



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

ADRIANO QUADROS

**DESEMPENHO DE UMA UNIDADE AUTÔNOMA DE
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COMPOSTA POR UM
GASEIFICADOR E GRUPO GERADOR E ESTADO DO
MOTOR APÓS ALIMENTAÇÃO COM GÁS DE SÍNTESE**

ADRIANO QUADROS

**DESEMPENHO DE UMA UNIDADE AUTÔNOMA DE
GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COMPOSTA POR UM
GASEIFICADOR E GRUPO GERADOR E ESTADO DO
MOTOR APÓS ALIMENTAÇÃO COM GÁS DE SÍNTESE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento do Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento

Orientador: Prof. Dr. Fernando Fernandes

Londrina
2013

**Catálogo elaborado pela Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central da
Universidade Estadual de Londrina.**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Q1d Quadros, Adriano.
Desempenho de uma unidade autônoma de geração de energia elétrica composta por um gaseificador e grupo gerador e estado do motor após alimentação com gás de síntese / Adriano Quadros. – Londrina, 2013.
91 f. : il.

Orientador: Fernando Fernandes.
Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento, 2013.
Inclui bibliografia.

1. Motores de combustão interna – Teses. 2. Gás de síntese – Teses. 3. Biomassa – Gaseificação – Teses. 4. Biocombustíveis – Teses. 5. Alcatrão – Teses. I. Fernandes, Fernando. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Tecnologia e Urbanismo. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento. III. Título.

CDU 628

ADRIANO QUADROS

**DESEMPENHO DE UMA UNIDADE AUTÔNOMA DE GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA COMPOSTA POR UM GASEIFICADOR E
GRUPO GERADOR E ESTADO DO MOTOR APÓS ALIMENTAÇÃO
COM GÁS DE SÍNTESE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Saneamento do Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual de Londrina, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Fernando Fernandes
UEL – Londrina – PR

Dr. Eng. Sérgio Leite
Delta H Solutions – Linhares – ES

Prof. Dr. Aron Lopes Petrucci
UEL – Londrina – PR

Londrina, 4 de abril de 2013..

A Matias e Miriam

Meus pais, que contribuíram para que eu pudesse realizar esse trabalho ao propiciar um ambiente familiar de qualidade, além de serem exemplos para mim.

Amo vocês.

A Josiane

Amada companheira que se fez presente nos momentos em que precisei.

A mim

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Fernando Fernandes

Todos nós temos exemplos de pessoas que espelham nossas ações.

Espero poder refletir, na minha trajetória pessoal e profissional, o exemplo de competência, de ensinamentos e orientação que demonstrou durante esta trajetória.

Ao Professor Dr. Aron Lopes Petrucci

Pelas contribuições valiosas, disponibilidade e colaboração, fundamentais para a consecução deste trabalho.

Ao Ms. Audinil

Pelo fundamental apoio durante os ensaios realizados e auxílio durante reparos e modificações no gaseificador.

Aos técnicos de laboratório

Pela disponibilidade e pela ajuda prestada sempre que foi preciso.

À CAPES

Pela concessão da bolsa

Aos amigos e irmãos

Pelas palavras de apoio, críticas, ensino, companheirismo, paciência, enfim, pela amizade.

Aos colegas do mestrado

Pela honra de ter compartilhado momentos de alegrias, frustrações e sucessos.

QUADROS, Adriano. **Desempenho de uma unidade autônoma de geração de energia elétrica composta por um gaseificador e grupo gerador e estado do motor após alimentação com gás de síntese.** 2013. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2013.

RESUMO

Este trabalho analisa o desempenho de uma unidade autônoma de geração de energia elétrica composta por um gaseificador e um grupo gerador. O gaseificador utilizado no trabalho é do tipo co-corrente de duplo estágio e o grupo gerador é composto de um motor de combustão interna MWM adaptado a ciclo Otto acoplado a um gerador síncrono trifásico de eletricidade com capacidade de 50 kVa. O gás produzido tem a composição de 16,9% de H₂, menos do que 0,1% de O₂, 50,6% de N₂, 19,8% de CO, 10,6% de CO₂ e 2,1% de CH₄. Foram realizados dois ensaios com a unidade, em ambos a biomassa utilizada foi lenha de eucalipto. A unidade piloto foi capaz de produzir 16,5 kWh de energia elétrica enquanto consumiu cerca de 52kg de biomassa por hora. Após 46 horas de funcionamento o motor a explosão foi aberto para avaliação de seu estado. O motor se manteve em condições ideais de operação após 46 horas de funcionamento com o gás de síntese, não apresentando contaminação por alcatrão ou material particulado. A quantidade de HPAs no gás produzido foi de 1,30 µg/Nm³ e de material particulado foi de 0,16mg/Nm³

Palavras chaves: Gaseificação. Alcatrão. Gás de síntese. Biomassa.

QUADROS, Adriano. **Performance of an autonomous unit of electricity generation composed of a gasifier and a generator group and the condition of the engine after feeding with synthesis gas.** 2013. 91 p. Dissertation (Masters in Engineering building and sanitation) – State University of Londrina, Londrina, 2013.

ABSTRACT

This paper analyzes the performance of an autonomous unit of electricity generation composed of a gasifier and a generator group. The gasifier used in the work is co-current with two gasification stages, the generator group consists of an MWM internal combustion engine adapted to Otto cycle coupled to a synchronous three-phase electricity generator with a capacity of 50 kVA. The engine is fed with synthesis gas produced by the gasifier. The gas produced has a composition of 16.9% H₂, less than 0.1% O₂, 50,6% N₂, 19.8% CO, 10.6% CO₂, 2.1% CH₄. Two experiments were conducted, in both the biomass used was eucalyptus wood. The pilot plant was capable of producing 16.5 kWh of energy while consumed about 52kg of biomass per hour. After 46 hours of engine operation, the engine was open for assessing its conditions. The engine was kept at ideal operating conditions after 46 hours of operation with the synthesis gas, with no significant contamination by particulate matter or tar. The amount of PAHs in the gas produced was 1,30 µg/Nm³ and particulates was 0,16mg/Nm³.

Keywords: Gasification. Tar. Syngas. Biomass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz energética mundial	15
Figura 2 – Conversões termoquímicas de biomassa em energia	17
Figura 3 – Esquema de um gaseificador contra-corrente	20
Figura 4 – Esquema de um gaseificador co-corrente	21
Figura 5 – Esquema de um gaseificador de leito fluidizado circulante	22
Figura 6 – Esquema de um gaseificador de leito borbulhante	23
Figura 7 – Conceito de remoção de alcatrão por métodos primários.	26
Figura 8 – Variação do teor de alcatrão no gás em função da temperatura do leito.....	27
Figura 9 – Esquema geral da gaseificação com duplo estágio de gaseificação	28
Figura 10 – Conceito de remoção de alcatrão por métodos secundários.....	29
Figura 11 – Representação esquemática do gaseificador utilizado	30
Figura 12 – Detalhe da planta do gaseificador com detalhamento dos componentes e das zonas específicas.....	31
Figura 13 – Grelha rotativa, antes de ser instalada (A) e em funcionamento(B)	32
Figura 14 – Válvulas de controle de agente gaseificador, placas de orifício e manômetros diferenciais.....	33
Figura 15 – Válvula sino (A), Silo superior carregado (B) e Sistema de vibração	34
Figura 16 – Reservatórios de cinzas e de material particulado	35
Figura 17 – Filtro de mangas	36
Figura 18 – Trap	37
Figura 19 – Queimador e queimador piloto.....	38
Figura 20 – Biomassa utilizada.....	38
Figura 21 – Grupo gerador	41
Figura 22 – Painel de indicadores do motor e ignição	42
Figura 23 – a) Misturador de combustível do motor utilizado b) Corpo Borboleta do motor utilizado	43
Figura 24 – Banco de cargas.....	44
Figura 25 – Esquema geral do gaseificador e pontos de amostragem de gás	46

Figura 26 – a) Ponto de coleta após o gasômetro b) Bomba de sucção	46
Figura 27 – Fotografia do sistema de coleta de alcatrão	47
Figura 28 – Fotografia do sistema de coleta dos gases de escape composto por: a) cartuchos com resina XAD e b) bomba utilizadas para realizar a sucção dos gases de escape.....	48
Figura 29 – Quantidade total de biomassa consumida em função do tempo no Ensaio 1 (a) e no Ensaio 2 (b).	50
Figura 30 – Quantidade total de biomassa consumida em função do tempo no Ensaio 3 (a) e no Ensaio 4 (b)	52
Figura 31 – Variação da temperatura do ar de entrada no Ensaio 1	53
Figura 32 – Variação da temperatura do ar de entrada no Ensaio 2	54
Figura 33 – Variação da temperatura do gás produzido ao longo do: a) Ensaio 1 b) Ensaio 2.	55
Figura 34 – Variação da temperatura do gás produzido ao longo do: a) Ensaio 3 b) Ensaio 4	55
Figura 35 – Variação da temperatura da grelha: a) Ensaio 1 b) Ensaio 2	56
Figura 36 – Representação do método utilizado para calcular a vazão de ar insuflado no gaseificador	59
Figura 37 – Entrada de dados para o cálculo da vazão de ar insuflado no gaseificador	59
Figura 38 – Eficiência na conversão de carbono em função do fator de ar	64
Figura 39 – Influência da variação do fator de ar no teor de alcatrão contido no gás	65
Figura 40 – Cromatograma obtido da amostra de alcatrão borbulhada em frasco com isopropanol.....	65
Figura 41 – Cromatograma obtido da amostra dos gases de escape	66
Figura 42 – Gasômetro com barra de concreto	68
Figura 43 – Cabeçote (a) e cilindro (b) do motor após 46 horas de funcionamento	68
Figura 44 – Válvulas de admissão e escape (a) e haste da válvula (b) do motor após 46 horas de funcionamento	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição elementar e imediata da madeira de eucalipto	39
Tabela 2 – Características do gerador	44
Tabela 3 – Número de recargas efetuadas em cada ensaio, o momento em que foram realizadas, sua massa e umidade nos Ensaios 1 e 2.....	49
Tabela 4 – Número de recargas efetuadas em cada ensaio, o momento em que foram realizadas, sua massa e umidade nos Ensaios 3 e 4.....	51
Tabela 5 – Composição do gás produzido depois do gasômetro, após estabilização do gaseificador	57
Tabela 6 – Composição do gás resultante da combustão do gás produzido no motor	57
Tabela 7 – Relação A/C nos ensaios 1, 2, 3 e 4	61
Tabela 8 – Umidade dos lotes de madeira de eucalipto utilizados.....	63
Tabela 9 – Massa total de biomassa, massa total sem água e quantidade de cada um dos componentes de sua composição elementar, para cada um dos lotes de biomassa	63
Tabela 10 – Balanço de O, Massa de ar necessária para combustão completa, massa de ar insuflada e Fator de ar.....	64

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Sistemas do gaseificador e seus componentes.....	33
Quadro 2 – Resumo das principais características técnicas do motor utilizado nos ensaios	42
Quadro 3 – Descrição do método de análises cromatográficas	48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL.....	14
2.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS.....	14
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1 ENERGIA DE BIOMASSA	15
3.2 GASEIFICAÇÃO	16
3.3 TIPOS DE GASEIFICADORES.....	19
3.3.1 Gaseificadores de Leito Fixo	19
3.3.1.1 Gaseificador contra-corrente	19
3.3.1.2 Gaseificador contra-corrente	20
3.3.2 Gaseificadores de Leito Fluidizado	21
3.3.2.1 Gaseificador de leito fluidizado circulante.....	22
3.3.2.2 Gaseificador de leito fluidizado borbulhante	23
3.4 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	24
3.5 ALCATRÃO	25
3.5.1 Remoção de Alcatrão.....	26
3.5.1.1 Métodos primários	26
3.5.1.2 Métodos secundários.....	29
4 MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1 GASEIFICADOR.....	30
4.2 BIOMASSA UTILIZADA.....	38
4.3 GRUPO GERADOR	40
4.4 AMOSTRAGENS DE GÁS E DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO	45
4.5 MÉTODO DE COLETA E ANÁLISE DE ALCATRÃO E PARTICULADOS.....	47
4.6 MÉTODO DE COLETA E ANÁLISE DOS GASES DE ESCAPE	47
4.7 MÉTODO DE ANÁLISE DO ALCATRÃO, MATERIAL PARTICULADO E GASES DE ESCAPE	48

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1 CONSUMO DE BIOMASSA	49
5.2 TEMPERATURAS DE OPERAÇÃO	52
5.3 COMPOSIÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE.....	57
5.4 RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL	58
5.5 FATOR DE AR	62
5.6 ANÁLISES DO ALCATRÃO, MATERIAL PARTICULADO E DOS GASES DE ESCAPE	65
5.7 GERAÇÃO DE ENERGIA.....	67
5.8 MODIFICAÇÕES OPERACIONAIS.....	67
5.9 ABERTURA DO MOTOR APÓS 46H DE FUNCIONAMENTO	68
6 CONCLUSÃO	70
7 RECOMENDAÇÕES	71
REFERÊNCIAS	72
APÊNDICE	75
Apêndice A –Forma de operação do Gaseificador.....	76

1 INTRODUÇÃO

O elevado custo da energia obtida a partir de combustíveis fósseis, aliados aos riscos ambientais que este tipo de energia apresenta, despertou o interesse para fontes de energia não convencionais, como a energia proveniente de biomassa.

O aproveitamento da biomassa pode ser feito de diversas maneiras e uma delas é através da gaseificação.

A tecnologia de gaseificação de combustíveis foi descoberta separadamente na Inglaterra e França em 1798. Em 1850 a tecnologia havia se desenvolvido a um ponto que era possível utilizar de forma comercial o gás manufacturado ou “gás da cidade” de carvão na cidade de Londres. Um considerável avanço tecnológico ocorreu em 1860 com o desenvolvimento do gaseificador Siemens (RFA), na Alemanha (REED, DAS, 1988; KRAUSE, 1990).

Com a descoberta do gás natural a importância da gaseificação foi reduzida.

Pequenos gaseificadores de madeira e carvão vegetal eram utilizados para fins automotivos durante a segunda guerra mundial.

Entre os anos de 1973 e 1979, ressurgiu, graças à crise energética, o interesse pela gaseificação, já que o custo do petróleo era alto.

A iminente escassez de petróleo e as consequências ambientais advindas da queima de combustíveis fósseis têm contribuído para o desenvolvimento de pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias.

No Brasil, devido às grandes áreas onde é possível realizar o plantio de culturas energéticas, há uma grande capacidade de se utilizar a gaseificação da biomassa, em conjunto com um grupo gerador, para a produção de energia elétrica, especialmente em áreas isoladas, onde a conexão com a rede elétrica é limitada pelas distâncias, já que o custo de transmissão é alto.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho de unidade autônoma de geração de energia elétrica composta de gaseificador co-corrente e grupo gerador com capacidade de 50KVa.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar o desempenho do conjunto gaseificador-grupo gerador como um todo: sua capacidade de funcionar com biomassas em diferentes umidades, gerar um gás de qualidade, manutenção e etc.

Analisar o alcatrão produzido e minimizar a produção do mesmo definindo condições operacionais para isto.

Avaliar a composição do gás produzido.

Propor modificações no gaseificador para melhorar sua operação e desempenho.

Analisar de forma preliminar o estado do motor após 46h de funcionamento.

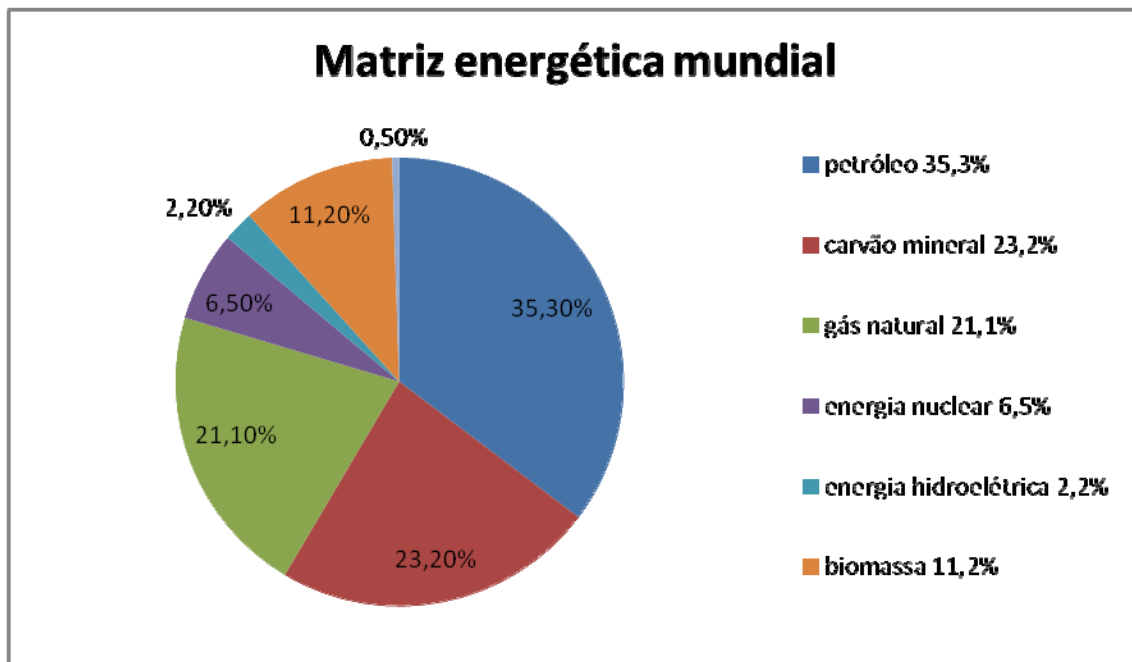
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ENERGIA DE BIOMASSA

Energia é fator essencial no desenvolvimento da economia de todos os países e sua disponibilidade deve ser assegurada para que haja desenvolvimento.

A Composição da matriz energética mundial é distribuída por fonte energética como apresentado na figura 1. (IEA, 2010)

Figura 1 – Matriz energética mundial



(IEA, 2010)

O consumo de petróleo, gás natural e carvão vêm aumentando rapidamente, devido, principalmente ao desempenho de economias emergente, lideradas pela China e pela Índia. (CNI, 2007)

O rápido crescimento na demanda, aliado à instabilidade política nas regiões produtoras de petróleo e gás natural e às pressões para que se reduza as emissões de gases causadores do efeito estufa, traz preocupações sobre a oferta de energia e seu impacto nos preços. (CNI, 2007)

As principais alternativas para reduzir a dependência do petróleo são a adoção de fontes renováveis de energia e redução do consumo veicular.

Dentre as fontes renováveis de energia a biomassa, por sua disponibilidade, possui um bom potencial de aplicação no Brasil.

A biomassa é uma fonte de energia renovável derivada de organismos vivos e de organismos mortos recentemente, incluindo matéria vegetal ou animal utilizado para a produção de fibras, produtos químicos, ou de energia. A biomassa sólida consiste principalmente de celulose, hemi-celulose, lignina, e uma pequena quantidade de outros compostos. A biomassa é encontrada tanto na forma sólida como na líquida, e normalmente consiste de um polímero complexo de carbono, oxigênio, hidrogênio e com pequenas quantidades de enxofre, nitrogênio e elementos inorgânicos. (BOMAN, et all. 2004)

Além disso, o uso de biomassa para geração de energia pode ser vantajosa em lugares isolados, cujo custo de transmissão de energia elétrica ou de transporte de combustíveis seria muito elevado.

