só deverá ocorrer quando não mais há presença de fumaça, ou seja, quando todo o gás combustível está queimando. Do escapamento só sairá CO_2 e vapor d'água. Para a partida não é necessário gasolina, nem o carburador que só é utilizado na etapa de regulagem do motor.

4.3 Instrumentação da unidade

Foram instalados vários instrumentos na unidade piloto de gaseificação: (05 termopares, 01 medidor de vazão e 02 indicadores de pressão). Os dois primeiros

instrumentos são monitorados por um computador, através de sensores conectados a uma placa de aquisição de dados. O transdutor de pressão inicialmente previsto não foi adquirido por questão de corte de verba do projeto original, sendo substituído pelo indicador de pressão de campo. A dificuldade de especificação e, portanto, aquisição dos instrumentos e acessórios se deu devido à elevada temperatura do meio reacional e ao elevado custo. Os sensores de temperatura e o medidor de vazão podem ser diretamente lidos no indicador digital multiponto, adquirido da empresa Presys. Foram confeccionados e instalados os bocais para colocação dos instrumentos. Quatro termopares foram instalados ao longo do corpo do reator, e o quinto na entrada do trocador de calor. Os termopares dispostos no gaseificador, *T1*, *T2*, *T3* foram inseridos, respectivamente a diferentes altura do leito, sendo o *T3*, o mais elevado no leito e o *T1* o mais próximo a grelha. O termopar *T4* foi colocado na mesma elevação do *T2*, sendo que no sentido diametralmente oposto à entrada de ar, este tipo de instrumento e posicionados estrategicamente, nos permite determinar o perfil de temperatura no interior do reator. A temperatura da saída do trocador foi determinada por um termômetro, não integrado ao sistema. Os indicadores de pressão foram instalados na saída do gaseificador e outro na saída do sistema de purificação dos gases. A vazão de gás é medida através de sensor de vazão instalado na saída do sistema, objetivando mensurar a quantidade de gás produzido (Figuras 11, 12, 13 e 14).

Figura 11 - Instrumentação Termopares T1, T2 e T3.



Fonte: Autor (2011)

Figura 12 - Instrumentação: termopares e indicador de pressão



Fonte: Autor (2011)

Figura 13- Instrumentação: medidor de vazão.



Fonte: Autor (2011)

Figura 14 - Instrumentação: indicador digital multiponto.

Fonte: Autor (2011)

4.4 Análise dos gases

Inicialmente a análise de gases seria por cromatografia, mas devido a indisponibilidade deste equipamento, foi utilizado um equipamento portátil da TESTO, referência Testo 350-XL - Unidade de Controle para Análise de Gases e Pressão, Figura 4.12, específico para gases de combustão, uma vez que não foi encontrado no mercado nacional, nem internacional, um equipamento que faça a análise para gás de síntese. Foram adquiridos os seguintes acessórios: células de O₂, CO, NO, NO₂, C_xH_y não queimados, filtro de particulados, módulo de diluição do CO, o qual apresenta uma concentração maior que a padrão determinada pelo equipamento e, portanto necessitando de diluição; software; e, certificado de calibração. A determinação do CO₂ é calculada pelo próprio equipamento. O H₂ é estimado pelo instrumento, uma vez que interfere no resultado do CO.

Este instrumento permitiu a determinação dos gases, nas respectivas faixas de concentração, apresentada na (Tabela 7).

Tabela 7 - Faixa de determinação do Analisador de gases

Componente	Faixa	Unidade	Resolução
O ₂	25	% vol	-
CO	0-40	% vol	4 ppm
NO	3000	ppm	0,1 ppm
NO ₂	500	ppm	0,1 ppm
H _x C _y	4	% vol	0,001 %
CO ₂ (por diferença)	0-50	% vol	-

Fonte: Autor (2011)

Figura 15 - Analisador de gases marca TESTO.



Fonte: Autor (2011)

Figuras 16 - Mostra a utilização do analisador de gás.



Fonte: Autor (2011)

4.5 Corridas experimentais

Foram realizadas um total de 12 corridas experimentais, cada uma com duração de 3 a 8 horas, sendo a maior parte com carvão. A seguir serão apresentados os detalhes de algumas corridas experimentais.

Foram utilizados os seguintes combustíveis: carvão vegetal, Figura 17 e briquete de bagaço de cana-de-açúcar (Figura 18).

Foram doados pelo IBAMA/AL 60 sacos de carvão com alta taxa de umidade. Os briquetes de cana foram doados pela Central Bioenergética Ltda.

Figura 17 - Carvão vegetal



Figura 18 - Briquete de bagaço de cana-de-açúcar



Fonte: Autor (2011)

O carvão vegetal é obtido através da carbonização da lenha, em fornos, a uma eficiência de conversão entre 50 a 55%. Sua composição média é: 74,5% de carbono; 3% de hidrogênio; 17% de oxigênio; 1% de nitrogênio; 0,5% de enxofre; e, 4% de cinzas, LOPES *et al.* (2010). Apresenta um poder calorífico (PC) médio de cerca de 1100 kcal/kg (poder calorífico inferior, PCI, de 950 kcal/kg e um poder calorífico superior, PCS, de 1200 kcal/kg). Injetando vapor d'água, o PC médio passa para 5.400 kcal/kg.

O carvão vegetal e a biomassa de um modo geral tem cerca de 20% de umidade. Neste caso, não adianta injetar vapor que não haverá um aumento significativo no poder calorífico. O aumento da umidade leva a um aumento da geração de alcatrão, durante a gaseificação.

Segundo Castro *et al.* (2009), o bagaço de cana-de-açúcar apresenta a seguinte composição: 45,15% de carbono; 5,4% de hidrogênio; 41,8% de oxigênio; 0,2% de nitrogênio; 0,02% de enxofre; e, 7,4% de cinzas.

4.6 Operação da Unidade Piloto

Para a partida da unidade foi primeiramente alimentado o gaseificador pelo topo do equipamento (Figura 19).

Figura 19 - Carregamento do gaseificador com carvão



Fonte: Autor (2011)

Após a vistoria da planta, foi preenchido o selo hidráulico até seu volume adequado de operação (lâmina de água estimada em 30 cm), garantindo, assim, a integridade do equipamento. Foi também, colocado o elemento filtrante no filtro de gases, constituído de 5 kg de estopa de algodão. Em seguida, foi regulada a entrada de ar na posição semi-aberta; fechada a válvula de alimentação de gás para o motor; aberta a válvula da ventoinha que leva os gases combustíveis para a atmosfera; e, realizada a purga da unidade, através do sistema de exaustão, durante um tempo de 10 minutos antes da partida do equipamento. Com o exaustor em funcionamento, a entrada de ar permanece semi-aberta.

Por fim, com o gaseificador abastecido, o selo hidráulico cheio e sistema de exaustão em funcionamento, foi dada a partida da unidade, introduzindo uma fonte de chama pela entrada de ar, localizada na parte lateral do gaseificador (Figura 20). O tempo de acendimento foi de aproximadamente 20 minutos. O acendimento foi confirmado pelo aquecimento da tubulação de saída do gaseificador e pela incandescência do leito (Figura 21).

A grelha foi manipulada a cada 20 minutos, para evitar entupimento. A função da grelha é manter a sustentação do combustível e permitir a retirada da cinza.

**Figura 20 - Acendimento do gaseificador:
Introdução da fonte de chama.**



Fonte: Autor (2011)

Figura 21 - Acendimento do gaseificador: leito incandescente.



Fonte: Autor (2011)

A produção dos gases combustíveis foi verificada através da sua queima na saída da chaminé, tendo sido observada a variação de temperatura de 40° para 230°C, referente a emissão e queima, respectivamente. A Figura 22 apresenta a queima dos gases na saída da chaminé.

Figura 22 - Saída da chaminé: queima do gás produzido



Fonte: Autor (2011)

Inicialmente a fumaça sai clara (produção direta de CO_2 – combustão completa). Quando o gás combustível começa a ser formado a fumaça fica mais escura e pode-se acender o ignitor. Após uns 15 minutos da partida, com o ignitor já acesso, parte do gás queimará e parte não. Após 20 a 30 minutos não se vê mais a chama, apesar dela existir. Nesta fase, há geração do gás combustível podendo-se fazer o alinhamento do motor à unidade de gaseificação.

O gaseificador atinge o estado estacionário em aproximadamente 40 minutos de operação.

Os gases combustíveis, juntamente com o alcatrão saem pela base do gaseificador (configuração concorrente) a uma temperatura de aproximadamente 800°C , perdendo calor ao longo da tubulação e alimentando o trocador de calor, havendo a condensação de uma fração d'água e de alcatrão, os quais são drenados do sistema.

Ao sair do trocador, o gás, juntamente com o alcatrão na fase gasosa, passa por um filtro para a retirada das cinzas. O elemento filtrante é constituído fibra de algodão, sem compactação, para não elevar a perda de carga do sistema, colocada internamente no cartucho (cesto de metal), o qual deve ser revestido externamente com feltro (elemento filtrante de exaustores de fogão), e retém boa parte do alcatrão.

Os gases combustíveis alimentam o motor, em cujo escapamento só sairá CO_2 e vapor d'água. Para a queima dos gases, como o gás combustível produzido é pobre, a relação gás/ar

para a queima é de 1:1 em volume. O motor aciona o eixo do gerador, gerando energia elétrica.