Algumas fontes de biomassa incluem resíduos de poda, resíduos de madeiras, resíduos de aterros sanitários, lenha, resíduos de culturas agrícolas, esterco de gado, culturas energéticas e lodo de estação de tratamento de água e esgoto. (CBA, 2004)

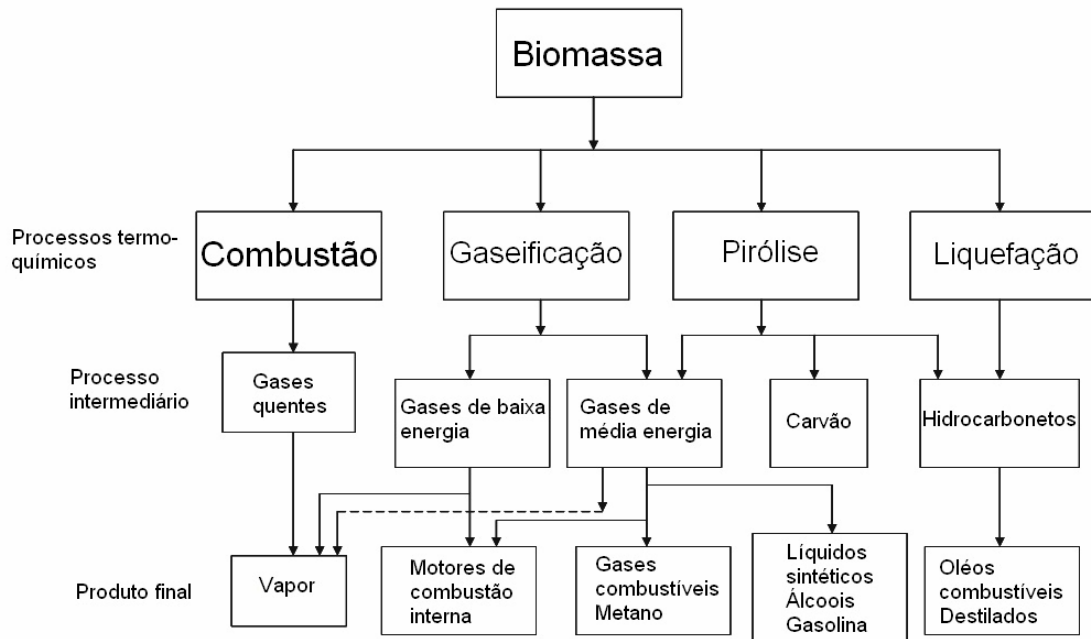
No Brasil, a biomassa é amplamente utilizada para produção de combustíveis tais como etanol e biodiesel.

3.2 GASEIFICAÇÃO

A Conversão de biomassa em energia pode ser realizada através de diferentes processos, tais como termo-químicos, bioquímico/biológico e extração mecânica. Fatores como o tipo, a quantidade de biomassa disponível, o uso final da energia produzida, padrões ambientais e condições econômicas influenciam na escolha. (MCKENDRY, 2002)

A Figura 2 explica diferentes processos envolvendo a conversão térmica da biomassa, carregadores intermediários de energia e o produto energético final. De acordo com a Figura 2, os principais processos de conversão térmica de biomassa são: combustão, gaseificação e pirólise.

Figura 2 – Conversões termoquímicas de biomassa em energia



(MC KENDRY, 2002)

A combustão é a primeira escolha para se converter biomassa em energia. Combustão de biomassa utilizando a tecnologia e combustão em leito fluidizado a temperaturas entre 800-1000°C produz um gás quente. Qualquer tipo de biomassa poder ser queimada, mas na prática apenas com biomassas com teor de umidade menor que 50% isto é viável, caso contrário é necessária uma pré-secagem da mesma. O alto teor de cinzas encarece o processo de combustão. Resíduos de madeira podem ser queimados para produzir vapor que é utilizado num gerador elétrico. (FOE, 2009)

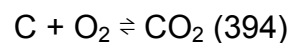
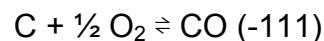
A pirólise envolve o aquecimento da biomassa até cerca de 400-500°C em ausência de oxigênio para produzir uma mistura de óleo, gases e carvão. Os produtos gasosos consistem de compostos voláteis que são formados através de uma série de reações complexas. Esses vapores voláteis consistem de hidrocarbonetos gasosos, hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, alcatrões e água. Os produtos que não são volatilizados são chamados de carvão e consistem basicamente de carbono fixo e cinzas. (FOE, 2009)

A gaseificação de biomassa é um processo termo-químico que usa a oxidação parcial para converter matérias primas orgânicas carbonáceas em um produto gasoso combustível conhecido como gás de síntese. O gás proveniente da

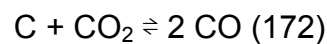
gaseificação é composto principalmente de hidrogênio e monóxido de carbono, com menores quantidades de dióxido de carbono, água, metano, hidrocarbonetos e nitrogênio. Neste trabalho, a nomenclatura gás de síntese foi adotada para o gás proveniente da gaseificação contendo nitrogênio. As reações ocorrem em um meio de gaseificação, tal como ar, oxigênio, vapor ou uma mistura desses gases a elevadas temperaturas, entre 500-1400°C, e pressão atmosférica ou até 3-5 MPa. (FOE, 2009) Durante a gaseificação as principais reações que ocorrem são exotérmicas de oxidação e endotérmicas de redução, e envolvem fases sólida e gasosa. (FRANCO et al. 2003) (SÁNCHEZ, 2009) As reações ocorrem simultaneamente e são as seguintes:

Reações Heterogêneas gás-sólido

Oxidação do carbono, ΔH (kJ/mol)



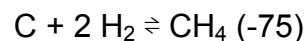
Reação de Boudouard:



Reação gás-d'água:



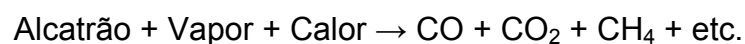
Formação de metano:



Reações homogêneas (fase gasosa)



Craqueamento do alcatrão



Todas as reações ocorrem em equilíbrio e o gás produzido consiste de uma mistura de monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, hidrogênio e vapor d'água.

Antes de ser gaseificada a biomassa utilizada deve ser pré-condicionada para que sua umidade esteja entre 10-30% e seu tamanho entre 0,10-200 mm, dependendo do tipo de gaseificador.

3.3 TIPOS DE GASEIFICADORES

Comercialmente, os gaseificadores disponíveis para gaseificação de biomassa são de dois tipos: leito fixo e leito fluidizado.

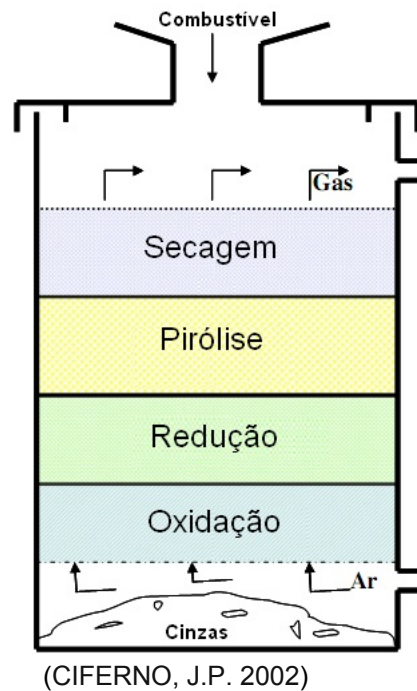
3.3.1 Gaseificadores de Leito Fixo

Os gaseificadores de leito fixo operam em temperaturas na faixa de 1000°C e são sub-classificados como contra-corrente e co-corrente, baseado no contato com o combustível e o agente gaseificador, como ar, oxigênio ou vapor. (McKENDRY, 2002) (QUAAK, et al 1999)

3.3.1.1 Gaseificador contra-corrente

Um gaseificador contra-corrente (Figura 3) consiste de um leito fixo de combustível pelo qual o agente gaseificador é insuflado em direção contrário ao sentido do movimento do combustível. O combustível se move, por gravidade, através de diferentes zonas para secagem, pirólise, redução e oxidação. A biomassa é seca na zona de secagem, então é decomposta em gases voláteis e carvão na zona de pirólise. Na zona de redução diversas reações ocorrem, carbono reage com vapor d'água para produzir monóxido de carbono e hidrogênio. Na zona de oxidação, o carvão é queimado para produzir calor, dióxido de carbono e vapor d'água para as reações que ocorrem na zona de redução. (McKENDRY, 2002) (QUAAK, et al 1999)

Figura 3 – Esquema de um gaseificador contra-corrente

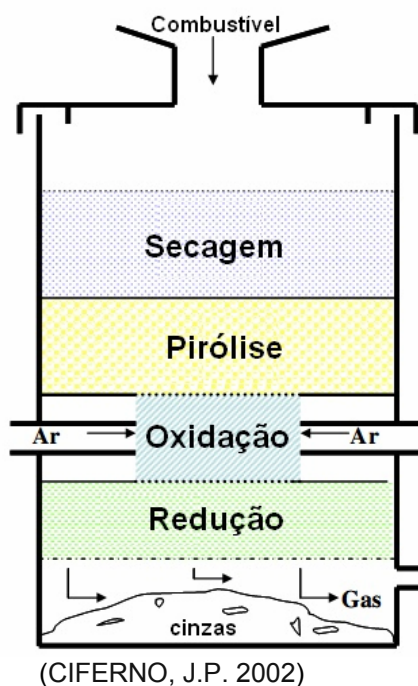


Os gaseificadores contra-corrente tem as seguintes vantagens: alta eficiência gasosa, baixa produção de carvão e a capacidade de gaseificar biomassa com altos teores de umidade tendo a desvantagem de produzir altas quantidades de alcatrão no gás bruto.

3.3.1.2 Gaseificador co-corrente

Os gaseificadores co-correntes (Figura 4) são semelhantes aos contra-correntes exceto pelo fato de o agente gaseificador fluir no mesmo sentido do combustível. Estes têm zonas similares aos contra-correntes, porém em uma ordem diferente. Calor é adicionado na parte de cima do gaseificadores de uma fonte de calor externa ou da combustão de pequenas quantidades de combustível. O gás deixa o gaseificador a uma alta temperatura e o calor é transferido ao agente gaseificador, o que resulta numa eficiência energética igual à do gaseificador contra-corrente. (McKENDRY, 2002; QUAAK, et al 1999)

Figura 4 – Esquema de um gaseificador co-corrente



A principal vantagem do gaseificador co-corrente é a produção de um gás com pouco alcatrão, já que todo o alcatrão passa pelo leito quente de carvão. Entre as desvantagens estão a baixa eficiência geral, dificuldades em lidar com altas umidades e cinzas e servir apenas em unidades de pequeno porte.

3.3.2 Gaseificadores de Leito Fluidizado

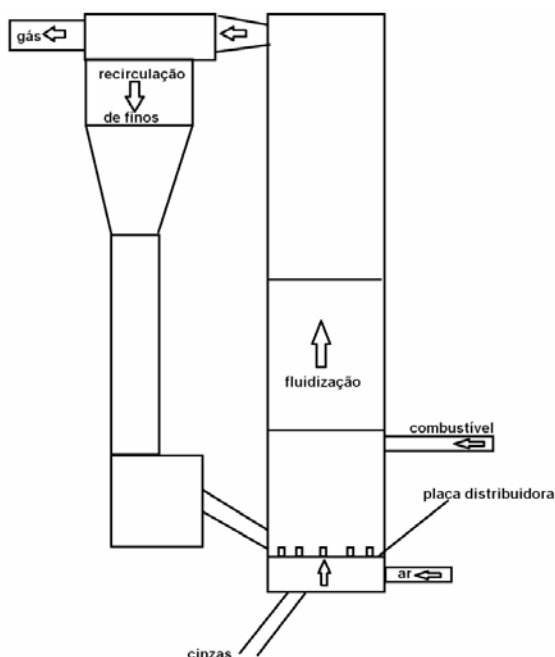
Os gaseificadores de leito fluidizado operam em temperaturas relativamente baixas (750-900°C), com exceção dos gaseificadores de carreamento que trabalham em torno de 1600°C, e são capazes de operar com altas capacidades. Estes gaseificadores têm vantagens sobre os de leito fixo devido à sua construção compacta, que facilita altas taxas de transferência de calor, que é obtida através da intensiva mistura que ocorre no leito; flexibilidade para lidar com variações de umidade, cinzas e outras características do combustível; capacidade de lidar com materiais finamente granulados que tem alto conteúdo de cinzas, baixa densidade ou ambos; poucos pontos onde ocorre a fusão das cinzas. (Mc KENDRY, 2002) (QUAAK, et al 1999) Alto conteúdo de poeira e alcatrão são outras desvantagens. São sub-classificados em leito fluidizado circulante e leito borbulhante. (RAGNAR, W., 2000)

Grande parte dos gaseificadores comerciais é de leito fluidizado de carregamento. São utilizados para gaseificar carvão com baixo teor de cinzas e operam em temperaturas na faixa de 1600°C.

3.3.2.1 Gaseificador de leito fluidizado circulante

Os gaseificadores de leito fluidizado circulante (Figura 5) consistem principalmente de um recipiente, onde a reação ocorre, e de um ciclone separador. Estes gaseificadores operam com uma velocidade do gás acima da velocidade de fluidização, o que resulta num arraste de partículas pelo gás. As partículas arrastadas saem pelo topo do reator, cinzas são removidas pelo ciclone e o material do leito retorna ao recipiente onde ocorrem as reações. Estes gaseificadores são adequados para reações rápidas e podem operar a pressões elevadas. Tem as vantagens de possuir altas taxas de transporte de calor, devido à alta capacidade de transporte de calor do material do leito e elevadas taxas de conversão (acima de 98%) com baixo teor de alcatrão e de carbono não convertido. As desvantagens incluem o fato do tamanho das partículas do combustível determinar a velocidade mínima de transporte e a erosão do equipamento devido as altas velocidades. (FAO, 1986)

Figura 5 – Esquema de um gaseificador de leito fluidizado circulante



3.3.2.2 Gaseificador de leito fluidizado borbulhante

Um gaseificador de leito borbulhante (Figura 6) consiste de finas partículas de areia e alumina num recipiente com uma grelha no fundo, onde ar, oxigênio ou vapor são introduzidos. A biomassa é introduzida acima da grelha num leito móvel de material granulado. A temperatura é mantida na faixa 700-900°C através do controle da razão ar/biomassa. A biomassa é pirolizada no leito quente para formar um carvão com componentes gasosos. O gás produzido contém pouco alcatrão devido ao contato com o material quente do leito. As vantagens do gaseificador de leito borbulhante são produção de um gás uniforme; distribuição de temperatura uniforme no reator; capacidade de lidar com vários tamanhos de combustível, incluindo finos; altas taxas de transferência de calor entre os materiais inertes, combustível e gás; alta conversão (70%), com baixa quantidade de alcatrão e carbono não convertido. A principal desvantagem da gaseificação com leito borbulhante são as grandes bolhas que se formam devido a passagem do gás por caminhos preferenciais no leito. (CIFERNO, J. P., 2002) (Mc KENDRY, 2002)

Figura 6 – Esquema de um gaseificador de leito borbulhante



(Mc KENDRY, 2002)

Um problema comum a todos os tipos de gaseificadores é a fusão de cinzas.

3.4 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Um dos usos do gás de síntese produzido é a sua utilização em motores de combustão interna.

Motores de combustão interna são máquinas que convertem a energia química de um combustível, através da combustão, em energia térmica e esta em potência mecânica. Há uma expansão dos gases resultantes da combustão, dentro de um conjunto cilindro-pistão, com aumento de temperatura e pressão. Esta expansão dos gases move o pistão que aciona o conjunto biela-virabrequim, convertendo o movimento linear do pistão em movimento circular de eixo, sendo o movimento então transmitido deste ao volante e do volante a qualquer outro mecanismo externo para utilizar o trabalho disponível. Estes são os motores de movimento alternado. (SÁNCHEZ, C. G., 2009)

Os motores de movimento alternado podem ser classificados como de ignição por centelha ou por compressão. No primeiro caso se tem o ciclo Otto, operando a gasolina, etanol, GLP ou GN, cuja ignição ocorre por uma centelha elétrica gerada por um eletrodo, comumente chamado de vela. No segundo caso tem-se o ciclo Diesel, operando com óleo diesel, cuja ignição ocorre por detonação espontânea quando submetido à alta pressão na câmara de combustão.

O Ciclo Padrão Otto consta de uma adição instantânea de calor pela ignição da centelha, ocasionando um aumento de pressão a volume constante. A seguir ocorre uma expansão volumétrica com movimento do pistão em um processo isoentrópico. A expulsão dos gases quente é evidenciada por uma redução de pressão e perda de calor a volume constante, seguida de uma compressão do volume de controle, causada pelo retorno do pistão ao ponto-morto superior. (SÁNCHEZ, C. G., 2009)

No Ciclo Padrão Diesel, se considera que a adição de calor ocorre à pressão constante, iniciando a expansão dos gases e o deslocamento do pistão, o qual continua após uma expansão isoentrópica. Assim como no ciclo Otto, o calor é rejeitado pela expulsão dos gases quentes e admissão do ar frio. Em seguida o ar é comprimido ao volume mínimo e então é injetado combustível a alta pressão, causando a ignição. (SÁNCHEZ, C. G., 2009)

Uma das opções de uso da potência de eixo das máquinas térmicas é converter a mesma em potência elétrica por meio de geradores elétricos. Estes

quando acoplados aos motores de combustão interna, formam os chamados grupo-geradores.

Nos geradores, a energia mecânica que não é transformada em eletricidade resulta em uma perda que aparece como calor. Conseqüentemente, quanto menor for a eficiência na conversão, maior será o aumento de temperatura do gerador. Se este aumento de temperatura for excessivo, ultrapassando os limites de temperatura dos componentes do gerador, será necessário aplicar ventilação forçada sobre o gerador ou diminuir a geração de eletricidade.

3.5 ALCATRÃO

Um dos maiores problemas da aplicação do gás de síntese em motores, é o alcatrão formado durante o processo. O alcatrão é uma mistura complexa de hidrocarbonetos condensáveis, que inclui desde compostos com 1 anel aromático em suas estruturas até compostos com 5 anéis aromáticos em suas estruturas além de outros hidrocarbonetos contendo oxigênio e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos complexos (HPAs). (DEVI et al. 2003)

Vários grupos de pesquisa definiram o alcatrão diferentemente. Em uma reunião sobre o protocolo de medidas de alcatrão, realizada em Bruxelas em 1998, foi acordado por um número de especialistas em definir alcatrão como todos os contaminantes orgânicos com peso molecular maior que o do benzeno. (NEEFT et al, 1999)

O alcatrão é indesejável devido a diversos problemas associados à condensação, formação de aerossóis de alcatrão e polimerização que forma estruturas mais complexas que causam problemas no equipamento e também em turbinas e motores onde o gás produzido é utilizado. (BUI et al, 1994)

A quantidade máxima aceitável de alcatrão no gás é dependente do tipo de processo e da aplicação. Milne e Evans (1998) reportaram limites de tolerância de alcatrão para diversos usos finais: 50–500 mg/Nm³, 50–100 mg/Nm³ e 5 mg/Nm³ é o recomendado para compressores, sistemas de combustão interna e turbinas à gás industriais, respectivamente.

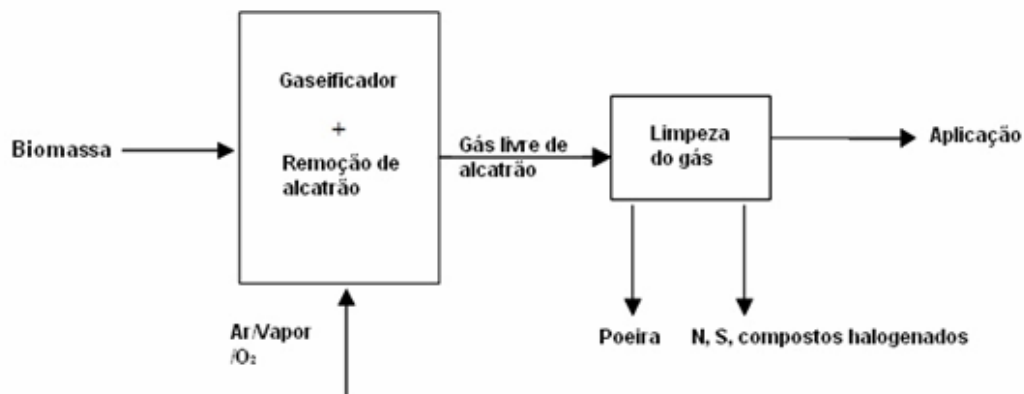
3.5.1 Remoção de Alcatrão

Foram reportados na literatura vários métodos de redução da quantidade de alcatrão no gás produzido. A maioria das pesquisas em andamento trabalham com o desenvolvimento de um método eficiente para a remoção do alcatrão de uma maneira econômica e otimizada. Tais métodos devem ser eficientes em termos de remoção de alcatrão, viabilidade econômica e principalmente, não interferir na produção dos compostos desejáveis do gás. Todos os métodos disponíveis podem ser categorizados em dois tipos, dependendo do local onde o alcatrão é removido: no próprio gaseificador, (métodos primários) ou fora do gaseificador (métodos secundários). (DEVI et al. 2003)

3.5.1.1 Métodos primários

Os métodos primários podem ser definidos como todas as medidas tomadas, no processo de gaseificação, para prevenir a produção ou converter o alcatrão no gaseificador. Um método primário ideal elimina a necessidade do uso de métodos secundários como é mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Conceito de remoção de alcatrão por métodos primários.