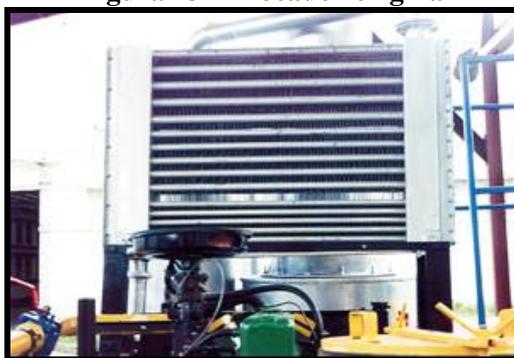
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Testes e melhorias da unidade de gaseificação

Após o comissionamento da planta e de alguns testes iniciais, foram realizadas algumas melhorias na planta de forma a aumentar a eficiência e/ou a segurança operacional. As melhorias realizadas encontram-se descritas a seguir:

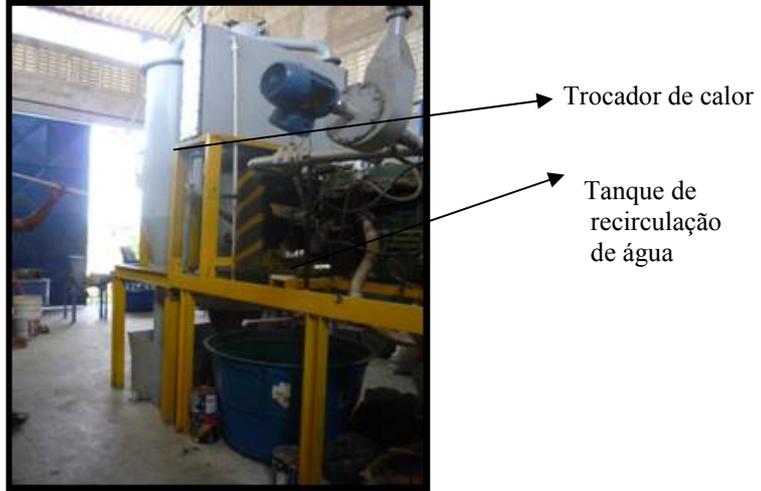
Foi melhorado o sistema de limpeza do gás, através do seu resfriamento, com colocação de uma carcaça externa ao trocador de calor, de forma a refrigerá-lo com água e não com ar, com conseqüente coleta do alcatrão, melhorando a qualidade do gás produzido. Além disso, alcatrão pode ser utilizado para produção de produtos com valor comercial. Para isso foi construída uma carcaça, com abertura na parte superior, com alimentação da água na base e saída pelo topo, de forma a garantir a completa imersão dos tubos de troca térmica (Figuras 23, 24 e 25). Foi colocado um tanque pulmão de água e uma bomba centrífuga para recirculação. Devido à ausência da torre de resfriamento, a depender da temperatura da água, pode-se opera com sistema aberto.

Figura 23 - Trocador original



Fonte: Autor (2011)

Figura 24 - Vista lateral do trocador já modificado



Fonte: Autor (2011)

Figura 25 - Vista superior do trocador já modificado.



Fonte: Autor (2011)

Foi colocado um dreno na base do filtro para a retirada de umidade e do alcatrão condensado, através de um sistema com duas válvulas interligadas por um tubo de maior diâmetro, para efetuar a drenagem. Desta forma, pode-se quantificar o volume de alcatrão, função do volume de biomassa gaseificado.

Figura 26 - Detalhe do sistema de drenagem do alcatrão



Fonte: Autor (2011)

Para uma maior facilidade de operação foi decidido pela elevação da unidade piloto, uma vez que o selo hidráulico do gaseificador estava posicionado abaixo da cota do piso. Assim sendo, todos os módulos necessitaram de elevação e, conseqüentemente serviço de caldeiraria, sendo os suportes (vigas metálicas tipo I e U) elevados em aproximadamente 0,6 m. Pode-se ver, pela marca da pintura do selo hidráulico na Figura 6, a altura correspondente a parte subterrânea. Além disso, todos os suportes foram refeitos, uma vez que as vigas estavam subdimensionadas e não resistiram ao transporte da unidade. O peso da unidade é de aproximadamente 3 toneladas, o que dificultou o manuseio das peças, que necessitavam ser transportadas equilibradas, em função do seu centro de gravidade, sendo necessária a utilização de uma talha e cintas de segurança, dimensionadas para tal esforço, sendo utilizadas para amarração e suporte (Figura 27).

Figura 27 - Sistema de cavalete e cintas de segurança usadas na montagem e manutenção da unidade piloto de gaseificação.



Fonte: Autor (2011)

Foi confeccionado e montado um sistema de exaustão, posicionando a saída dos gases, na partida da unidade, antes do acionamento do motor, para fora do galpão, tendo sido instalado um sistema de ignição para queima dos gases combustíveis, tocha (CO, CH₄, H₂, dentre outros) (Figura 28).