(DEVI et al. 2003)

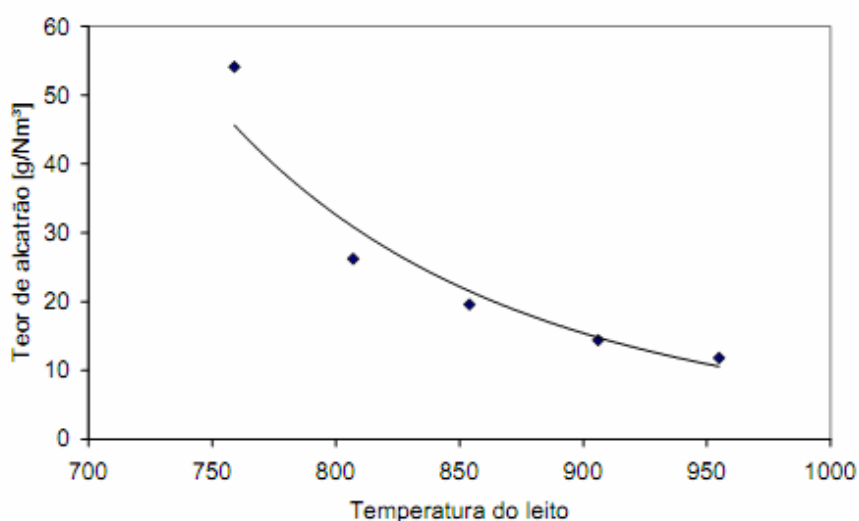
Para se obter um gás de saída com a melhor qualidade, a operação do gaseificador tem que ser otimizada. Para uma operação otimizada do gaseificador, os principais fatores a serem levados em consideração são o desenho do gaseificador e a operação do mesmo.

As condições de operação são de fundamental importância em respeito a vários aspectos, tais como, conversão de carbono, composição do gás produzido, formação e redução de alcatrão. Os parâmetros mais importantes incluem temperatura, pressão, agente gaseificador, catalisadores e aditivos, fator de ar¹ (FA), tempo de residência, etc. A seleção desses parâmetros depende do tipo de gaseificador utilizado.¹

Para se conseguir uma alta conversão de carbono da biomassa e pouco alcatrão, uma alta temperatura de operação é preferível (acima de 800°C). A temperatura não afeta apenas a quantidade de alcatrão formado, mas também a composição do alcatrão formado, pelo fato de influenciar as reações químicas em todo o processo de gaseificação.

Kinoshita et al. (1990) observaram durante a gaseificação de pó de serra, que a quantidade de espécies detectáveis do alcatrão diminuíram com o aumento da temperatura. Compostos contendo oxigênio como o fenol, cresol e benzofurano só existem em quantidades significantes em temperaturas abaixo de 800°C. Eles também confirmaram que temperaturas maiores favorecem a formação de menos espécies aromáticas no alcatrão sem grupos substituintes como benzeno, naftaleno e fenantreno. A destruição desses hidrocarbonetos aromáticos ocorre apenas em temperaturas superiores à 850°C. A Figura 8 mostra a correlação entre teor de alcatrão e temperatura.

Figura 8 – Variação do teor de alcatrão no gás em função da temperatura do leito.



(ANDRADE, 2007)

¹ FA: Relação entre a razão ar/combustível utilizada e o ar estequiométrico.

Narváez et al. (1996) observaram uma drástica redução (74%) na quantidade de alcatrão quando se aumenta a temperatura de 700 para 800°C.

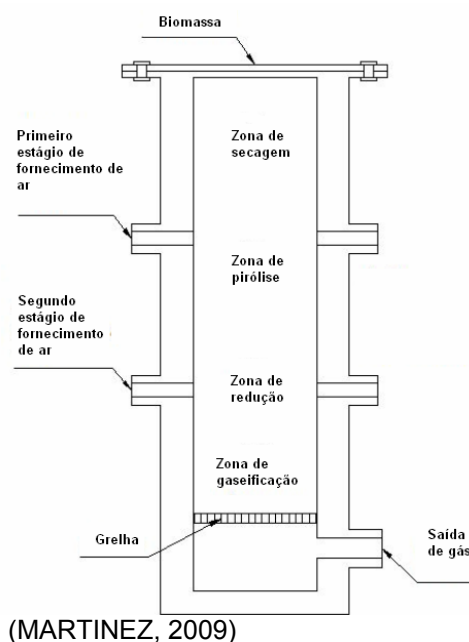
O FA influencia fortemente os tipos de compostos produzidos na gaseificação. De acordo com Kinoshita et al.(1990), a concentração de alcatrão diminui com o aumento do FA devido ao fato de haver mais oxigênio para reagir com os compostos voláteis na zona de pirólise. O efeito do FA é mais significativo em temperaturas maiores.

O desenho do reator é crucial para a gaseificação em termos de eficiência, poder calorífico e também para a formação de alcatrão. Modificações do desenho do gaseificador podem ser muito efetivas na produção de gás limpo.

A injeção secundária de ar no gaseificador resulta numa redução significativa na quantidade de alcatrão, pois há um acréscimo na quantidade de ar disponível e com isso haverá uma maior aproximação das condições de combustão e conseqüentemente um aumento da temperatura.

Gaseificadores de dois estágios são muito efetivos na produção de um gás limpo. O conceito básico desse desenho é separar a zona de pirólise da zona de redução. Um gaseificador de dois estágio é equivalente a dois gaseificadores de um estágio. O alcatrão formado na pirólise (primeiro estágio) é decomposto na zona de redução (segundo estágio). A Figura 9 mostra o esquema geral de um gaseificador de duplo estágio.

Figura 9 – Esquema geral da gaseificação com duplo estágio de Gaseificação



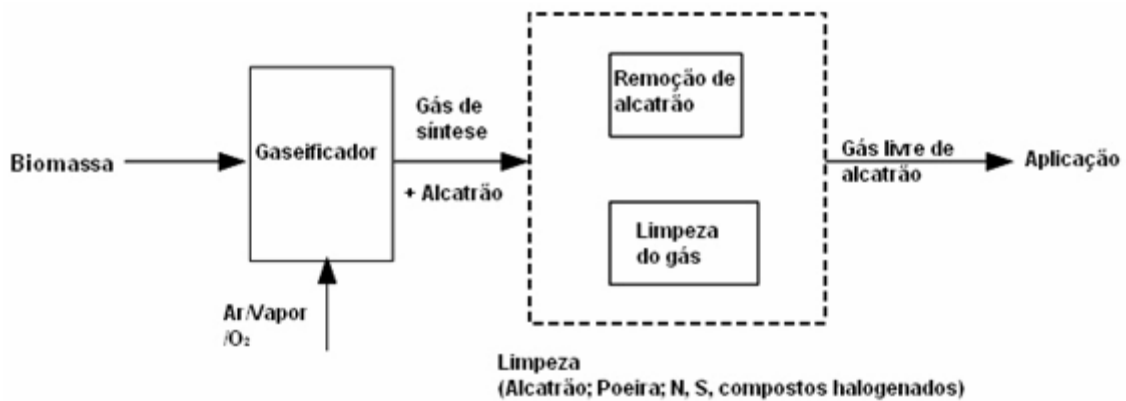
3.5.1.2 Métodos secundários

Os métodos secundários são convencionalmente usados como tratamento do gás quente produzido no gaseificador. O conceito dos métodos secundários é dado na Figura 10. Esses métodos podem ser químicos ou físicos:

- Craqueamento do alcatrão após o gaseificador, seja termicamente ou cataliticamente.
- Métodos mecânicos como o uso de ciclones, separadores de partícula e filtros.

Embora os métodos secundários sejam eficientes na remoção de alcatrão, em alguns casos, não são economicamente viáveis.

Figura 10 – Conceito da redução de alcatrão por métodos secundários.



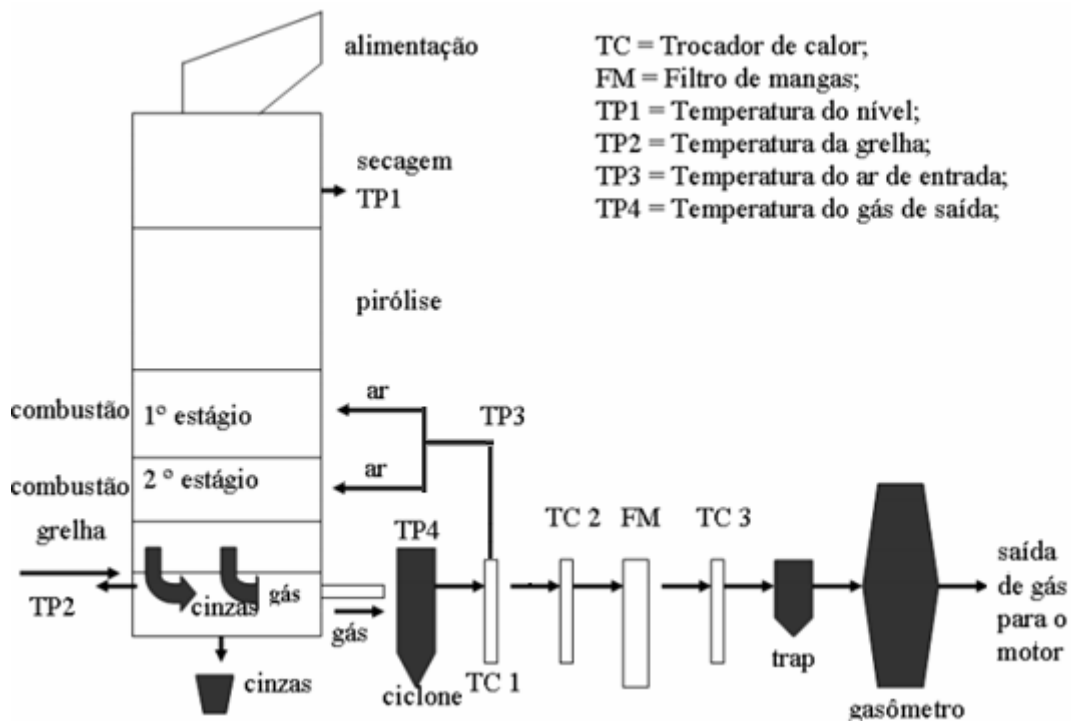
(DEVI et al. 2003)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 GASEIFICADOR

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado um gaseificador co-corrente de duplo estágio, fabricado pela Termoquip. Na Figura 11 é representado um esquema do gaseificador utilizado. Os equipamentos de medição tem precisão industrial e não foi realizado um tratamento dos erros e incertezas.

Figura 11 – Representação esquemática do gaseificador utilizado.



A construção foi feita de forma modular, dividida em partes unidas por flanges. A distribuição de ar no interior dos estágios é feita através de bicos radiais na parede do reator, garantindo assim uma homogeneidade nas temperaturas nestas regiões.

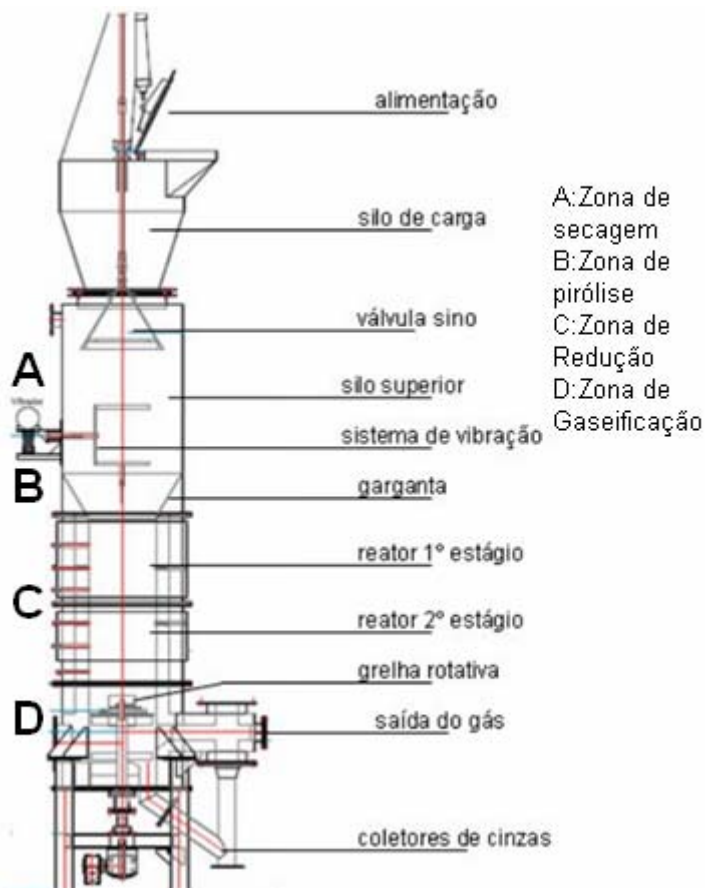
Para realizar o monitoramento das temperaturas foram instalados termopares tipo K. A localização dos termopares está de acordo com a Figura 11.

Pela temperatura de TP1, que se localiza no silo superior, tem-se um referencial de quando se deve efetuar a recarga do sistema, pois quanto maior aquela, mais energia está sendo utilizada para aquecer o ambiente ao invés de realizar a secagem da biomassa, a temperatura fornecida pelo TP1 é chamada de

“temperatura do nível”. A temperatura indicada pelo TP2 é a temperatura da grelha, a qual, segundo o fabricante, não deve ultrapassar os 800°C. O TP3 indica a temperatura do agente oxidante que está sendo insuflado dentro do reator, o agente oxidante utilizado é o ar. O TP4 indica a temperatura na qual os gases deixam o gaseificador, aqui chamado de “gás de saída”.

A Figura 12 mostra o gaseificador, suas divisões e funções de operação.

Figura 12 – Detalhe da planta do gaseificador com detalhamento dos componentes e das zonas específicas.



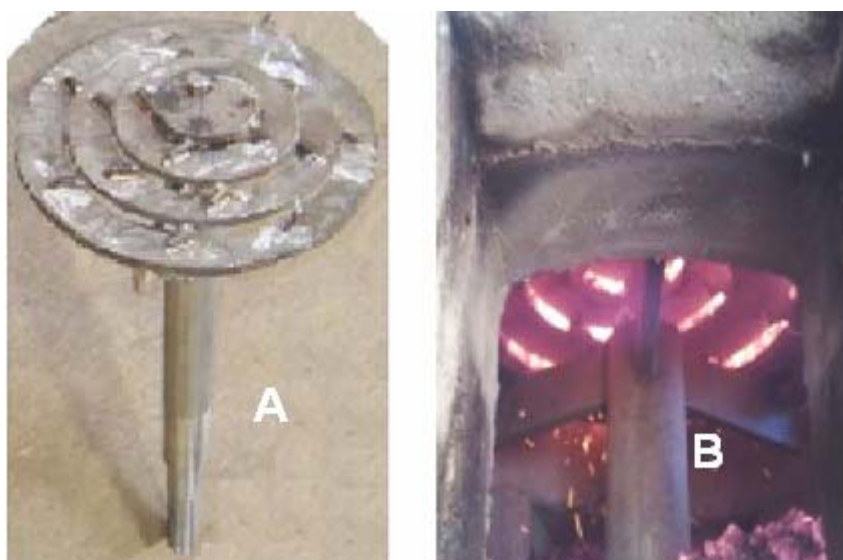
(TERMOQUIP, 2011)

A zona de secagem, ou silo é um depósito interno que tem a função de dar ao gaseificador uma maior autonomia em sua operação, além de ir secando a biomassa que ali permanece. Existe acoplado a zona de secagem, um sistema de vibração temporizado cuja função é auxiliar o processo de descida da biomassa conforme a mesma vai sendo consumida nas zonas posteriores. O sistema de vibração é programado para funcionar durante 4 segundos a cada 4 minutos. Acima

do silo está o silo de carga, que é um estoque de combustível, a liberação desta biomassa é feita de forma manual, de acordo com o indicativo dado pelo TP1. A liberação da biomassa é feita através de uma válvula em forma de sino, cuja abertura é pneumática.

Na zona de pirólise, tem início a produção de gases, alcatrão e material particulado, terminando na zona de redução. Toda biomassa fica suspensa por uma grelha rotativa em forma de tronco de cone que fica logo abaixo da zona de redução. A Figura 13 mostra a grelha.

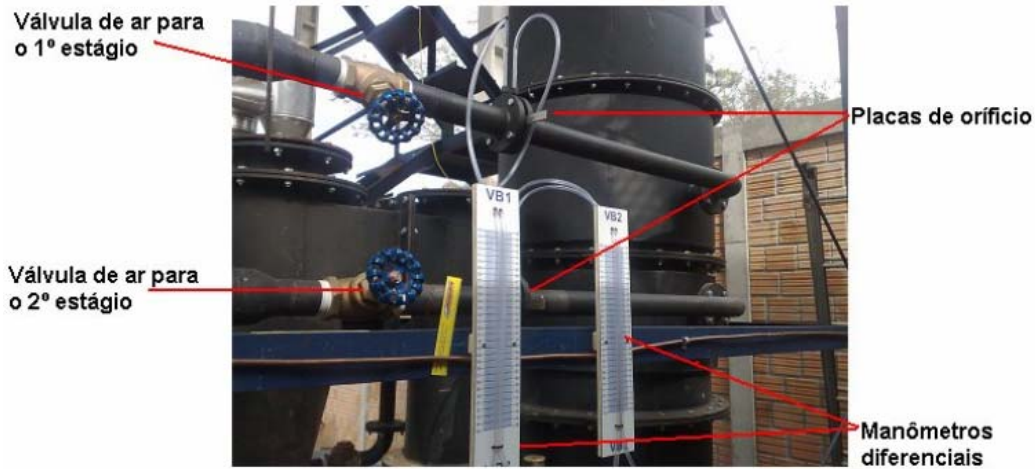
Figura 13 – Grelha rotativa, antes de ser instalada (A) e em funcionamento (B).



Na zona de combustão, o diâmetro interno do gaseificador é reduzido, fazendo com que a velocidade dos gases aumente, facilitando a manutenção de temperaturas uniformes na seção transversal, o que por sua vez ocasiona o craqueamento térmico do alcatrão. O gás é liberado na zona de oxidação.

A quantidade de ar insuflada para dentro do gaseificador é regulada através de válvulas, uma para cada estágio de gaseificação e o volume de agente gaseificador insuflado é avaliado através do uso de placas de orifício, onde a diferença de pressão é medida em mmca. A Figura 14 mostra as válvulas, as placas de orifício e os manômetros diferenciais.

Figura 14 – Válvulas de controle de agente gaseificador, placas de orifício e manômetros diferenciais.



O gaseificador conta com uma série de sistemas específicos para seu funcionamento adequado. Cada um desses sistemas tem seus componentes. Estes sistemas e seus componentes estão relacionados no Quadro 1.

Quadro 1 – Sistemas do gaseificador e seus componentes.

Sistemas	Componentes
Sistema de alimentação de biomassa	- silo de carga de biomassa; - silo superior; - sistema pneumático de abertura e fechamento da tampa e sino sincronizados.
Sistema de limpeza do gás	- ciclone; - separador de condensados (<i>trap</i>); - filtro de mangas (FM);
Sistema de partida	- queimador de teste; - queimador de partida; - maçarico.
Sistema de aquisição de dados	- termopares; - temperaturas do agente gaseificador, da grelha, do gás produzido e do nível; - rotação da grelha.
Sistema de refrigeração do gás	- trocadores de calor.
Sistema de retirada e armazenamento das cinzas	- grelha rotativa em forma de tronco de cone; - ciclone; - depósito de cinzas; - depósito de particulados.
Sistema de queda da biomassa	- vibrador; - sino.
Sistema de aquecimento do agente de gaseificação (ar)	- trocador de calor com gás produzido.
Sistema de resfriamento do gás de síntese	- trocador de calor com água.
Sistema de nivelamento de pressão do gás de síntese	- gasômetro.
Sistema de fornecimento do agente gaseificador	- soprador Siemens 3.405 rpm; 2,8 m ³ /min. - válvula e placa de orifício.

O gaseificador tem 6,82m de altura, 1000mm de diâmetro externo e 550mm de diâmetro interno. É fabricado com chapas de aço carbono e tem seu interior revestido com concreto refratário isolante HVL 24.

O sistema de alimentação do gaseificador é composto por um silo de carga e um silo superior. A alimentação ocorre quando há necessidade, e acontece através da abertura da válvula em forma de sino. Através da ação da gravidade e do auxílio do sistema de vibração, a biomassa desce até o silo superior, onde começa a participar do processo. A Figura 15 mostra os componentes do sistema de alimentação.

Figura 15 – Válvula sino (A), Silo superior carregado (B) e Sistema de vibração



O sistema de fornecimento de ar é um soprador Siemens com rotação de 3405 rpm com vazão máxima com vazão máxima de 2,8 m³/min. O Sistema de aquecimento de ar é composto de um trocador de calor, que fornece calor ao ar que é insuflado através do calor do gás produzido.

As cinzas são retiradas através da grelha rotativa, que pode ter sua rotação ajustada para, no máximo duas voltas por hora, em sentido horário ou anti-horário. A grelha possui ranhuras e lacunas para raspar as cinzas e empurra-las ao reservatório. A Figura 16 mostra os reservatórios de cinzas removidas pela grelha rotativa e material particulado retirado do gás pelo ciclone.

Figura 16 – Reservatórios de cinzas e de material particulado.



Além do ciclone, o sistema de limpeza do gás é composto um filtro de mangas. Seu funcionamento consiste na introdução do gás no corpo central do filtro através de uma antecâmara dimensionada de modo a evitar o choque direto do material particulado com as mangas, além de reduzir a velocidade do fluxo, contribuindo para a precipitação do material particulado com granulometria maior através da gravidade. O gás é forçado a passar através das mangas, onde o material particulado é retido. Na sequência o gás sai do filtro através de um bocal lateral e segue no sistema. O gás deve chegar ao filtro de mangas com temperatura suficiente para evitar a condensação de água nas mangas, o que prejudica a filtragem e pode até bloquear totalmente a passagem do gás. O filtro de mangas é composto de 4 mangas de poliéster teflonado com gramatura de 450 g/m² e com 550 g/m² e possuem as seguintes dimensões: Ø 200 x 1500 mm. A Figura 17 mostra o filtro de mangas.

Figura 17 – Filtro de mangas



Após o filtro de mangas, existe uma trap, cujo objetivo é favorecer a condensação da água presente no gás. Essa trap é uma estrutura de aço de 163 mm de diâmetro e 540 mm de altura que evita a passagem direta do gás através de uma chapa de aço onde a água presente no gás é condensada e recolhida. Existe também uma válvula para a remoção da água de dentro da trap. Após a passagem do gás pela trap, este vai para um gasômetro, onde sua pressão é regulada para ser encaminhado para o motor. A Figura 18 mostra a trap.

Figura 18 – Trap

No gaseificador também está presente um sistema de eliminação do excesso de gás por queima no flare. Sua função não é exclusivamente eliminar o excesso, esse sistema também é utilizado para queimar o gás quando o mesmo não está sendo utilizado no motor, evitando sua liberação na atmosfera, visto que o gás contribuiria mais para o efeito estufa do que o resultado de sua combustão. O sistema é composto de um queimador e um queimador piloto. O queimador tem acoplado a si um bico alimentado com gás liquefeito de petróleo, que fica aceso o tempo todo para que haja a garantia de que todo o gás seja queimado. No queimador piloto, pode-se observar um indicativo da qualidade de gás através da cor da chama e sua autonomia. A Figura 19 mostra o queimador e o queimador piloto.

Figura 19 – Queimador e queimador piloto



O modo de operação do gaseificador está detalhado no apêndice A.

4.2 BIOMASSA UTILIZADA

A biomassa utilizada foi madeira de eucalipto (Figura 20), proveniente de escoras utilizadas na construção civil. As escoras utilizadas são preferencialmente aquelas cujo diâmetro varia de 70 a 100mm. As escoras são cortadas em pedaços de 80 a 100mm. As características da madeira de eucalipto estão relatadas na Tabela 1.

Figura 20 – Biomassa utilizada.



Tabela 1 – Composição elementar e imediata da madeira de eucalipto

Tipo de Biomassa: Lenha de Eucalipto		
Composição Elementar (%)	C	49,00
	H	5,87
	O	43,97
	N	0,30
	S	0,01
	Cinzas	0,30
Composição Imediata (%)	Voláteis	81,42
	Cinzas	0,79
	Carbono fixo	17,82
PCS (MJ/kg)	19,42	
PCI (MJ/kg)	18,27	

Fonte: (JENKINS, 1990).

As dimensões das partículas de madeira tem grande influência na produção de alcatrão, por isso a madeira é cortada de modo a formar grandes partículas, o que resulta numa menor produção de alcatrão (HENRIQUES, 2009). Essa menor produção decorre do fato de partículas maiores fornecerem mais locais para que o alcatrão seja destruído e também da pirólise ocorrer mais lentamente em relação a partículas pequenas.

A umidade da madeira utilizada foi calculada segundo o método de secagem em estufa (MARTINS, 1988). Este método consiste na determinação do peso (Pu) da amostra da madeira na umidade em que ela se encontra; coloca-se a amostra em uma estufa com temperatura de $103 \pm 2^{\circ}\text{C}$ até que seu peso (Ps) se torne constante, isto é, a diferença de peso entre duas pesagens consecutivas seja menor que 10%; calcula-se a umidade aplicando a equação 1:

$$U(\%) = \frac{P_u - P_s}{P_s} \times 100 \quad [1]$$

Onde: U(%) = teor de umidade, em porcentagem

P_u = Peso úmido de amostra

P_s = Peso seco da amostra completamente seca

Para cada lote de madeira foram tomadas 10 amostras.

Antes de iniciar as operações com o gaseificador, as cinzas são removidas do depósito deixando o mesmo vazio. Após o ciclo de operações, as cinzas são coletadas para se determinar a quantidade produzida no processo.

Para realizar as alimentações com biomassa, aguarda-se que a temperatura do nível atinja 85°C, o que significa que a camada de biomassa que isola o “nível” do reator foi consumida, ocasionando assim um aumento na temperatura.

4.3 GRUPO GERADOR

Para compor um grupo gerador de 50 kVA (45 kW), é necessário um motor cuja relação torque x rotação seja obtida a 1800rpm, que é a rotação necessária para gerar na frequência da rede elétrica (60Hz) com gerador de dois polos (AZENHOFER et alli, 1971, p. 42). Para tal, foi necessário adaptar um motor ciclo Diesel, transformando-o em ciclo Otto, posto que os motores disponíveis no mercado, para ciclo Otto, apresentam potência máxima a rotações bem mais elevadas.

As alterações normais para a conversão são as seguintes:

- retirada do sistema de alimentação diesel existente;
- alteração do cabeçote para colocação de velas;
- mudança do sistema de entrada de ar e combustível para a nova característica;
- montagem de sistema de equalização de entrada de gás (necessário para adequar pressão de entrada de gás que é muito baixa para pressão de sucção do motor);
- implantação do sistema de controle de velocidade para garantir estabilidade à rotação do conjunto. (Controle isócrona de velocidade);

- inserção de sonda lambda no sistema para controle da queima;
- instalação de sistema de ignição eletrônica com controle via *software*;

- sistema de ignição mapeada, que faz, via *software* o monitoramento no sistema de rotação lenta, no avanço da ignição, na injeção de combustível, na temperatura do motor.

O sistema de ignição é microprocessado, podendo sofrer os mais variados tipos de ajustes conforme as características desejadas para o motor, assim como ajuste de acordo com o combustível e:

- controle de ponto de ignição na partida;
- controle por temperatura;
- controle por MAP (Mainfold air pressure) ou sensor de pressão absoluta. Utilizados para calcular a densidade e temperatura do ar, que, por sua vez, determina a medição de combustível necessário para a combustão otimizada.

O grupo gerador utilizado está mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Grupo gerador



O sistema é regulado pela abertura e fechamento do corpo borboleta, instrumento este que permite o controle de entrada da mistura ar/combustível adequada, de acordo com a necessidade da carga aplicada ao motor. A Quadro 2 resume as principais características do motor.

Quadro 2 – Resumo das principais características técnicas do motor utilizado nos ensaios.

Motor MWM D 229-4	
Aspiração	Natural
Disposição/cilindro/válvulas	Linha/4/8
Cilindrada total	3,92 Litros
Diâmetro x Curso	102 x 120mm
Taxa de compressão	11:01
Sistema de ignição	ER-BR
Misturador ar/combustível	Mixer 50

O monitoramento do motor é feito por instrumentos de medição que o auxiliam no bom desempenho e acusam falhas em seu funcionamento. O quadro de instrumentos e ignição é mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Painel de indicadores do motor e ignição



A Figura 23 representa o misturador de combustível (23a) e corpo borboleta (23b) respectivamente, que têm por finalidade dosar a quantidade de ar/combustível que vai para o cilindro, de acordo com a carga aplicada.

Figura 23 – a) Misturador de combustível do motor utilizado b) Corpo Borboleta do motor utilizado



Foi utilizado o gerador Kohlbach KCEL acoplado ao motor. Trata-se de um gerador trifásico síncrono “brushless”, devido ao fato de que neste tipo de gerador o regulador se adequa à velocidade do rotor. Por não necessitar de contatos elétricos deslizantes para seu funcionamento, os motores não possuem escovas e anéis coletores e, com isso, eliminam a necessidade de manutenção, inspeção e limpeza frequente nestes componentes (WEG, 2011) e, ainda, possui controle eletrônico do tipo isócrono, com controle por sensor eletromagnético e proteção contra sub e sobre velocidade. Assim sendo, o valor da velocidade de referência (ω_{ref}) varia com a potência ativa de carga. Com limitações na capacidade da geração de energia, de acordo com sua aplicação e regime de funcionamento, gera no máximo 50 kVA (45 kW), quando aplicáveis para fornecimento de energia elétrica (com carga variável) no caso de falha de uma rede pública, ou 48 kVA (38 kW) aplicáveis para fornecimento contínuo de energia elétrica e tensões de saída de 127/220 V ou 220/380 V, de acordo com o fabricante, como pode-se observar na Tabela 2.

Essas limitações são para preservar o desgaste prematuro do equipamento.

Tabela 2 – Características do gerador.

Gerador Kohlbach Kcel tipo síncrono brushless	
Potência standby ¹ G. Ger.	45 kW / 55 kVA
Potência prime ² G. Ger.	38 kW / 48 kVA
Tensão de saída	127/220 V ou 220/380 V

Fonte: MWM (2011)

A carga trifásica utilizada para dissipação de energia do grupo gerador quando operado com gás de síntese, consiste num banco de resistências acionadas por disjuntores, divididas em 6 estágios, totalizando 32,4 kW. São elas: 5,3; 5,3; 5,3; 3,5; 6 e 7 kW, conforme a Figura 24.

Conforme se ligam um ou mais disjuntores, injeta-se carga no sistema; de forma inversa, desligando-se um disjuntor, sua referida carga é baixada do sistema. A carga total em dado instante, então, corresponde à soma daquelas comandadas pelos disjuntores acionados. Uma cuba eletrolítica supriria a necessidade, se o teste fosse por pouco tempo, porém, como não é o caso, a água chegaria à fervura, interrompendo os testes.

Figura 24 – Banco de cargas

¹ aplicáveis para fornecimento de energia elétrica (com carga variável) no caso de falha de uma rede pública.

² aplicável para fornecimento contínuo de energia elétrica (com carga variável), ao invés de ser comprada comercialmente

Para efetuar a medição da energia consumida pelo banco de cargas, foi utilizado um medidor kWh PN5T-G Nansen trifásico, instalado entre a saída de energia do grupo gerador e a carga.

Foi instalado, também, um medidor de kWh para verificar o consumo geral do sistema após um ciclo de operação.

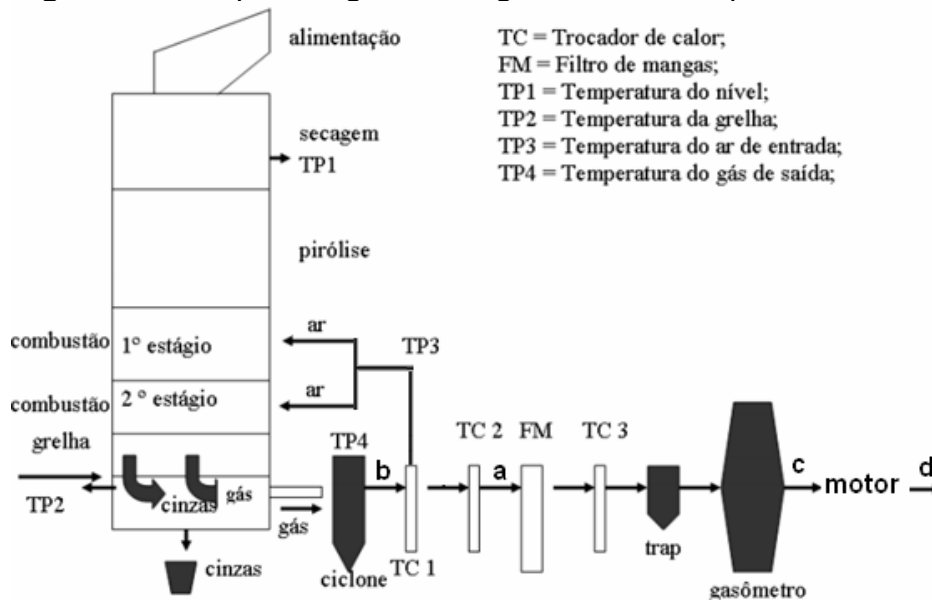
4.4 AMOSTRAGENS DE GÁS E DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO

O conjunto de amostragem do gás produzido tem por finalidade retirar amostras de gás diretamente da tubulação de saída do gaseificador em pontos diferentes, sendo aspirado por bomba de sucção e enviado continuamente para a válvula de amostragem dos equipamentos, que permite reter periodicamente uma amostra de volume constante para análise.

A análise da quantidade de oxigênio no gás foi feita no equipamento para análise de oxigênio Servomex 570A com detector paramagnético. Para a determinação da quantidade de monóxido de carbono, metano, nitrogênio e dióxido de carbono, foi utilizado o cromatógrafo gasoso SRI, modelo 8610C. Para a determinação da quantidade de hidrogênio foi utilizado o cromatógrafo gasoso de marca Varian, modelo CG 3400, com detecção através de condutividade térmica. O gás de arraste utilizado foi o argônio. A análise foi realizada pela White Martins.

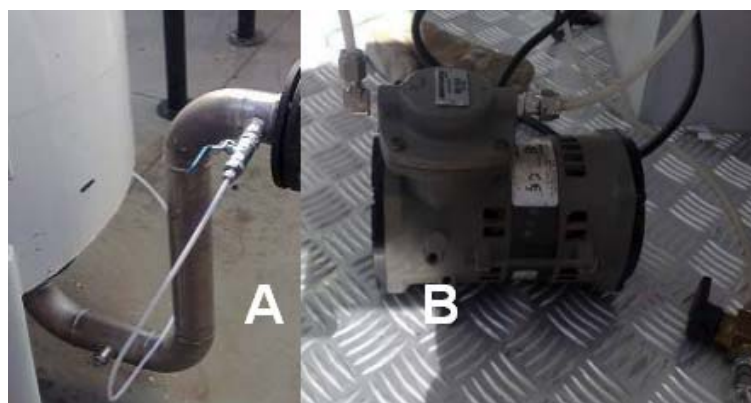
Os pontos de coleta e número de amostras utilizadas (Figura 25) foram: antes do filtro de mangas (25a), uma vez; antes do gasômetro, três vezes; chama piloto (25b), três vezes (gás sem intervenção de filtros e trocadores de calor); após o gasômetro (25c) (ponto em que o gás não sofre mais intervenções, indo direto para o motor), cinco vezes e no escapamento do motor (25d) (determinar a quantidade de elementos não queimados), uma vez.

Figura 25 – Esquema geral do gaseificador e pontos de amostragem de gás.



Foi utilizada uma bomba de sucção para enviar o gás do ponto de coleta até os equipamentos de medição. Uma medida também foi efetuada somente com aeração, antes do início da operação do gaseificador, a fim de verificar se há contaminação do ar que passa pelo gaseificador e comprovar o funcionamento dos equipamentos. A Figura 26 mostra um dos pontos de coleta (26a), e a bomba utilizada para realizar a sucção dos gases para os equipamentos (26b).

Figura 26 – a) Ponto de coleta após o gasômetro b) Bomba de sucção



Após a verificação da qualidade do gás gerado, de forma visual e qualitativa (chama azul e/ou transparente), e estando o grupo gerador preparado para entrar em operação com gás de síntese, após ter sido previamente aquecido com GLP por quinze minutos, abre-se a válvula que libera o gás de síntese para o

grupo e fecha-se a válvula que o alimenta com GLP. O gás é enviado do gasômetro para o motor do grupo por meio de tubulação de PVC, a uma distância de 4 metros.

4.5 MÉTODOS DE COLETA DE ALCATRÃO E PARTICULADOS

Para realizar a amostragem do alcatrão (Figura 27), foi preparado um frasco borbulhador com isopropanol. Este frasco foi conectado a linha de gás e então o gás produzido foi borbuhlado em isopropanol para que os componentes do alcatrão fossem retidos no mesmo. Antes de o gás chegar ao borbuhlador o mesmo passa por um filtro onde o material particulado é retido. Após ser borbuhlado o gás passa por um dispositivo que mede a vazão do mesmo.

Os compostos são extraídos do cartucho com acetonitrila e analisados por um cromatógrafo.

A amostragem foi realizada depois do filtro de mangas, para que seja avaliada a qualidade do gás que está indo para o motor.

Figura 27 – Fotografia do sistema de coleta de alcatrão.

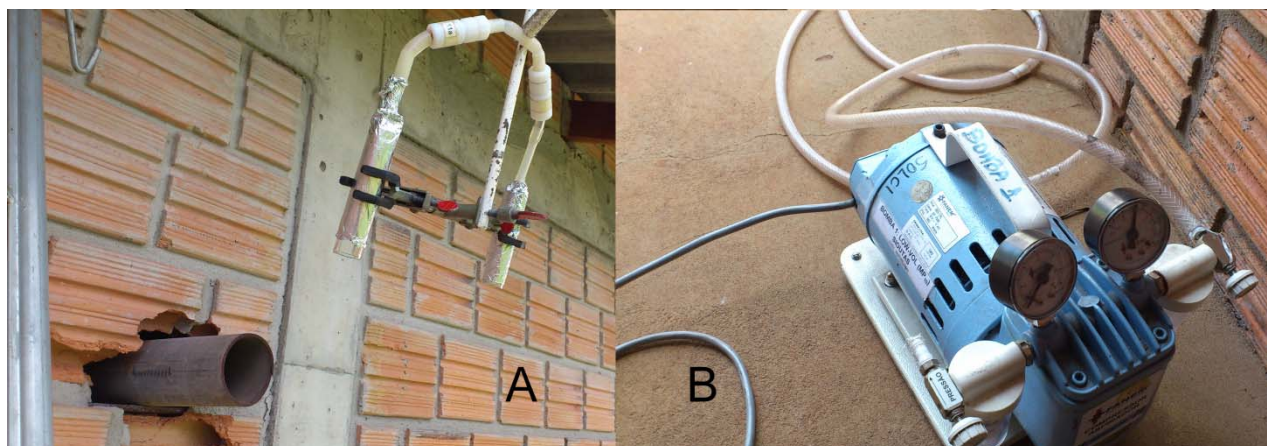


4.6 MÉTODO DE COLETA DOS GASES DE ESCAPE

Para a coleta dos gases de escape foram posicionados cartuchos com a resina XAD na saída do escape (Figura 28a). Os cartuchos foram conectados uma tubulação que é ligada a uma bomba (Figura 28b) que faz a sucção do gás. Os

cartuchos são lavados com acetonitrila para a remoção dos compostos que ficaram retidos na resina e então é feita uma análise cromatográfica para saber quais os compostos estão presentes no gás de escape.