Figura 28 - Sistema de exaustão da unidade



Fonte: Autor (2011)

Serão apresentados alguns dados da operação com o carvão e briquete de cana-de-açúcar.

5.2 Operação com carvão vegetal

A Tabela 8 e a Figura 29 mostram as variáveis operacionais de uma corrida utilizando 46,5 kg de carvão vegetal. Nesta tabela, $T1$, $T2$, $T3$, $T4$ e $T5$ representam, respectivamente, as quatro tomadas feitas no corpo do gaseificador e na entrada do trocador de calor, conforme Figura 14, apresentada anteriormente.

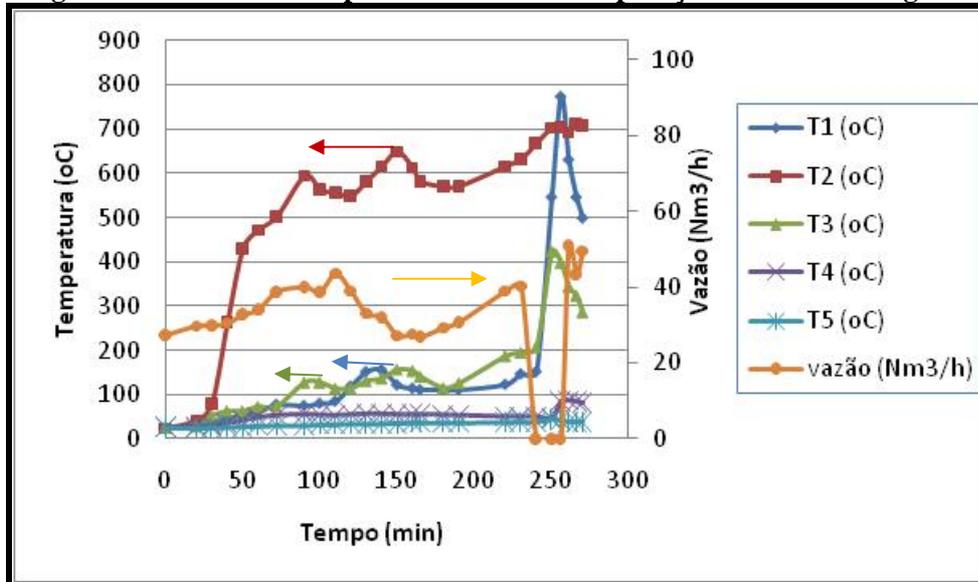
A entrada de ar foi controlada pela rotação do exaustor, posicionado a jusante do filtro, dada na Tabela 5 pela última coluna. A partir de 90 minutos de operação, a temperatura $T2$ (próxima a entrada de ar e a mais elevada) estava estabilizada, tendo sido realizada a coleta do gás, apresentado na Tabela 6. Reduzindo a vazão de ar (130 a 180 minutos de operação) foi observado um aumento do perfil de temperatura no leito. Foi também observado que a temperatura $T4$ foi muito pouco influenciada, mostrando que existe um volume morto, ou seja, não reacional no reator, na região diametralmente oposta a alimentação de ar. Até este momento, gás gerado não sustentava a chama, indicando que não havia gás suficiente para ignição do motor. De 240 até 256 minutos de operação foi forçada a quebra do selo hidráulico, de forma a aumentar a vazão de ar pela base do reator, sendo o exaustor desligado e o topo do reator aberto para a atmosfera. A temperatura do leito subiu rapidamente, e as temperaturas $T1$ e $T2$ se aproximaram, uma vez que o leito entrou em combustão. Com esta manobra, conseguiu-se uma maior homogeneidade de temperatura e uma elevação na temperatura do reator. Foi novamente refeito o selo hidráulico e retornada a operação do gaseificador. Conseguiu-se operar a temperaturas mais elevadas, sendo produzido gás suficiente para sustentar a chama, sendo neste momento acionado o motor, porém sem acionamento do gerador. Ao longo do experimento não houve variação de pressão, possivelmente devido a baixa sensibilidade do manômetro, de -100 mmca a 100 mmca.