Figura 28 – Fotografia do sistema de coleta dos gases de escape composto por: a) cartuchos com resina XAD e b) bomba utilizadas para realizar a sucção dos gases de escape.



4.7 MÉTODO DE ANÁLISE DO ALCATRÃO, MATERIAL PARTICULADO E GASES DE ESCAPE

As análises dos HPA e CC foram realizadas no cromatógrafo Dionex Ultimate 3000 (CLAE-DAF-DUF). Coluna C-18 Metasil 5u ODS (4,6 x 250 mm, 5 μ m), com programação de gradiente, na vazão de 1mL min⁻¹ e injeção de 20 μ L em modo automático. No Quadro 3 o método está especificado.

Quadro 3 – Descrição do método de análises cromatográficas

Método	HPA
Equipamento	Dionex Ultimate 3000 (CLAE-DAF-DUF)
Coluna	Metasil 5u ODS (5 μ m, 4.6 x 250 mm)
λ / nm	254
Fase móvel	Água/Acetonitrila 0'-20'-60%; 36'-100%; 44'-60%

Para o material particulado o filtro foi pesado antes e depois da coleta em uma balança ultra-analítica

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CONSUMO DE BIOMASSA

A Carga inicial do gaseificador é composta da quantidade de biomassa restante da última vez em que o mesmo foi operado, mais a quantidade necessária para encher o mesmo. A capacidade total do gaseificador é de cerca de 120 kg.

As recargas foram efetuadas quando a “temperatura do nível” atingia 85°C.

No mês de setembro/2012 foram realizados 2 ensaios em dias consecutivos, em dezembro/2012 um ensaio e em janeiro/2013 um ensaio. A Tabela 3 apresenta informações sobre as recargas efetuadas no ensaios 1 e 2.

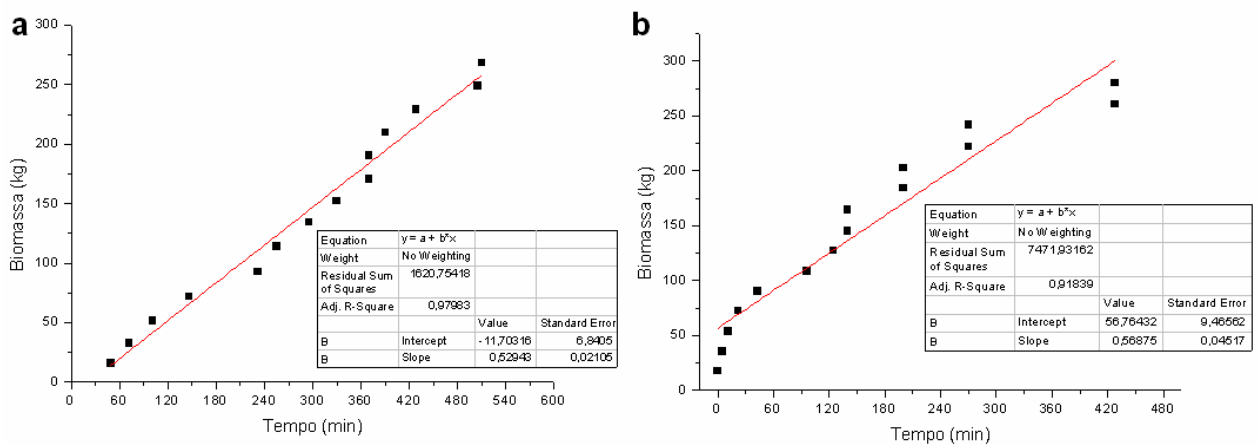
Tabela 3 – Número de recargas efetuadas em cada ensaio, o momento em que foram realizadas, sua massa e umidade nos Ensaios 1 e 2.

Ensaio 1				Ensaio 2			
Recarga	Tempo (min)	Peso (kg)	Umidade (%)	Recarga	Tempo (min)	Peso (kg)	Umidade (%)
1	49	19,5	19,6 ± 2,7	1	0	23,0	22,9 ± 0,9
2	72	21,1	19,6 ± 2,7	2	5	22,7	22,9 ± 0,9
3	101	23,2	19,6 ± 2,7	3	11	23,7	22,9 ± 0,9
4	146	25,5	19,6 ± 2,7	4	22	24,4	22,9 ± 0,9
5	232	25,6	19,6 ± 2,7	5	43	22,9	22,9 ± 0,9
6	255	26,5	19,6 ± 2,7	6	96	24,2	22,9 ± 0,9
7	295	25,2	19,6 ± 2,7	7	125	23,9	22,9 ± 0,9
8	330	21,9	19,6 ± 2,7	8	140	23,4	22,9 ± 0,9
9	370	22,9	19,6 ± 2,7	9	140	24,7	22,9 ± 0,9
10	370	24,8	19,6 ± 2,7	10	200	26,0	24,3 ± 6,8
11	390	23,3	19,6 ± 2,7	11	200	24,6	24,3 ± 6,8
12	428	24,7	19,6 ± 2,7	12	270	28,2	30,1 ± 4,6
13	505	24,1	19,6 ± 2,7	13	270	28,2	30,1 ± 4,6
14	510	24,5	19,6 ± 2,7	14	428	26,7	30,1 ± 4,6
				15	428	27,7	30,1 ± 4,6

No Ensaio 1, foram consumidos cerca de 332 kg de madeira (268,5 kg base seca), já no Ensaio 2, foram consumidos cerca de 373 kg de madeira (279,9kg base seca).

A Figura 29a mostra o consumo em base seca de biomassa em função do tempo no Ensaio 1. No Ensaio 1 o gaseificador consumiu cerca de 0,52kg/min de biomassa.

Figura 29 – Quantidade total de biomassa consumida em função do tempo no Ensaio 1 (a) e no Ensaio 2 (b).



A Figura 29b mostra o consumo em base seca de biomassa em função do tempo no Ensaio 2. No Ensaio 2 o gaseificador consumiu cerca de 0,65kg/min de biomassa, valor 24% maior do que no Ensaio 1. Essa diferença é explicada pelo fato do Ensaio 2 ter sido realizado no dia seguinte ao Ensaio 1, o que implica que o gaseificador já estava pré-aquecido portanto o mesmo passou a consumir mais biomassa, já que o tempo necessário para aquecê-lo foi drasticamente reduzido.

No início do Ensaio 2 foram necessárias diversas recargas, isso se deve ao fato do ensaio ter sido realizado no dia seguinte ao Ensaio 1, o que acabou consumindo biomassa enquanto o mesmo estava desligado.

Em ambos os ensaios a potência gerada foi de 17,3w.

A Tabela 4 apresenta informações sobre as recargas efetuadas no ensaios 3 e 4.

Tabela 4 – Número de recargas efetuadas em cada ensaio, o momento em que foram realizadas, sua massa e umidade nos Ensaio 3 e 4.

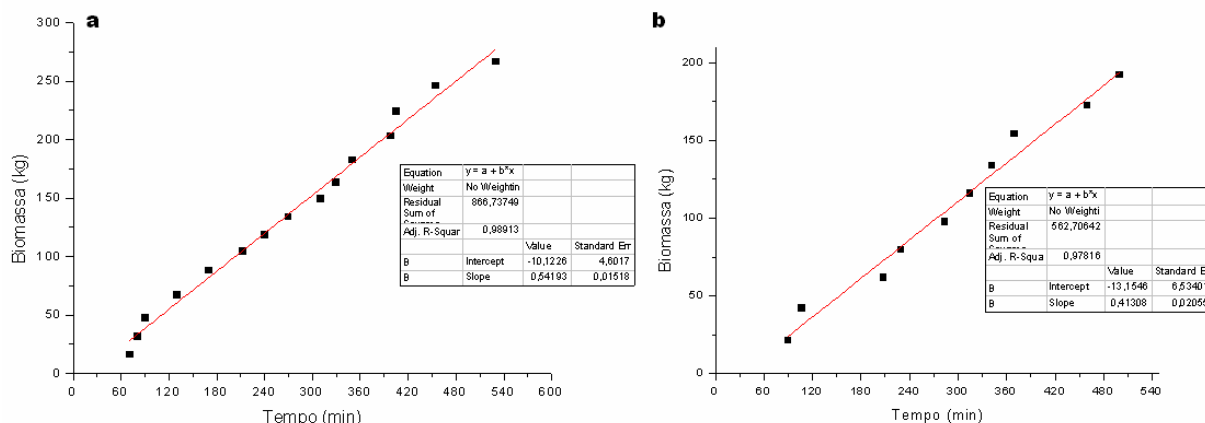
Ensaio 3				Ensaio 4			
Recarga	Tempo (min)	Peso (kg)	Umidade (%)	Recarga	Tempo (min)	Peso (kg)	Umidade (%)
1	71	18,5	13,4 ± 1,2	1	90	25,0	15,9 ± 2,2
2	81	17,3	13,4 ± 1,2	2	107	24,9	15,9 ± 2,2
3	90	19,2	13,4 ± 1,2	3	208	23,5	15,9 ± 2,2
4	130	22,5	13,4 ± 1,2	4	230	20,9	15,9 ± 2,2
5	170	24,1	13,4 ± 1,2	5	284	21,4	15,9 ± 2,2
6	213	19,0	13,4 ± 1,2	6	315	21,8	15,9 ± 2,2
7	240	15,8	13,4 ± 1,2	7	342	21,4	15,9 ± 2,2
8	270	18,1	13,4 ± 1,2	8	370	24,1	15,9 ± 2,2
9	310	18,1	13,4 ± 1,2	9	460	21,6	15,9 ± 2,2
10	330	15,6	13,4 ± 1,2	10	500	23,5	15,9 ± 2,2
11	350	22,5	13,4 ± 1,2				
12	398	23,6	13,4 ± 1,2				
13	405	24,5	13,4 ± 1,2				
14	455	25,2	13,4 ± 1,2				
15	530	23,9	13,4 ± 1,2				

No Ensaio 3 foram consumidos 307 kg de biomassa (266,4 kg base seca), no Ensaio 4, 228 kg de biomassa (191,9 kg base seca).

A Figura 30a mostra o consumo de biomassa em base seca no Ensaio 3, em função do tempo. O gaseificador consumiu 0,49kg/min de biomassa durante o Ensaio 3.

A Figura 30b mostra o consumo de biomassa em base seca no Ensaio 4, em função do tempo. O gaseificador consumiu 0,35kg/min de biomassa durante o Ensaio 4, valor 29% menor em relação ao Ensaio 3. A quantidade de biomassa foi reduzida, pois foi constatado que no Ensaio 3 houve uma produção excessiva de gás, além da capacidade de consumo do motor.

Figura 30 – Quantidade total de biomassa consumida em função do tempo no Ensaio 3 (a) e no Ensaio 4 (b).



Nos ensaios 3 e 4 não houve gerada potência no gerador.

De maneira geral, pode-se constatar que há certa linearidade no consumo de madeira, possibilitando assim, fazer estimativas da quantidade de biomassa necessária para se realizar ensaios baseado na duração desejada.

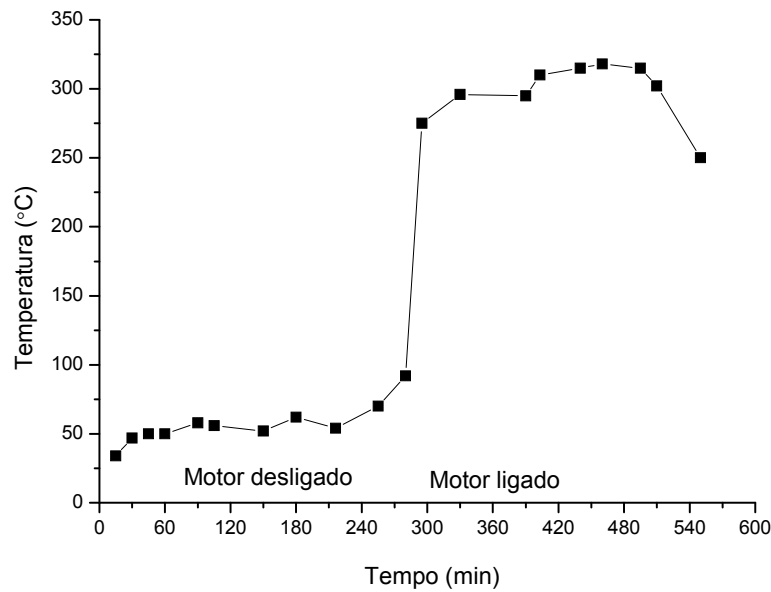
5.2 TEMPERATURAS DE OPERAÇÃO

Um dos parâmetros mais importantes na gaseificação é a temperatura, esta determina as reações que são favorecidas no sistema, a velocidade das reações e ainda fornecem indicativos sobre o funcionamento correto do mesmo.

A temperatura do nível tem como exclusiva função indicar o momento de se realizar as recargas, então sua variação ao longo do ensaio não será discutida.

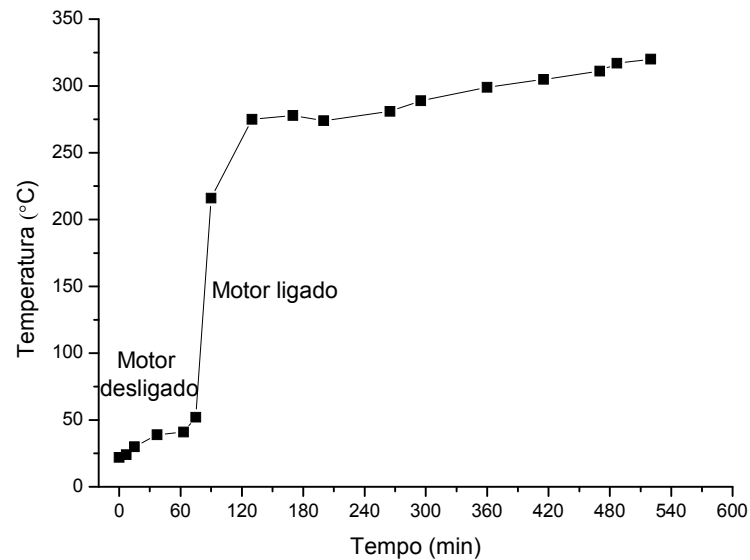
A temperatura do agente oxidante insuflado, aqui chamado de ar de entrada, é de grande importância, pois ao entrar no sistema em altas temperaturas, ocasiona um aumento geral na temperatura, fato que, influencia diretamente nas reações químicas do processo, inclusive nas que envolvem o craqueamento do alcatrão. Caso a temperatura do ar de entrada esteja baixa, parte da energia que seria utilizada nas reações de craqueamento é utilizada para aquecer o ar, reduzindo a eficiência do processo. A Figura 31 mostra a variação da temperatura do ar de entrada no Ensaio 1.

Figura 31 – Variação da temperatura do ar de entrada no Ensaio 1



Pode-se observar na Figura 31 que a temperatura se manteve num patamar baixo até o momento em que o motor foi ligado, isso se deve ao fato do gás quente produzido somente passar pelo primeiro trocador de calor no qual troca calor com o ar de admissão quando o mesmo é consumido pelo motor. Considerando o fato da temperatura dentro do gaseificador influenciar a produção de alcatrão e a mesma depender da temperatura do ar de entrada, que por sua vez depende do motor estar em funcionamento para ser aquecido, há um ponto a ser melhorado no projeto do gaseificador, já que para alcançar sua temperatura ideal de funcionamento o mesmo tem de consumir gás produzido em baixas temperaturas, e conseqüentemente, com maior concentração de alcatrão.

A Figura 32 mostra a variação da temperatura do ar de entrada no Ensaio 2.

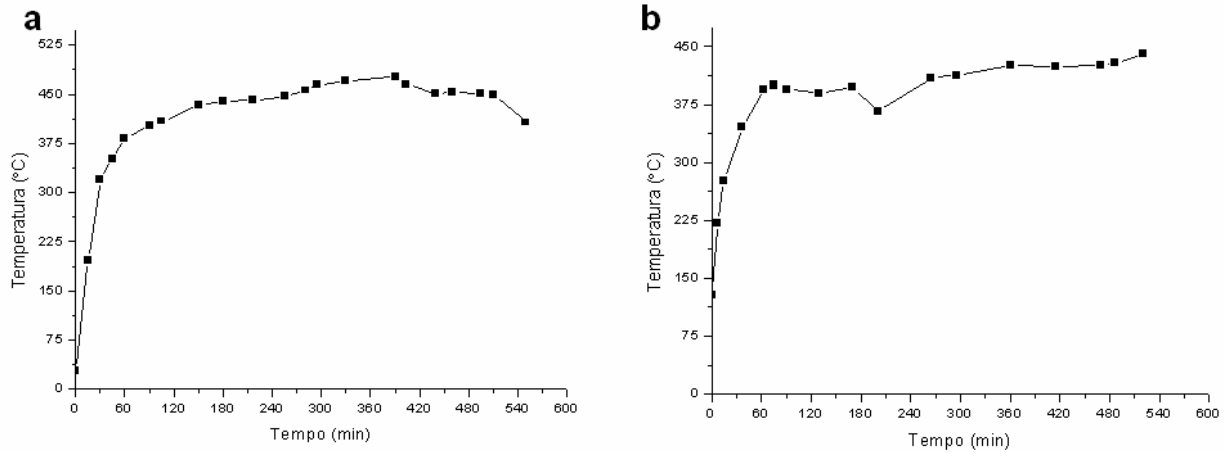
Figura 32 – Variação da temperatura do ar de entrada no Ensaio 2.

No Ensaio 2, a temperatura aumentou somente quando o motor foi ligado, assim como no Ensaio 1.

Nos ensaios 3 e 4 a temperatura do ar de entrada, assim como nos ensaios 1 e 2, somente subiu quando o motor foi ligado.

A temperatura do gás produzido ao deixar o gaseificador é importante, pois ela fornece indicativos sobre o processo de gaseificação, evidenciando se o mesmo está ocorrendo corretamente. O gás produzido é o gás que vai aquecer o ar de admissão através de um trocador de calor, portanto a temperatura do ar de admissão nunca será maior que a do gás de saída, responsável pela energia que o aquece. Pequenas oscilações na temperatura do gás de saída podem ser causadas por diferenças no volume de ar insuflado no gaseificador, assim como diferenças na carga aplicada ao grupo gerador. A Figura 33 mostra a evolução da temperatura do gás de saída com o tempo, em ambos os ensaios.

Figura 33 – Variação da temperatura do gás produzido ao longo do: a) Ensaio 1 b) Ensaio 2.