Tabela 8 - Dados operacionais de uma corrida experimental com carvão

Tempo (min)	Temperatura (°C)					Vazão (Nm ³ /h)	Pressão (mmca)	Frequência do exaustor (Hz)
	T1	T2	T3	T4	T5			
0	24	24	25	26	26	27,4	10	2000
20	28	42	28	28	25	29,77	10	2480
30	35	80	53	30	25	29,86	10	
40	47	263	63	35	27	30,5	10	
50	54	430	63	41	28	32,75	10	
60	61	472	73	48	29	34,07	10	
72	77	503	74	53	30	38,88	10	
90	75	594	128	55	30	40,06	8	
100	80	563	128	54	32	38,82	8	
110	85	556	114	53	32	43,63	8	1800
120	119	549	115	55	34	39	8	
130	152	582	131	56	33	33,04	8	1400
140	156	616	137	56	34	32,14	8	
150	122	649	157	55	35	27,23	8	
160	114	612	154	55	36	27,62	8	
165	111	582	141	55	36	26,86	8	
180	111	570	115	54	36	29,3	8	1600
190	111	571	126	53	36	30,8	8	
220	123	616	187	50	37	39	8	
230	147	632	195	50	38	40,24	8	2500
240	152	668	208	50	38	-	8	0
250	547	703	424	47	44	-	8	
256	775	704	399	85	41	-	8	
261	632	692	345	87	39	50,88	8	2500
266	547	711	324	84	38	43,43	8	
270	500	707	287	81	39	49,45	8	

Fonte: Autor (2011)

Figura 29 - Dados da temperatura e vazão da operação com carvão vegetal.



Fonte: Autor (2011)

Tabela 9 - Análise dos gases da operação com carvão.

Tempo (min)	O ₂ (%)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	CO ₂ (%)	CO (%)	Vazão (Nm ³ /h)	T _{Gás} (°C)	T ₂ (°C) Reator
90	2,24	84	0	14,2	> 10	40,06	30,8	594
150	0,43	48	0	15,47		27,23	31,7	649
190	0,04	65	0	15,77		30,8	32,3	571
220	0,53	83	0	15,4		39	33,3	616
270	0,61	90	0	15,34		49,45	34,3	707

Fonte: Autor (2011)

A Tabela 9 apresenta a composição dos gases gerados em diferentes tempos de operação. Nesta e nas demais tabelas, $T_{Gás}$ representa a temperatura do gás, determinada pelo instrumento, no momento da análise de sua composição. As colunas de vazão e T_2 representam os dados operacionais do gaseificador no momento da análise. Os dados da tabela 9 estão representados nas curvas da (Figura 29). Vale salientar que em aproximadamente 110 minutos de operação do sistema observou-se um decaimento na vazão e na temperatura T_2 , foi constatado que na zona de reação ocorria uma baixa presença de oxigênio, corrigiu-se aumentando a potência do exaustor e melhorou, obtendo resultado, porém, ao tempo de 240 minutos, T_2 e a vazão voltou a cair, então, tornou-se insustentável a

operação da planta. Em busca do problema, foi constatado uma obstrução em todos os tubos do trocador de calor da planta piloto de gaseificação. Não foi possível determinar o teor de C_xH_y , uma vez que, neste instrumento, esta determinação é feita através da queima do combustível, sendo necessário um teor mínimo de oxigênio nos gases analisados, o que não acontece com o gás produzido na gaseificação. Quanto à determinação do CO, apesar da faixa de análise ser até 40% (com o uso da célula de diluição), acima de 10%, o instrumento não apresentou resultados, tendo sido encaminhado a assistência técnica para verificação.

5.3 Operação com briquete de cana de açúcar

Ocorreram alguns problemas na planta durante a operação com o briquete de cana, o que foi cortado em roletes e de cerca de 5 cm de altura.

A Tabela 10 mostra as variáveis operacionais de uma corrida utilizando 35 kg de briquetes de cana-de-açúcar. Nesta tabela, $T1$, $T2$, $T3$, $T4$, $T5$ e $T6$ representam, respectivamente, as quatro tomadas feitas no corpo do gaseificado; e, na entrada e saída do trocador de calor.

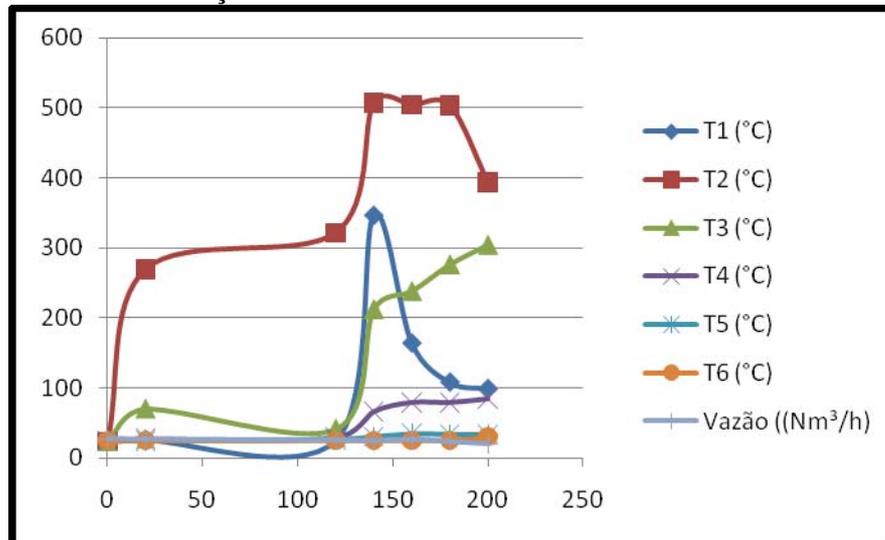
Tabela 10 - Dados operacionais de uma corrida experimental com briquete de cana-de-açúcar

Tempo (min)	Temperatura (°C)						Vazão (Nm ³ /h)	Pressão (mmca)	Frequência do exaustor (Hz)
	$T1$	$T2$	$T3$	$T4$	$T5$	$T6$			
0	23	23	23	25	23	25	13,1	-6	60,36
20	26	269	70	27	24	25	9,3	-7	28,33
120	25	40	41	29	26	25	39,8	-4	38,96
140	347	507	212	66	30	25	27,2	-8	23,90
160	164	504	238	79	35	25	8,5	-4	23,60
180	108	503	276	79	34	25	8,9	-4	21,30
200	99	394	304	84	34	30	10,3	-2	31,60

Fonte: Autor (2011)

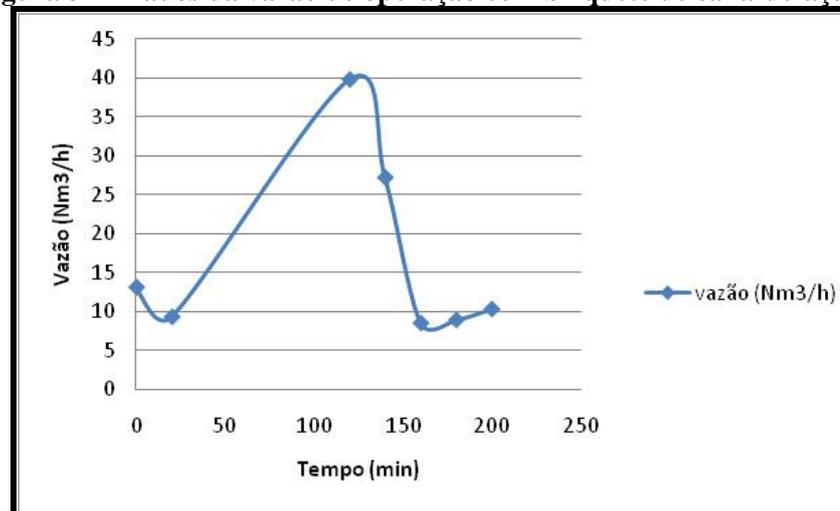
As Figuras 30 e 31 apresentam os perfis de temperatura e vazão da operação com o briquete de cana-de-açúcar, cujos dados encontram-se na Tabela 5.4. Esta corrida foi a que apresentou o pior desempenho em termos operacionais. Os briquetes, mesmo tendo sido cominuídos foram se esfarelando ao longo da operação, havendo muito depósito de carvão e formação de alcatrão, reduzindo drasticamente a temperatura do leito reacional.

Figura 30 - Dados da temperatura de operação com briquete de cana-de-açúcar.



Fonte: Autor (2011)

Figura 31 - Dados da vazão de operação com briquete de cana-de-açúcar



Fonte: Autor (2011)

Tabela 11 - Análise dos gases da operação com briquete de cana-de-açúcar

Tempo (min)	O ₂ (%)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	CO ₂ (%)	CO (ppm)	Vazão (Nm ³ /h)	T (°C) Gás	T2 (°C) Reator
200	19.79	401	0	0.91	98.228	10,3	34,2	394

Fonte: Autor (2011)

Quando da quebra do selo hidráulico e da abertura do topo do equipamento, houve uma grande formação de fumaça, Figura 32 (b) e (c), provavelmente devido a reação de combustão do briquete de bagaço de cana-de-açúcar, formando CO_2 .

Figura 32 (a), (b), (c) - Problemas com a operação do briquete de cana-de-açúcar



(a)



(b)



(c)

Fonte: Autor (2011)

A operação com o briquete de cana de açúcar levou a formação de carvão, através da sua pirólise.

5.4 Operação do conjunto gaseificador-motor-gerador

Devido aos problemas operacionais e ajustes de processo ocorridos na etapa de operação do gaseificador, utilizando diferentes biomassas, foram realizadas algumas tentativas, mas apenas foi realizada uma corrida experimental com a unidade completa, ou seja, sistema gaseificador-motor-gerador (Figura 33 a,b,c). A operação do conjunto ocorreu em um intervalo de tempo de aproximadamente meia hora, não tendo sido coletado os dados, uma vez que o sistema em teste, não ficou estável o suficiente para a coleta.