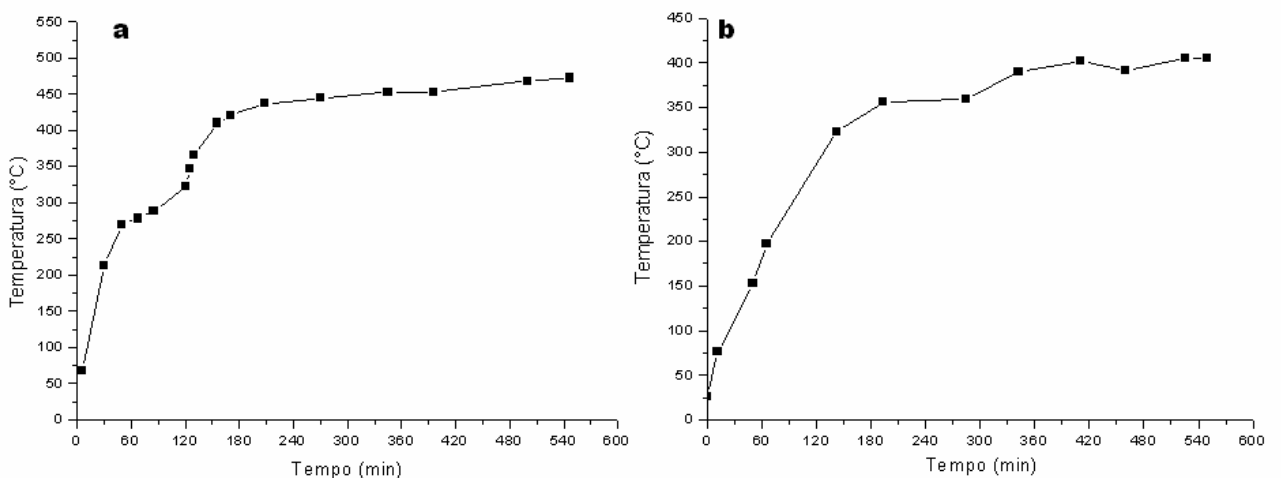


Na Figura 33a podemos constatar que para o Ensaio 1, a temperatura com que o gás produzido deixa o gaseificador sobe rapidamente ao patamar no qual se mantém ao longo de todo o ensaio.

No Ensaio 2, como é mostrado na Figura 33b, a temperatura varia de maneira semelhante o Ensaio 1. A temperatura atinge o patamar onde se mantém ainda mais rapidamente, isso se deve ao fato do Ensaio 2 ter sido realizado no dia seguinte ao Ensaio 1.

A Figura 34a mostra a variação da temperatura com que o gás produzido deixa o gaseificador no Ensaio 3.

Figura 34 – Variação da temperatura do gás produzido ao longo do: a) Ensaio 3 b) Ensaio 4



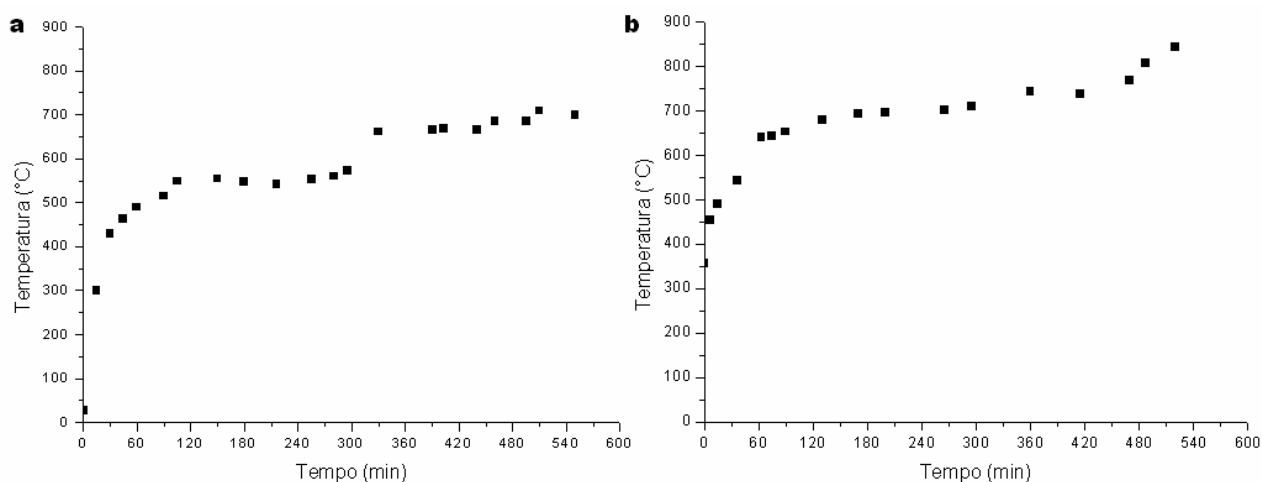
No Ensaio 3 houve um entupimento no sistema de descarga das cinzas e por isso a temperatura sobe rapidamente até um patamar e então só sobe novamente quando o desentupimento é realizado.

Na Figura 34b é mostrada a variação da temperatura com que o gás produzido deixa o gaseificador durante o Ensaio 4.

No Ensaio 4 a temperatura atingiu, em cerca de 3 horas, um patamar no qual permaneceu até o final do ensaio.

A temperatura da grelha é a temperatura do local onde o gás passa antes de deixar o gaseificador, esta temperatura tem de ser alta para possibilitar o craqueamento do alcatrão. Como pode se ver na Figura 35a, no Ensaio 1, a temperatura da grelha se eleva rapidamente até cerca de 450°C e vai aumentando gradualmente. A partida do motor contribui diretamente para o aquecimento da grelha, já que ao ligar o motor o ar de admissão é aquecido rapidamente.

Figura 35 – Variação da temperatura da grelha: a) Ensaio 1 b) Ensaio 2.



No Ensaio 2 (Figura 35b), a temperatura da grelha já é de 357°C no início do ensaio, visto que o Ensaio 2 ocorreu no dia seguinte ao Ensaio 1. A temperatura atinge o máximo de 844°C, superior ao atingido no Ensaio 1. A temperatura continuava a subir quando o ensaio foi encerrado. Esse valor elevado se deve ao fato do gaseificador já estar quente quando o ensaio começou, o que deixou o processo de estabilização do gaseificador mais rápido. A ligação do motor se deu com 75 minutos, enquanto que no Ensaio 1 foram necessários 280 minutos para a temperatura atingir um nível satisfatório para a ligação do motor. Isso comprova que o sistema retoma sua operação em nível satisfatório rapidamente.

Nos ensaios 3 e 4 a variação na temperatura da grelha é similar aos ensaios 1 e 2.

5.3 COMPOSIÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE

A composição do gás produzido foi determinada apenas em um ensaio, com 1 estágio de gaseificação, realizado em 2011.

As análises foram realizadas nos seguintes pontos: antes do filtro de mangas, antes do gasômetro, na chama piloto e após o gasômetro. A seguir são mostradas as composições do gás depois do gasômetro, que é o gás que é enviado ao motor, e do gás liberado no escapamento do motor, que serve de indicativo da eficiência do motor ao queimar o gás utilizado. A Tabela 5 mostra os valores em % de cada componente do gás produzido depois do gasômetro.

Tabela 5 – Composição do gás produzido depois do gasômetro, após estabilização do gaseificador.

Elemento	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	CH ₄
%	16,9	<0,1	50,6	19,8	10,6	2,1

A Tabela 6 mostra os valores em % de cada componente do gás resultante da combustão do gás produzido no motor.

Tabela 6 – Composição do gás resultante da combustão do gás produzido no motor.

Elemento	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	CH ₄
%	0,1	0,2	79,0	1,8	18,9	<0,1

Foi feita apenas uma medida da composição do gás, devido ao fato de a biomassa utilizada ser a mesma, portanto não haveria grandes mudanças na composição.

A partir da composição do gás após o gasômetro é possível calcular o poder calorífico do gás.

Empiricamente, expressões que consideram a composição do combustível, como a fórmula de Dulong nos permite determinar a potência calorífica de um combustível, baseada nas proporções em peso de carbono total, hidrogênio

útil e enxofre, o que nos leva a um valor aproximado (ROVARIS; GERHARDT; FERNANDES, 2008). O Poder Calorífico do gás foi determinado com a composição obtida após o gasômetro (Tabela 8), utilizando-se, então, a Fórmula de Dulong:

$$PCS = 3050.CO + 3070.H_2 + 9500.CH_4 + 13950.C_2H_2 + 15000.C_2H_4$$

$$PCI = 3050.CO + 2580.H_2 + 8530.CH_4 + 13500.C_2H_2 + 14050.C_2H_4$$

Em que:

PCS = Poder calorífico superior (kcal/Nm³)

PCI = Poder calorífico inferior (kcal/Nm³)

CO = Teor de CO (Nm³ CO/Nm³ combustível)

H₂ = Teor de H₂ (Nm³ H₂/Nm³ combustível)

CH₄ = Teor de CH₄ (Nm³ CH₄/Nm³ combustível)

C₂H₂ = Teor de C₂H₂ (Nm³ C₂H₂ /Nm³ combustível)

C₂H₄ = Teor de C₂H₄ (Nm³ C₂H₄ /Nm³ combustível)

$$PCS = 1411 \text{ kcal/Nm}^3 \text{ ou } 5,91 \text{ MJ/Nm}^3$$

$$PCI = 1309 \text{ kcal/Nm}^3 \text{ ou } 5,48 \text{ MJ/Nm}^3$$

Para o gás produzido C₂H₄ = C₂H₂ = 0. Nitrogênio e dióxido de carbono são inertes e o oxigênio não entra na equação.

O poder calorífico do gás produzido caracteriza um gás de médio poder calorífico.

5.4 RELAÇÃO AR/COMBUSTÍVEL

O fator de ar corresponde à relação ar/combustível utilizada dividida pela relação ar/combustível para realizar a combustão completa.

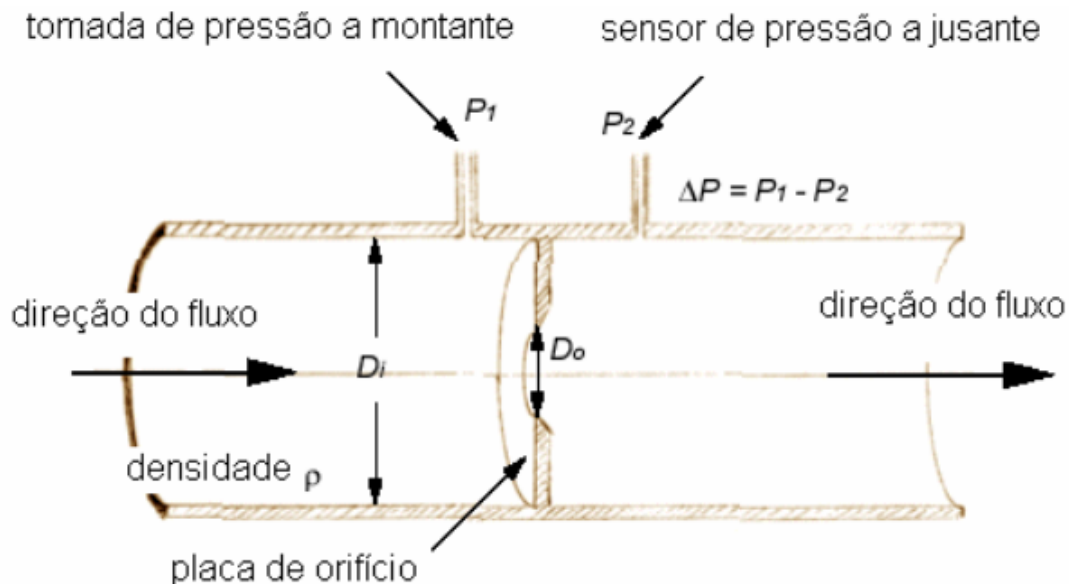
Segundo Wander, Altafini e Barreto (2004), valores típicos para a relação ar – combustível real, em unidades pequenas de gaseificação de madeira com altas perdas de calor – estão em torno de 2 e 2,4 kg.ar/kg.biomassa.

O dispositivo de medição de vazão consiste de placas de orifício. Tais sistemas são muito utilizados pela sua simplicidade e permitir a determinação da vazão através da equação de Bernoulli, levando em conta o diâmetro do tubo, e

das placas de orifício utilizadas, além do C_f , que é a relação entre o diâmetro do orifício e o diâmetro do tubo. A placa de orifício usada no tubo do primeiro estágio tem 3,1cm de diâmetro, para o segundo estágio 3,02cm de diâmetro e os tubo tem 5cm de diâmetro. O Valor de C_f é de 0,62 para o primeiro estágio e de 0,604 para o segundo estágio.

A placa de orifício causa um resistência ao fluxo de ar, gerando assim uma diferença de pressão, como indica a Figura 36. Para o cálculo foi utilizado o site do Efunda, onde há uma página onde é possível calcular vazões de um fluido passando por um orifício. A entrada de dados é mostrada na Figura 37.

Figura 36 – Representação do método utilizado para calcular a vazão de ar insuflado no gaseificador.



(EFUNDA, 2012)

Figura 37 – Entrada de dados para o cálculo da vazão de ar insuflado no gaseificador.

Pipe (inlet) diameter upstream of orifice, D_i :	5	cm ▾
Orifice diameter (less than the inlet diameter), D_o :	3.02	cm ▾
Pressure difference across the orifice, Δp :	0.78740	inH2O ▾
Fluid density, ρ :	1.0867	kg/m ³ ▾
Flow Coefficient, C_f :	0.604	

(EFUNDA, 2012)

No Ensaio 1, a quantidade de ar insuflado foi variada em 3 momentos, no início, foi insuflada uma quantidade de 80 kg de ar/h. Esta quantidade foi elevada devido ao fato de se querer aquecer o gaseificador rapidamente e também ao fato do ar insuflado estar relativamente frio, e portanto, mais denso.

Após o motor ser ligado, o gaseificador funcionou com uma taxa de alimentação de ar de 78 Kg de ar/h por cerca de 110 minutos, pois queria se atingir um patamar ainda mais elevado de temperatura. Ao se insuflar ar a 300°C no gaseificador se reduz a densidade do ar em aproximadamente 50%. O problema de alimentar o gaseificador com essa taxa e com o gás a 300°C, é que o consumo de biomassa é muito alto em relação ao que vinha sendo consumido, já que manteve uma taxa de alimentação de ar quase tão alta quanto a que vinha sendo aplicada anteriormente, porém com o gás quente, o que acelera muito as reações e conseqüentemente o consumo de biomassa. Durante esse período de aproximadamente 90 minutos o gaseificador consumiu 118kg de biomassa, o que corresponde a uma média de 65kg de biomassa/h. A média do Ensaio 1 foi de 36kg de biomassa/h.

Após esse período onde o consumo de biomassa foi elevado, a alimentação com ar foi reduzida para 59kg de ar/h. Essa taxa permaneceu até o final do ensaio.

Pôde-se observar que em todas as taxas de alimentação de ar aplicadas no Ensaio 1, houve um excesso de gás produzido em relação à quantidade que o motor era capaz de consumir então para o Ensaio 2 a proposta foi reduzir ainda mais a taxa de alimentação com ar.

No Ensaio 2 foi aplicada um taxa de alimentação de ar de 71kg de ar/h até o momento em que as temperaturas estava satisfatoriamente altas para que o motor fosse ligado.

Após o motor ser ligado, a taxa de alimentação de ar foi reduzida a 47kg de ar/h durante o restante do ensaio. A média do consumo de biomassa no Ensaio 2 foi de 43kg de biomassa/h. Esta taxa é maior do que a obtida no Ensaio 1 devido ao fato do gaseificador já estar aquecido no momento em que se iniciou o ensaio.

No Ensaio 3 a quantidade de ar insuflada foi de 63kg de ar/h até que se constatou o entupimento do sistema de descarga de cinzas, então a quantidade de ar insuflada foi reduzida para 40kg de ar/h até que a origem do entupimento fosse

encontrada. O gaseificador ficou desligado por alguns minutos para que o desentupimento fosse realizado e então a quantidade de ar insuflada foi ajustada novamente para 63kg de ar/h até que o gaseificador voltasse ao seu funcionamento correto. Após a estabilização do gaseificador a quantidade de ar insuflada foi reduzida para 45kg de ar/h e permaneceu assim até o final do ensaio.

No Ensaio 4 a quantidade de ar insuflada foi inicialmente de 31kg de ar/h e depois ajudada para 51kg de ar/h, após ajuste a quantidade de ar foi diminuindo gradualmente, devido à diminuição da densidade do ar, até 44kg de ar/h.

A relação ar combustível para os ensaios 1, 2, 3 e 4 estão expressos na Tabela 7.

Tabela 7 – Relação A/C nos ensaios 1, 2, 3 e 4.

Ensaio	Relação A/C
Ensaio 1 antes de ligar o motor.	2,8
Ensaio 1 Após ligar o motor com alimentação de ar elevada.	1,5
Ensaio 1 final.	1,5
Ensaio 1 média.	2,0
Ensaio 2 até ligar o motor.	1,0
Ensaio 2 após ligar o motor.	1,3
Ensaio 2 média.	1,2
Ensaio 3 até ligar o motor	1,8
Ensaio 3 após ligar o motor	1,3
Ensaio 3 média	1,4
Ensaio 4 até ligar o motor	2,9
Ensaio 4 após ligar o motor	1,59
Ensaio 4 média	1,86

No Ensaio 2, até o motor ser ligado, a relação A/C foi muito baixa, isso se deve ao fato de parte da biomassa restante do Ensaio 1 foi consumida durante a noite, conseqüentemente no início do Ensaio 2 o gaseificador estava parcialmente vazio.

No Ensaio 2, mesmo com a redução na relação A/C a quantidade de gás produzida ainda foi superior a quantidade de gás que o motor era capaz de consumir.

Nos ensaios 3 e 4 a quantidade de ar insuflada foi reduzida, pois o motor não foi capaz de consumir todo o gás produzido, no entanto a relação A/C se manteve pois a redução na quantidade de ar insuflada também implica na redução do consumo de biomassa.

5.5 FATOR DE AR

O processo de gaseificação nada mais é que um processo de combustão parcial, no qual somente parte dos constituintes do combustível sofre oxidação total.

Qualquer combustível requer, de acordo com sua composição, uma quantidade específica de oxigênio para poder, teoricamente, reagir completamente. Na gaseificação a quantidade de oxigênio fornecida é suficiente apenas para uma combustão incompleta.

Fatores de ar empregados na gaseificação estão usualmente entre 0,2 e 0,6, o que equivale a uma variação de 40 a 80% da falta de ar para um processo de combustão (SÁNCHEZ, 2009).

O fator de ar é definido como:

$$FA = Var/VA$$

Onde:

Var: volume de ar empregado na gaseificação em relação ao consumo de combustível (kg ar/kg combustível)

Va: volume de ar estequiométrico necessário para a combustão completa (kg ar/kg combustível)

Para se realizar o cálculo de Va é necessário usar a composição elementar da madeira de eucalipto. Essa é: C=49% H=5,87% O=43,97% N=0,3% Cinzas=0,3%. É necessário considerar a umidade da biomassa. Nos ensaios 1, 2, 3

e 4 foram utilizados 6 lotes de biomassa com umidades distintas, assim como mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Umidade dos lotes de madeira de eucalipto utilizados.

Lote	Umidade (%)	Ensaio no qual foi utilizado
1	19,6 ± 2,7	1
2	22,9 ± 0,9	2
3	24,3 ± 6,8	2
4	30,1 ± 4,6	2
5	13,4 ± 1,2	3
6	15,9 ± 2,2	4

A Tabela 9 mostra de cada um dos lotes, a massa total de biomassa, sua massa total sem água e também a quantidade de cada um dos componentes de sua composição elementar.

Tabela 9 – Massa total de biomassa, massa total sem água e quantidade de cada um dos componentes de sua composição elementar, para cada um dos lotes de biomassa.