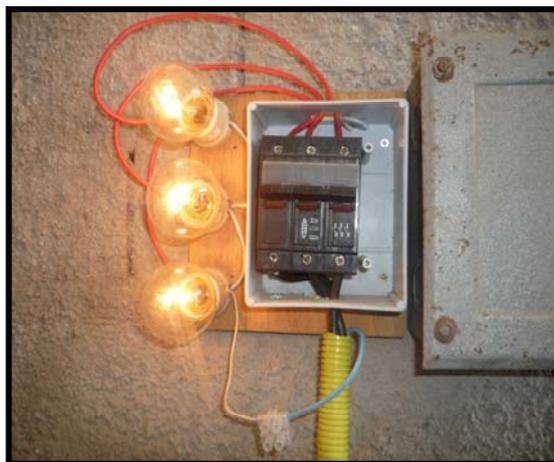
Figura 33 (a,b,c) - Operação do sistema gaseificador-motor-gerador.



(a) Acionamento do motor



(b) Operação do Gerador



(c) Geração de energia elétrica

Fonte: Autor (2011).

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve por objetivo a montagem e avaliação experimental de uma planta piloto de gaseificação operando com carvão vegetal e briquete de cana de açúcar.

Houve uma grande dificuldade no manuseio e montagem dos equipamentos (gaseificador, ciclone, verificador de gases, filtro, motor ciclo Otto, gerador) por serem pesados e os flanges desalinhados, além da necessidade de confecção de novo suporte para unidade, sistema de drenagem do alcatrão, melhoria do resfriamento de gases para retirada do alcatrão, sistema de exaustão de gases, incluindo, por questão de segurança, a colocação de uma tocha para quebra de gases.

A operação da planta foi realizada utilizando carvão vegetal e briquete de cana de açúcar. Foi determinado o perfil da temperatura no leito reativo, além da pressão de operação e vazão dos gases produzidos.

A determinação dos gases foi prejudicada devido à impossibilidade de utilização da técnica de cromatografias, tendo sido utilizado um equipamento portátil adequado para determinação da composição de gases de combustão e, não, gases combustíveis.

Portanto, apesar de ter sido adquirido as células para determinação de hidrocarbonetos e monóxido de carbono, até 40%, tais resultados não foram determinados por limitação do equipamento.

Foi verificada a necessidade de alteração no sistema de grelha, bem como a mudança na configuração do reator na altura da entrada de ar de forma a eliminar as zonas pouco reativas. Com tudo, os objetivos foram alcançados; a planta foi montada, os gases de sínteses foram produzidos e ainda foi gerado energia elétrica a partir do carvão.

Conclui-se que, o sistema de geração de energia por gaseificação é bastante promissor, grandes potências no mundo, tais como, Estados Unidos, Canadá, China e outras, vêm investindo fortemente nessa tecnologia e que até 2015 veremos mudanças no cenário energético do planeta.

REFERÊNCIAS

- BAIN, R. L.; Methanol from Biomass: *Assessment of Production Costs*. Paper presented at Hawaii Nature Energy Institute Renewable Transportation Alternatives Workshop. Honolulu, 2005.
- BEENACKERS, A. A. C. M. e MANIATIS, K. “Gas cleaning in electricity production via gasification of biomass: conclusions of the workshop”, in *Proceedings of the Conference Advance in thermochemical Biomass conversion Interlaken 1992*. Ed. A. V., Bridgewater. Blackie Academic & Professional, p. 540-48, 1993.
- BLACKADDER, W. H.; RENSFELT, E. e WALDHEIM, L. “Heat and power production via gasification in the rang 5-50 MW”. *Proceedings of the Conference Advance in thermochemical Biomass conversion Interlaken 1992*. Ed. A. V., Bridgewater. Blackie Academic & Professional, p. 449-75 1993.
- CAMPOY, M.; GÓMEZ-BAREA, A.; VIDAL, F. B.; OLLERO, P. Air Steam Gasification of Biomass in a Fluidized Bed: Process Optimization by Enriched Air. *Fuel Processing Technology*, n.90, p. 677 – 685, 2009.
- CASTRO, A. J. A.; CASSIANO, D. A.; FERREIRA, N. L.; *Gaseificação do bagaço de cana-de açúcar; modelagem, análise e comparação com sistema real*São Paulo: Exata, v.7, n.1, p. 37-39, 2009.
- CIFERNO, J. P.; MARANO, J. J.; *Benchmarking biomass gasification technologies for fuels, chemicals and hydrogen production*. Departamento de Energia dos Estados Unidos and National Energy Technology Laboratory (NREL), 2002.
- D’ÁVILA, S. G.; MAKRAY, Z. T.; Gaseificadores de madeira – aspectos técnicos e econômicos. IN: PENEDO, W. R. *Gaseificação de madeira e carvão vegetal*. Belo Horizonte: CETEC. p. 53-72, 1981.
- DOE/NETL, 2007a, *Gasification World Database – Current Industry Status*. Disponível em: <http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/database/Gasification2007_web.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2010.
- DOE/NETL, 2007b, *Gasification Database - Active and Planned Commercial Gasification Plants*, disponível em <<http://www.netl.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/database/GASIF2007.pdf>>, acesso em: 5 mar. 2010.
- FAAJ, A.; WALTER, A.; BAUEN, A.; BEZZON, G.; ROCHA, J. D.; MOREIRA, J. R.; GALVÃO, Luiz Cláudio Ribeiro; GRIMONI, Jose Aquiles Baeso; UDAETA, Miguel Edgar Morales. *Energia da gaseificação de biomassa: um recurso não convencional para o desenvolvimento limpo*. São Paulo: Grupo de Energia do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