	Lote 1	Nº kmol	Lote 2	Nº kmol	Lote 3	Nº kmol
Massa total (kg)	332,67	-	212,82	-	50,52	-
Massa total sem água (kg)	268,46	-	164,17	-	38,27	-
Água (kg)	65,30	3,57	48,65	2,70	12,25	0,68
C (kg)	131,01	10,96	80,44	6,70	18,75	1,56
H (kg)	15,69	15,76	9,64	9,64	2,25	2,25
O (kg)	117,56	7,38	72,19	4,51	16,83	1,05
N (kg)	0,80	0,06	0,49	0,04	0,11	0,01
Cinzas (kg)	0,80	-	0,49	-	0,11	-
	Lote 4	Nº kmol	Lote 5	Nº kmol	Lote 6	Nº kmol
Massa total (kg)	110,74	-	307,73	-	228,11	-
Massa total sem água (kg)	77,41	-	266,42	-	191,91	-
Água (kg)	33,32	1,85	41,31	2,29	36,19	2,01
C (kg)	37,93	3,16	130,54	10,88	94,04	7,84
H (kg)	4,54	4,54	15,64	15,76	11,27	9,64
O (kg)	34,04	2,13	117,14	7,32	84,38	5,27
N (kg)	0,23	0,02	0,80	0,06	0,58	0,04
Cinzas (kg)	0,23	-	0,80	-	0,58	-

A partir da equação estequiométrica de combustão completa e dos dados apresentados na Tabela 8, é possível a quantidade necessária de oxigênio necessária para a combustão completa se realizar e a quantidade de ar necessária para tal. Combinado com os valores da quantidade de ar insuflada é possível calcular o Fator de ar para cada um dos lotes. Estes valores estão expressos na Tabela 10.

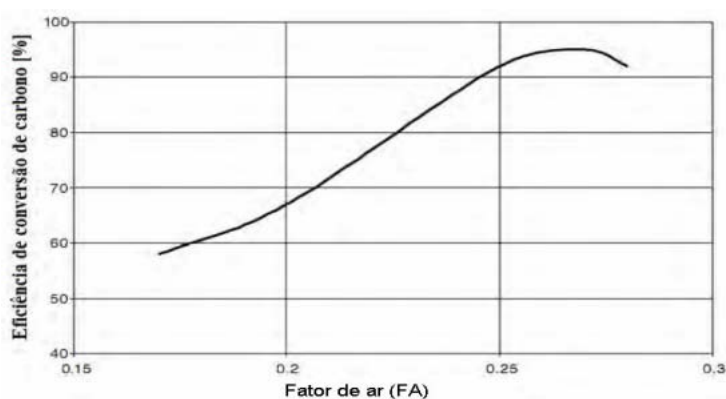
Tabela 10 – Balanço de O, Massa de ar necessária para combustão completa, massa de ar insuflada e Fator de ar.

	Lote 1	Lote 2	Lote 3	Lote 4	Lote 5	Lote 6
Balanço de O (kmol)	15,15	9,27	2,16	4,37	15,10	10,02
Massa de ar necessária (kg)	2080,2	1272,0	296,5	599,9	2072,6	1375,2
Massa de ar insuflada (kg)	686,5	202,7	75,4	173,8	430,93	423,95
Fator de ar	0,33	0,16	0,25	0,29	0,21	0,31

O Fator de ar obtido para cada um dos lotes foi aceitável, exceto no lote 2, onde faltou ar para o processo de gaseificação, porém este problema foi solucionado com o início do lote 3. O FA médio no Ensaio 2 foi de 0,21.

A qualidade do gás obtido de um gaseificador depende fortemente do FA, devendo ser significativamente menor que 1,0 para assegurar que não ocorra combustão completa. A Figura 38 justifica o interesse em se determinar o FA.

Figura 38 – Eficiência na conversão de carbono em função do fator de ar

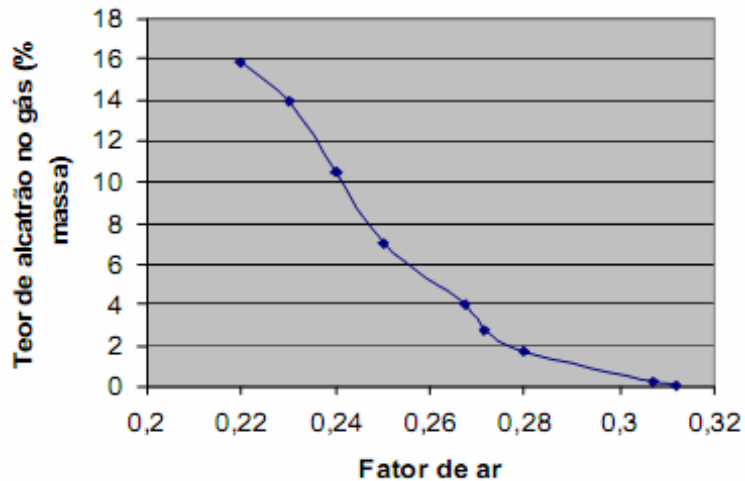


(BASU, 2006)

Levando em consideração a produção de alcatrão, o FA deve estar, preferencialmente, na faixa entre 0,3 e 0,4. VAN DER ENDEN e LORA, mostram a

influência do FA na produção de alcatrão, na temperatura do leito e na temperatura de saída do gás. A Figura 39 mostra a relação entre a quantidade de alcatrão e o Fator de ar.

Figura 39 – Influência da variação do fator de ar no teor de alcatrão contido no gás.

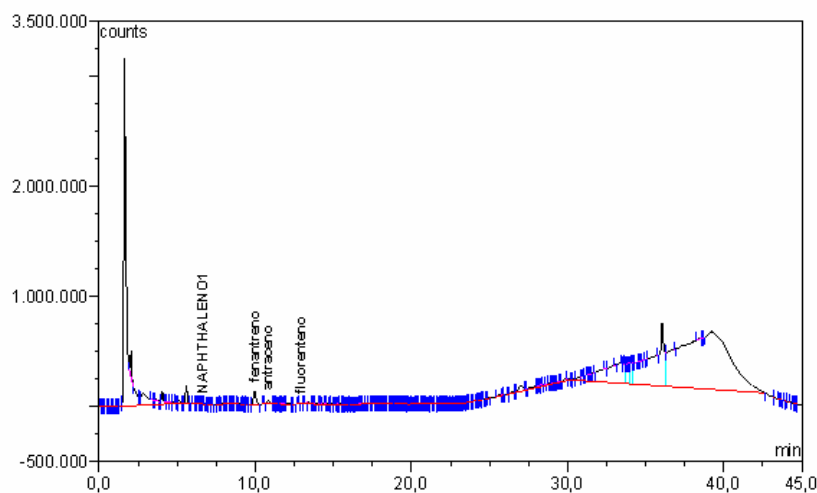


(VAN DER ENDEN E LORA, 2004)

5.6 ANÁLISES DO ALCATRÃO, MATERIAL PARTICULADO E DOS GASES DE ESCAPE

Na amostra de gás que foi borbulhado em frasco contendo isopropanol, foram encontrados os seguintes HPAs (hidrocarbonetos poliaromáticos): naftaleno, fluoreno, e antraceno. A figura 40 mostra o cromatograma obtido da amostra borbulhada.

Figura 40 – Cromatograma obtido da amostra de alcatrão borbulhada em frasco com isopropanol.



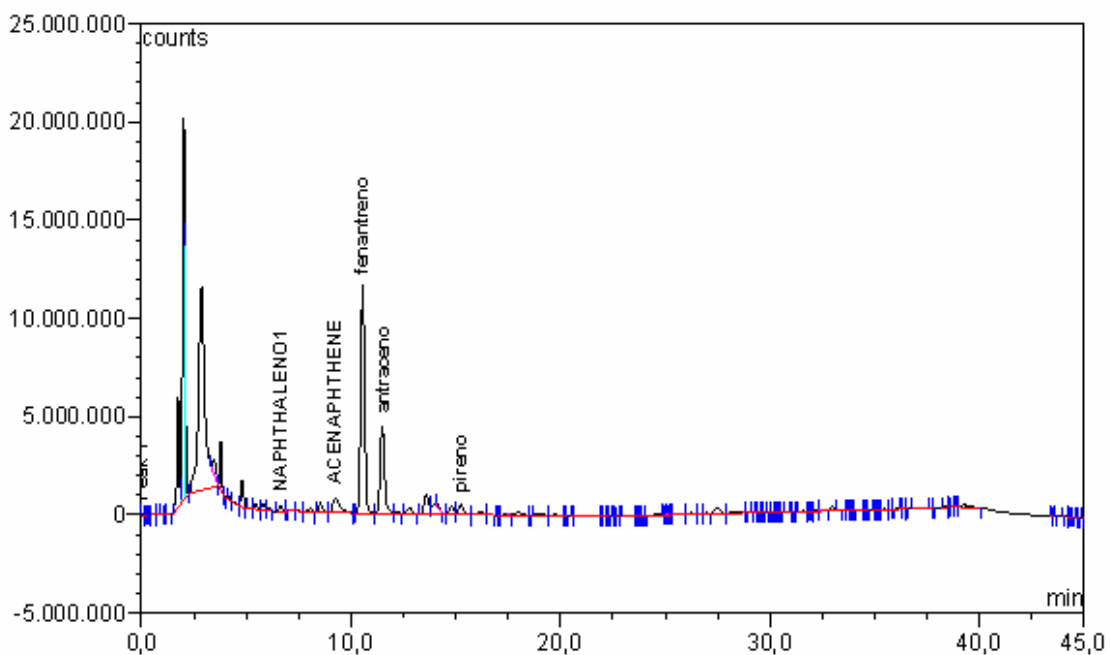
Tais compostos, originados da queima incompleta de materiais carbonáceos, são também encontrados nas emissões de motores veiculares à gasolina e diesel/biodiesel.

A concentração dos compostos presentes na amostra em que o gás foi borbulhado foi de $1,30 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$.

Tal concentração é abaixo da faixa de concentração aceitável para motores de combustão interna, que é de $50\text{-}100\text{mg}/\text{Nm}^3$ de alcatrão.

Na amostragem dos gases de escape, foram encontrados os mesmos HPAs da amostra borbulhada e mais acenaftaleno e acenafteno. A figura 41 mostra o cromatograma obtido da amostra dos gases de escape.

Figura 41 – Cromatograma obtido da amostra dos gases de escape



A concentração dos compostos presentes na amostra dos gases de escape foi de $96,77 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$.

Nos gases de escape a concentração de HPAs encontrada foi maior do que a concentração encontrada no gás borbulhado.

Tal fato sugere três justificativas: a primeira, o método utilizado para reter os HPAs em isopropanol não foi satisfatório; a segunda, houve combustão incompleta do gás produzido no motor, ocasionando um aumento na concentração

dos HPAs e a terceira, e mais provável, os HPAs detectados são resultados da queima do óleo do motor.

No gás que é enviado ao motor, a quantidade de material particulado foi de 0,16 mg/Nm³. O limite aceitável de material particulado para motores de combustão interna varia entre 10 e 50 mg/Nm³, portanto o conjunto do gaseificador é capaz de produzir um gás com teor de material particulado aceitável. (MILNE E EVANS, 1998)

5.7 GERAÇÃO DE ENERGIA

No Ensaio 1, o gaseificador consumiu 18,3kwh de energia elétrica e produziu 85,5 kwh, totalizando uma geração de 67,2 kwh. O grupo gerador funcionou por cerca de 4,5 horas.

No Ensaio 2, o gaseificador consumiu 17,3kwh de energia elétrica e produziu 140,9 kwh, totalizando uma geração de 123,6 kwh. O grupo gerador funcionou por cerca de 7,5 horas.

Nos ensaios 1 e 2 a carga aplicada ao gerador foi de 17,6kw.

Nos ensaios 3 e 4 não foi aplicada nenhuma carga ao gerador.

5.8 MODIFICAÇÕES OPERACIONAIS

FIGUEIREDO (2012), utilizando o mesmo equipamento realizou diversos ensaios com as mangas do filtro de mangas na gramatura de 550g/m². Esta gramatura, segundo o fabricante é muito pesada para o filtro utilizado, onde a limpeza do mesmo ocorre através de sacudimento mecânico. Então o fabricante forneceu mangas com a gramatura de 450g/cm², as quais foram utilizadas nos Ensaios aqui apresentados. Um dos problemas apontados por FIGUEIREDO era o fato da água se condensar no filtro de mangas, ocasionando seu entupimento. Este problema foi resolvido ao se fechar a válvula que fornece água para o trocador de calor à água. Este estava reduzindo a temperatura do gás de forma exagerada e favorecendo a condensação da umidade presente no gás no filtro de mangas. Após esta pequena mudança operacional a umidade passou a se condensar na trap, resultando numa vazão de 3,5L/h de água removida do gás pela trap. Também foi adicionada em cima do gasômetro, uma barra de concreto, cujo objetivo foi

aumentar a pressão com que o gás é enviado ao motor. A Figura 42 mostra o gasômetro com a barra.

Figura 42 – Gasômetro com barra de concreto



5.9 ABERTURA DO MOTOR APÓS 46H DE FUNCIONAMENTO

A abertura do motor ocorreu após 46 horas de funcionamento. Com a abertura, pôde-se constatar que apesar do FA obtido ser baixo e teoricamente produzir maior quantidade de alcatrão, o motor estava em perfeitas condições, não sofrendo nenhum tipo de avaria devido ao alcatrão e material particulado proveniente do gás, isso se deve a temperatura na qual o gaseificador estava sendo operado.

As Figuras 43 e 44 mostram componentes do motor após as 46 horas de funcionamento.

Figura 43 – Cabeçote (a) e cilindro (b) do motor após 46 horas de funcionamento

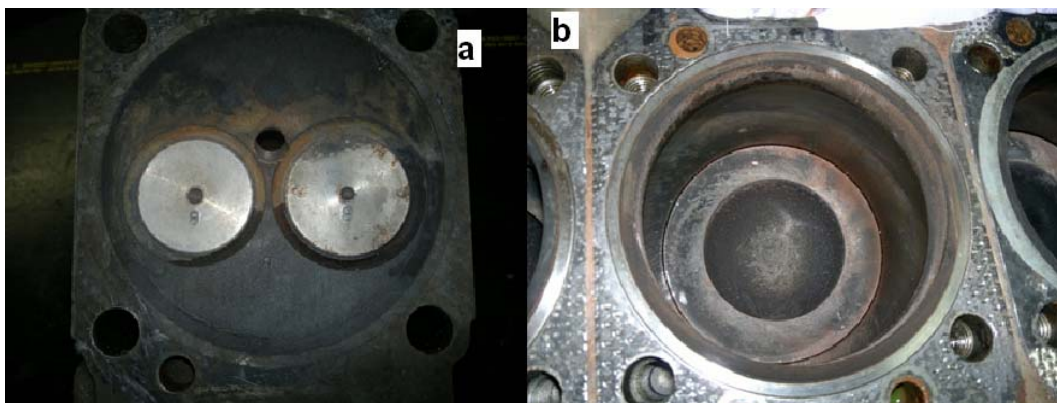


Figura 44 – Válvulas de admissão e escape (a) e haste da válvula (b) do motor após 46 horas de funcionamento



6 CONCLUSÕES

- 1 –Nos ensaios 1 e 2 a unidade piloto foi capaz de produzir 16,5 kwh de energia elétrica enquanto consumiu 52kg de biomassa por hora.
- 2 –A composição do gás produzido foi a seguinte: $H_2 = 16,9\%$, $O_2 < 0,1\%$, $N_2 = 50,6\%$, $CO = 19,8\%$, $CO_2 = 10,6\%$, $CH_4 = 2,1$. Essa composição é de um gás de médio poder calorífico. O PCS é de $5,91 \text{ MJ/Nm}^3$.
- 3 –O FA durante o Ensaio 1 foi de 0,33, durante o Ensaio 2 foi, em média, de 0,21, durante o Ensaio 3 foi de 0,21 e no Ensaio 4 de 0,31.
- 4 –O motor, após 46 horas de funcionamento se manteve em perfeitas condições de funcionamento, não apresentando contaminação por alcatrão ou material particulado.
- 5 –O Teor de HPAs no gás foi de $1,30 \mu\text{g/Nm}^3$.
- 6 –O teor de material particulado no gás enviado ao motor foi de $0,16\text{mg/Nm}^3$, valor abaixo dos limites aceitáveis.
- 7 –A gaseificação é um processo que pode e deve ser mais explorado, pois além de converter combustíveis sólidos em gases, o faz com maior eficiência na conversão de carbono, possui uma maior versatilidade de aplicações e uma maior variedade de produto; além do processo gerar menos poluentes.

7 RECOMENDAÇÕES

Na unidade utilizada, a alimentação foi feita manualmente, transportando-se a lenha em recipientes de plástico. Um método mais mecanizado de alimentação facilitaria a operação do equipamento (sensor automático de carga, esteira transportadora para a lenha, etc.), reduzindo o risco de acidente ao realizar as alimentações e também a inalação de gases tóxicos, como o monóxido de carbono, presentes nos gases liberados durante o processo de alimentação.

O gasômetro da unidade tem um pequeno volume (2,6m³), o que acarreta na necessidade de um controle permanente da válvula que envia gás para o gasômetro. Instalando um gasômetro maior, o sistema se tornaria menos vulnerável a mudanças bruscas na produção de gás e também a operação seria facilitada. O controle da operação pode ser melhorado aumentando o tamanho do gasômetro, deixando o sistema menos vulnerável a mudanças bruscas na produção de gás e a adição.

O soprador instalado na unidade funciona sempre na mesma velocidade, o que dificulta o controle da quantidade de ar insuflada no sistema. A adição de um inversor de frequência ao soprador permitiria um maior controle da quantidade de ar insuflada e conseqüentemente da quantidade de gás produzido.

Uma modificação importante seria fazer o gás passar pelo trocador de calor que aquece o ar de admissão antes de ser queimado no flare. Essa modificação aceleraria o processo de aquecimento do gaseificador, fazendo o mesmo começar a produzir energia mais rapidamente. Outra vantagem dessa modificação seria que para aquecer o ar de admissão, não seria necessário ligar o motor, e conseqüentemente sujá-lo desnecessariamente, já que patamares maiores de temperatura só são obtidos quando o ar de admissão está quente.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, R. V. **Gaseificação de Biomassa: Uma Análise Teórica e Experimental.** (Tese) – Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal De Itajubá. Itajubá, MG, 2007.
- AZENHOFER, K., HEIM, T., SHULTHEISS, A., WEBER, W., **Eletrotécnica para escolas profissionais.** Tradução Walfredo Schmidt. São Paulo, Editora Mestre Jou, 1971, 130 p. Título original: Elektrofachkunde für Berufsschulen
- BASU, P. **Combustion and gasification in fluidized beds.** Boca Raton: CRC Taylor & Francis, Feb. 2006.
- BOMAN C., NORDIN A., BOSTRÖM D., ÖHMAN M. **Characterization of inorganic particulate matter from residential combustion of pelletized biomass fuels.** Energy Fuel 1:338–348, 2004.
- BUI, T., LOOF, R., BHATTACHARYA, S. C. **Multi-stage reactor for thermal gasification of wood.** Energy;19(4):397–404, 1994.
- CBA - Canadian Bioenergy Association., **Biomass sources for bioenergy use in Canada.** <<http://www.canbio.ca>>, 2004.
- CIFERNO, J.P., MARANO, J.J., **Benchmarking Biomass Gasification Technologies for Fuels, Chemicals and Hydrogen Production,** U.S. Department of Energy, National energy Technology Laboratory. 2002. Disponível em: <seca.doe.gov/technologies/coalpower/gasification/pubs/pdf/bmassgasfinal.pdf> Acesso em: set/2012
- CNI – Confederação Nacional da Indústria. **Matriz Energética: Cenários, Oportunidades e Desafios.** Brasília: CNI, 2007.
- DEVI, L., PTASINSKI, K. J., JANSSEN, **A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes.** Biomass and Bioenergy 24, 125-140, 2003.
- EFUNDA. **Orifice Flowmeter Calculator.** Disponível em: <http://www.efunda.com/formulae/fluids/calc_orifice_flowmeter.cfm > Acesso em: set/2012.
- FIGUEIREDO, F. L. **Avaliação de uma unidade autônoma de produção de energia elétrica composta por sistema de gaseificação concorrente e grupo gerador com capacidade de 50kVA.** (Dissertação) – Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento, Universidade Estadual de Londrina. Londrina, PR, 2012.
- FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, **Wood gas as engine fuel, Mechanical Wood Products Branch,** Forest Industries Division, 1986. ISBN 92-5-102436-7. Disponível em: <<ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/t0512e/t0512e00.pdf>> Acesso em: set/2012

FRANCO, C., PINTO, F., GULYUTLU, I., CABRITA, I. **The study of reactions influencing the biomass steam gasification process.** Fuel 82:835–842, 2003.