FERREIRA, L.C.; VIOLA, E. (organizadores) *Incertezas de sustentabilidade na globalização*, 2. ed. Campinas: Ed. Unicamp, 1996.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO 2008.

HOSS, J.J. e GROENEVELD, M. J. "Biomass gasification" in D. O. Hall e R. P. Overend (eds), *Biomass*, Nova Iorque: John Wiley and Sons, p.237-55, 1987.

IEA, *Energy Technologies Perspectives 2008 – Scenarios and Strategies to 2050*, OECD/IEA 2008.

IPCC, *Climate Change Synthesis Report*, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.), IPCC, Geneva, Switzerland, 2007.

IPCC, *IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2005.

KIRUBAKARAN, V.; SIVARAMAKRISHNAN, V.; NALINI, R.; SEKAR, T.; PREMALATHA, M.; SUBRAMANIAN, P. *Review on Gasefication of Biomass. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.13, p. 179 – 186, 2009.

LOPES, R. P.; SILVA, J. S.; MAGALHÃES, E. A.; SILVA, J. N.; *Energia no Pré-Processamento de Produtos Agrícolas*. Capítulo 8: *Secagem e Armazenagem de produtos agrícolas*. Disponível em: <<http://www.poscolheita.com.br/poscolheita/Secagem/Energia%20no%20preprocessamen to.pdf>>. Livro eletrônico>. Acesso em: 3 dez. 2010.

LIU, H., GALLAGHER, K., S., 2010b, "Catalyzing strategic transformation to a low carbon economy: A CCS roadmap for China", *Energy Policy*, v. 38, n. 1, p. 59-74, 2010.

MINCHENER, A., "Coal gasification for advanced power generation", *Fuel*, v. 84, n. 17, p. 2222-2235, 2005.

OVEREND, R. P.; ONISCHAK, M.; TRENKA, A. e KINOSHITA, C. "The U. S. Department of Energy and the Pacific International Center for High Technology Research pressurized oxygen-Air fluidized-bed biomass gasification scale-up" *Proceedings of the Conference Advance in thermochemical Biomass conversion Interlaken 1992*. Ed. A. V., Bridgewater. Blackie Academic & Professional, p. 449-75, 1993.

POWERCLEAN, *Fossil Fuel Power Generation – State of the Art*, Power Clean. R, D & D Thematic Network, European Union Fifth Framework Energy R&D. Programme Contract No. ENK5-CT-2002-20625 2004.

REED, T.B.; DAS, A. Handbook of Biomass Dawndraft Gasifier Engine System Solar Technical Information Program, Solar Energy Research Institute, *The Biomass Energy Foundation* Press. 3rd edition Golden, Colorado, USA, 1988.

RUYCK, J. de MANIATIS, K. DISTELMANS, M. e BARON, G. “ A biomass fueled cogeneration based on an evaporative gas turbine cycle et the University of Brussels” *proceedings of the 1st International Conference on Combustion Technologies a Clean Environment*, preprint, 1991.

SACHS, I. *Caminhos para o Desenvolvimento Sustentável*. Rio de Janeiro: Garamond, 2000.

SÁNCHEZ, C.G.; *Breve Panorama da tecnologia de Pirólise de Biomassa e Resíduos*. 1º Seminário de Tecnologia em Bioeletricidade. São Paulo, maio 2008.

SICILIANO, L. B., *Gasogênio para automóvel e outros fins*, Divisão de Combustíveis do Instituto de Engenharia de São Paulo, 1945.

SMIL, V. Crop residues: agriculture's largest harvest. *Bio Science*, n.49, p.299 – 308, 1999.

STERN, *Review on the Economics of Climate Change*, disponível em: < http://www.hm-treasury.gov.uk/stern_review_report.htm>. Acesso em: 15 Jan./2010.

WCI, *The Coal Resource - A Comprehensive Overview of Coal*. Disponível em: <M<http://www.worldcoal.org/resources/wci-publications/>>. Acesso em: 26 ago. 2009.