FOE – FRIENDS OF THE EARTH, **Briefing pyrolysis and gasification.** 2009. Disponível em: <http://www.foe.co.uk/resource/briefings/gasification_pyrolysis.pdf>, Acesso: set/2012.

HENRIQUES, R. M. **Potencial para geração de energia elétrica no Brasil com resíduos de biomassa através da gaseificação.** 2009. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Paris, França. 2010 Disponível em: <<http://www.iea.org/>> Acesso em set/2012.

JENKINS, B. M. **Fuel Properties for Biomass Materials.** In: International Symposium on Application and Management of Energy in Agriculture: The Role of Biomass Fuels. Delhi, 1990.

KINOSHITA, C.M., WANG Y., ZHOU, J., **Tar formation under different biomass gasification conditions.** Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 29 :169–181, 1994.

KRAUSE, G.G., **Avaliação da Tecnologia de Sistemas Integrados Gaseificação – Ciclo Combinado para geração termelétrica no Brasil** Dissertação de mestrado. PPE/ COPPE/ UFRJ. Rio de Janeiro, 1990

MARTÍNEZ, J. D. (2009), **Estudo Experimental do Conjunto Gaseificador de Biomassa em Reator Co-corrente com Duplo Estágio de Fornecimento de Ar e Motor de Combustão Interna**, Itajubá, 193p. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

MARTINS, V. A. **Secagem de madeira serrada.** Brasília, IBDF/DPq — LPF, 1988. 52 p. ilustr.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass (part 2): conversion technologies.** Bioresource Technology 83:47–54, 2002.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass (part 3): gasification technologies.** Bioresource Technology 83:55–63, 2002.

MILNE, T. A., EVANS, R. J. **Biomass gasification “tars”: their nature, formation and conversion.** Golden, CO, USA: NREL, report no. NREL/TP-570-25357; 1998.

MWM. Catálogo motor. Disponível em: <<http://www.nav-international.com.br/default.asp?su=3&pa=subSeries&idSubSerie=9>>. Acesso em: nov. 2011.

NARVÁEZ, I., ORÍO, A., AZNAR, M.P., CORELLA, J., **Biomass gasification with air in an atmospheric bubbling fluidized bed. Effect of six operational variables on the quality of produced raw gas.** Industrial and Engineering Chemistry Research 35, 2110–2120, 1996.

NEEFT, J. P.A., KNOEF, H. A. M., ONAJI, P. **Behaviour of tar in biomass gasification systems. Tar related problems and their solutions.** Novem Report No. 9919. Energy from Waste and Biomass (EWAB), The Netherlands, 1999.

QUAAK, P., KNOEF, H., STASSEN, H. **World Bank Technical paper No. 422,** Energy Series, Washington, D. C. World bank. 1999. Disponível em: <http://www-wds.worldbank.org/servlet/WDSContentServer/WDSP/IB/2000/07/08/000094946_99033105581764/Rendered/PDF/multi_page.pdf> Acesso: set/2012

RAGNAR, W. **Gasification of biomass: comparison of fixed bed and fluidized bed gasifier.** Biomass Bioenergy 18:489–497, 2000.

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

ROVARIS, L. A; GERHARDT, E; FERNANDES, T. G. **Análise da Influência do Dispositivo Ecoturb/Glp Sobre o Poder Calorífico do Gás Liquefeito de Petróleo.** Medições Térmicas. Porto Alegre: UFRS, 2008.

SÁNCHEZ, C. G. (Org.). **Tecnologia da Gaseificação de Biomassa.** Campinas, SP: Átomo, 2009.

TERMOQUIP – Energia alternativa LTDA. Campinas, 2009. Disponível em: <<http://www.termoquip.com.br>>. Acesso em: set. 2012.

VAN DER ENDEN, P. J., LORA, E. S. **Design approach for biomass fed fluidized bed gasifier using the simulation software CSFBA.** Biomass and Bioenergy 26, p. 281-287. 2004.

WANDER, P. R., ALTAFINI, C. R., BARRETO, R. M; **Assessment of a small sawdust gasification unit;** Biomass and Bioenergy; Vol. 27; pp. 467-476; 2004.

WEG. Catálogo geradores. Disponível em: < <http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Geral/Central-de-Downloads/Resultado-da-Busca?keyword=geradores&x=30&y=20> >. Acesso em: nov. 2011.

APÊNDICE

APÊNDICE A

FORMA DE OPERAÇÃO DO GASEIFICADOR

INTRODUÇÃO

Esta sequência de verificações tem como objetivo descrever os procedimentos a serem adotados para a partida e parada do gaseificador, sendo descritas as verificações iniciais, a carga inicial, acendimento com gaseificador frio, gaseificador quente, teste de qualidade do gás, parada de emergência, parada programada e observações.

É extremamente importante que todas as etapas sejam rigorosamente seguidas, para que se tenha um funcionamento pleno do equipamento e os riscos de acidentes sejam mínimos.

1 VERIFICAÇÕES INICIAIS

a) O painel deve estar energizado, ligando o disjuntor tripolar no quadro de cargas (Figura 1) e acionando as chaves 01 (Figura 2) e 02 do painel (Figura 3). (A chave 02 é um interruptor de segurança e deve ser usada somente em situação de emergência).

Figura 1 – Quadro de disjuntores



Obs.: No detalhe em vermelho o disjuntor geral do gaseificador.

Figura 2 – Quadro de comando do gaseificador



Obs.: No detalhe a chave 01 que liga/desliga o quadro.

Figura 3 – Quadro de comando do gaseificador



Obs.: No detalhe, a chave 02, que deve ser usada somente em caso de emergência.

b) O soprador de ar de gaseificação (Figura 4) deve estar desligado; caso esteja ligado, deve ser desligado acionando a botoeira “Liga/Desliga

Gaseificador”. (Figura 5) (verificar o sentido de rotação do soprador; este deve estar soprando ar para dentro do gaseificador).

Figura 4 – Soprador de ar: ventilador que injeta ar nos estágios de gaseificação



Figura 5 – Botoneira “Liga/Desliga Gaseificador” - tem a função de ligar/desligar o soprador de ar



c) As válvulas, de regulação manual, VB1 e VB2, devem estar totalmente fechadas (Figura 6). Essas válvulas dosam (manualmente) o ar que é

comprimido pelo soprador, em quantidades necessárias para a alimentação dos respectivos estágios de gaseificação: 1º e 2º estágios.

Figura 6 – Válvulas VB1 e VB2, de regulagem da quantidade de ar de entrada nos 2 estágios de gaseificação



d) A válvula da linha de gás deve **estar fechada** (Figuras 7 e 8). Esta válvula libera o gás, após passar pelo ciclone e pelo primeiro trocador de calor, pelo segundo trocador de calor, filtro de mangas, *trap* e gasômetro.

Figuras 7 e 8 –Válvulas de liberação do gás (na posição fechada e aberta respectivamente) para o gasômetro e posterior uso



e) A válvula do queimador piloto deve estar fechada (Figura 9). Esta válvula está situada antes da válvula das Figuras 7 e 8, de liberação do gás para uso. A válvula da Figura 9 libera o gás para verificação da sua qualidade, quando queimado no bocal do queimador piloto.

Figura 9 – Válvula de liberação do gás para o queimador da chama piloto



f) A válvula da chaminé de partida “Flare” deve estar aberta (Figura 10). No “Flare” é queimado o gás sem qualidade do início e fim da operação do gaseificador, bem como o gás residual que não é consumido totalmente em sua aplicação.

Figura 10 – Válvula do “Flare”



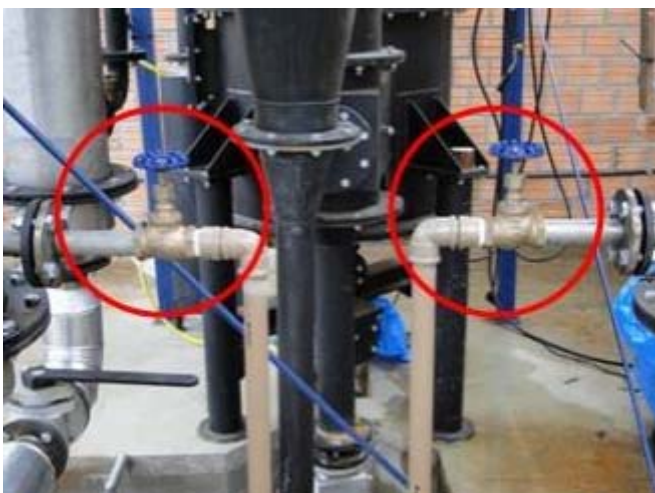
g) O registro de água do tanque de armazenamento deve estar aberto (Figura 11). Estando aberto, a água é liberada para a bomba, que a bombeia para os trocadores de calor, para o resfriamento da grelha, e para a torre de resfriamento. O registro sem o detalhe, quando aberto, libera água para completar o nível do tanque de armazenamento.

Figura 11 – Registro (detalhe) de liberação da água para trocadores de calor, grelha e torre de resfriamento e registro de abastecimento do tanque de armazenamento



h) Os registros de água dos trocadores de calor devem estar abertos (Figura 12). Esses trocadores de calor fazem o resfriamento do gás de síntese.

Figura 12 – Registro de água dos trocadores de calor



i) O registro de água de resfriamento da grelha deve estar aberto com a vazão regulada (Figura 13).

Figura 13 – Registro de água do resfriamento da grelha



j) O selo d'água (Figura 14) deve estar com o nível até o ladrão, caso não esteja, completar o nível abrindo o registro. A função do selo d'água é abafar a pressão do interior do gaseificador, caso esteja com pressão positiva, oriunda de eventuais explosões, devido ao excesso momentâneo da produção de gás.

Figura 14 – Registro de abastecimento de água do selo d'água



k) O registro geral do sistema de GLP (Figura 15) deve estar aberto (abrir até o final do curso e voltar $\frac{1}{4}$ de volta). O GLP garante a queima do gás de síntese residual não consumido, bem como o gás de má qualidade oriundo do início e fim de operação do gaseificador, não o liberando na atmosfera e minimizando os riscos de acidentes. Este registro libera também gás para a partida do motor do grupo gerador.

Figura 15 – Registro geral do botijão de GLP



l) Os disjuntores do sistema de ar comprimido e refrigeração (circulação da água) devem estar ligados (Figura 16).

Figura 16 – Disjuntores dos sistemas de ar comprimido e refrigeração



m) O ar comprimido deve estar isento de água (deve ser feita a purga diariamente) e regulado para uma pressão de 06 a 08 Kg/cm²; esta regulagem é feita no registro de ar comprimido e verificada pelo manômetro acoplado (Figura 17).

Figura 17 – Sistema de funcionamento e manutenção do ar comprimido



n) As válvulas do silo de carvão e do silo do ciclone devem estar abertas (Figura 18). A indicação na frente da válvula deve estar na vertical (orientada no sentido do fluxo), o que indica que a válvula está aberta.

Figura 18 – Válvulas do silo de carvão e do silo do ciclone, respectivamente



2 CARGA INICIAL

a) Alimentar com carvão vegetal graúdo e seco, de modo que fique somente o carvão vegetal sobre a grelha. Os finos de carvão (moinha) e pó não devem ser utilizados.

b) O gaseificador vazio deve ser carregado de carvão até cobrir os bicos de injeção de ar do 2º estágio, cerca de 150 mm acima dos bicos (aproximadamente 40 kg de carvão).

c) Sobrepor lenha (tamanho: menor dimensão 30 mm e maior dimensão 80 mm ou relação volume/área entre 0,5cm e 1,3cm) até o nível de abertura máxima do sino. Na Figura 19 e 20, são mostradas as cargas de carvão e lenha.

Figuras 19 e 20 – Processos de carga inicial de carvão (19) e lenha (20) respectivamente



d) Os comandos de abertura de tampa e abertura do sino estão localizados no painel de comando.

3 PROCEDIMENTO PARA ACENDER O GASEIFICADOR

Para este procedimento, o operador deve estar utilizando os equipamentos de proteção individual: óculos, luvas e máscara.

3.1 GASEIFICADOR FRIO

a) Ventilar o gaseificador durante 3 minutos com a válvula VB1 aberta (ΔP entre 4 a 5 cm na placa de orifício) e VB2 fechada (Figura 21). A ventilação é acionada apertando a botoeira “Liga/Desliga Gaseificador” no painel de comando (Figura 5).

Figura 21 – VB1 aberta e VB2 fechada



b) Após os 3 minutos de ventilação, desligar o soprador acionando a botoeira (Figura 5) e fechar a válvula VB1.

c) Acender a chama piloto da chaminé de partida “Flare” (Figura 22).

Figura 22 – Chama piloto da chaminé de partida “Flare”



d) Remover a tampa com visor para ter acesso aos bicos partida (Figura 23 e 24) (2º estágio).

Figuras 23 e 24 – Bocal de partida com a tampa (23) e sem a tampa (24), respectivamente



e) Acender o maçarico de GLP, (Figura 25) e orienta-lo para o bocal de partida, Figura 24.

Figura 25 – Maçarico



f) Manter a chama orientada para o leito de carvão até formar braseiro intenso no interior do gaseificador. Obs.: não ficar posicionado diretamente na frente do orifício.

g) Fechar o visor.

h) Ligar o soprador acionando a botoeira (Figura 5).

i) Acionar o vibrador, na botoeira “Liga/Desliga Vibrador” (Figura 26).

Figura 26 – Botoeira “Liga/Desliga Vibrador”



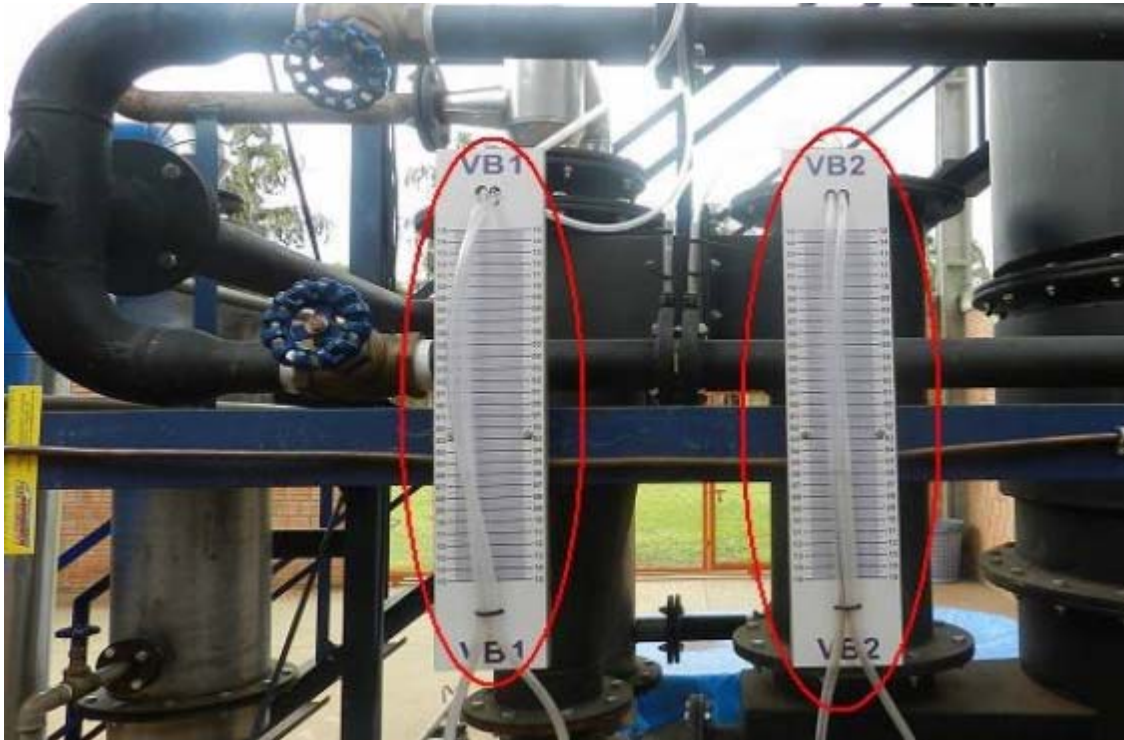
j) Acionar a grelha, na botoeira “Liga/Desliga Grelha”, no sentido horário e ajustar a rotação para 1 a 2 giros por hora (Figura 27).

Figura 27 – Acionamento e ajuste de rotação da grelha



k) Abrir a válvula VB2, de modo que o indicador de pressão da placa de orifício, referente à VB2, indique de 3 a 4 cm H₂O (Figura 28).

Figura 28 – Indicadores de pressão das placas de orifícios, referentes às placas VB1 e VB2



l) Estabilizado o 2° estágio, o que se verifica pela ignição e manutenção da chama estável no queimador de teste, deve-se iniciar a ventilação do 1° estágio, abrindo a válvula VB1 até que a pressão da placa de orifício esteja entre 3 e 4 cm H₂O.

m) Somente após a estabilização do 1° e 2° estágios, verificados através do teste da qualidade do gás (verificar item 5), o gás poderá ser desviado para o sistema de resfriamento e filtragem e, conseqüentemente, para o grupo gerador, abrindo a válvula da linha de gás (Figura 7 e 8).

3.2 GASEIFICADOR QUENTE

- a) Acender a chama piloto da chaminé de partida “Flare” (Figura 22).
- b) Ligar o soprador acionando a botoeira (Figura 5).
- c) Acionar o vibrador, na botoeira “Liga/Desliga Vibrador” (Figura 26).
- d) Acionar a grelha, na botoeira “Liga/Desliga Grelha”, no sentido horário, e ajustar a rotação para 1 a 2 giros por hora (Figura 27).

e) Abrir a válvula VB2, de modo que o indicador de pressão da placa de orifício, referente à VB2, indique de 3 a 4 cm H₂O (Figura 28).

f) Estabilizado o 2º estágio, iniciar a ventilação do 1º estágio, abrindo a válvula VB1 até que a pressão da placa de orifício esteja entre 3 e 4 cm H₂O.

g) Somente após a estabilização do 1º e 2º estágios, verificados através do teste da qualidade do gás (verificar item 4), o gás poderá ser desviado para o sistema de resfriamento e filtragem e, conseqüentemente, para o grupo gerador, abrindo a válvula da linha de gás (Figura 7 e 8).

4 TESTE DA QUALIDADE DO GÁS

Poucos minutos após a ignição, o leito de carvão estará na temperatura de produção de gás.

O queimador piloto (Figura 25) deve ser utilizado para testar se o gás está em condições de queima estável.

Quando a chama se mantiver estável, o gás está formado e em condições de ser desviado para o sistema de resfriamento e filtragem e, conseqüentemente, para o grupo gerador; este desvio é realizado abrindo a válvula da linha de gás (Figuras 7 e 8).

5 PROCEDIMENTO PARA PARADA DO GASEIFICADOR

5.1 PARADA PROGRAMADA

a) Fechar a válvula da linha de gás (Figuras 7 e 8).

b) Desligar o soprador, na botoeira “Liga/desliga Gaseificador” (Figura 5).

c) Fechar as válvulas VB1 e VB2 (Figura 21).

d) Interromper a rotação da grelha.

e) Desligar o vibrador

f) Apagar a chama de GLP, após queimar o restante do gás.

g) Desligar o disjuntor geral. h) Fechar a refrigeração da grelha somente após 30 minutos.

5.2 PARADA DE EMERGÊNCIA (FALTA DE ENERGIA OU SOBREPRESSÃO)

- a) Desligar todo o sistema pressionando a botoeira “emergency stop” (Figura 19), no quadro de comando.
- b) Fechar as válvulas VB1 e VB2 (Figura 22).
- c) Fechar a válvula da linha de gás (Figura 24).
- d) Apagar chama de GLP, após queimar o restante do gás.
- e) Desligar o disjuntor geral.

6 DESCARGAS DE CINZAS E FINOS

A descarga de cinzas e finos dos silos deve ser feita se necessária com o gaseificador desligado. Executando as operações descritas no item 6.1 – Parada programada.

As válvulas de sino do silo de carvão e do silo do ciclone (Figura 18) devem sempre estar abertas quando da partida e fechadas quando da descarga.