



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

FABRÍZIO LUIZ FIGUEIREDO

**AVALIAÇÃO DE UMA UNIDADE AUTÔNOMA DE
PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COMPOSTA POR
SISTEMA DE GASEIFICAÇÃO CONCORRENTE E GRUPO
GERADOR COM CAPACIDADE DE 50 KVA**

FABRÍZIO LUIZ FIGUEIREDO

**AVALIAÇÃO DE UMA UNIDADE AUTÔNOMA DE
PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COMPOSTA POR
SISTEMA DE GASEIFICAÇÃO CONCORRENTE E GRUPO
GERADOR COM CAPACIDADE DE 50 KVA**

Dissertação apresentada ao Centro de Tecnologia e Urbanismo (CTU) da Universidade Estadual de Londrina como requisito necessário para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Fernandes.

Londrina
2012

FABRÍZIO LUIZ FIGUEIREDO

**AVALIAÇÃO DE UMA UNIDADE AUTÔNOMA DE PRODUÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA COMPOSTA POR SISTEMA DE
GASEIFICAÇÃO CONCORRENTE E GRUPO GERADOR COM
CAPACIDADE DE 50 KVA**

Dissertação apresentada ao Centro de Tecnologia e Urbanismo (CTU) da Universidade Estadual de Londrina como requisito necessário para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento.

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Dr. Fernando Fernandes
Universidade Estadual de Londrina

Prof. Dr. Aron Lopes Petrucci
Universidade Estadual de Londrina

Prof. Dr. Marcelo Risso Errera
Universidade Federal do Paraná

Dr. Eng. Roberto Furini Filho
Consultor Sênior - Petrobras

Londrina, 29 de março de 2012.

Dedico este trabalho a mim, por meus esforços, à minha esposa, Helenara, e meus Pais, Nelson e Antônia.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, professor Fernando Fernandes, não só pela constante orientação neste trabalho, mas, sobretudo, pela sua amizade e dedicação no momento de corrigir e ensinar.

Ao professor Aron Lopes Petrucci, pelo empenho na implantação e operação do sistema de gaseificação.

Aos colegas que, ao longo do curso, também se empenharam em aprender e contribuíram para que os colegas adquirissem o conhecimento necessário.

Gostaria de agradecer também a todos que dispuseram de esforços para que o projeto desse certo.

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 50 kVA**. 2012. (Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012.

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados de testes realizados com um motor de combustão interna MWM adaptado a ciclo Otto, acoplado a um gerador síncrono trifásico de eletricidade com capacidade de 50 kVA, alimentado inicialmente com Gás Natural Veicular e posteriormente com gás de síntese proveniente de um gaseificador de biomassa concorrente utilizando lenha de eucalipto. Verificou-se, também, a composição do gás e o desempenho do gaseificador. São apresentadas as características e eficiência do conjunto gerador, com o objetivo de avaliar a viabilidade de se aplicar o sistema em localidades distantes, onde há biomassa disponível e o sistema de transmissão de energia elétrica convencional é dificultado pela distância. O gás de síntese gerado apresentou composição média de 16,9% de H₂, 20% de CO, 10,9% de CO₂, 2% de CH₄ e 50,1% de N₂. O desempenho do conjunto gerador foi monitorado, aplicando-se cargas trifásicas e resistivas de 0, 7, 13, 20,1 e 26,4 kW, ao grupo gerador, mantendo a tensão média eficaz de 222 V e correntes de 0, 18,5, 33, 51,84 e 67 A.

Palavras-chave: Gaseificador. Gás de síntese. Grupo gerador. Teste de rendimento. Desempenho.

FIGUEIREDO, F. L. **Evaluation of a stand-alone unit electricity compound for concurrent gasification system and generator sets with capacity of 50 kVA.** 2012. Dissertation (Mastering in Construction and Sanitation Engineering) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2012.

ABSTRACT

This paper presents results of tests performed with an internal combustion engine adapted to MWM Otto cycle, coupled to an electricity generator synchronous triphase with a capacity of 50 kVA, fed initially with Natural Gas and later with syngas from a biomass gasifier competitor using eucalyptus wood. There was also the gas composition and performance of the gasifier. Presents the characteristics and efficiency of the generator set, in order to assess the feasibility of applying the system in remote locations, where biomass is available and the system of conventional electric power transmission is hampered by distance. The generated synthesis gas composition showed a mean of 16.9% H₂, 20% CO, 10.9% CO₂, CH₄ 2% and 50.1% N₂. The performance of the generator set was monitored by applying loads three-phase resistive of 0, 7, 13, 20,1 and 26,4 kW, the generator, keeping the average voltage effective of 222 V and currents of 0, 18,5, 33, 51,84 and 67 A.

Key words: Gasifier. Synthesis gas. Generator set. Income test. Performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração da turbina a gás	29
Figura 2 – Produtos resultantes da pirólise da biomassa	37
Figura 3 – Gaseificador contracorrente	42
Figura 4 – Gaseificador de fluxo cruzado	43
Figura 5 – Gaseificador de leito fixo concorrente	45
Figura 6 - Gaseificador concorrente de duplo estágio	44
Figura 7 – Gaseificador de leito fluidizado borbulhante.....	497
Figura 8 – Gaseificador de leito fluidizado circulante	50
Figura 9 – Diagrama esquemático do gaseificador concorrente de leito fixo de duplo estágio de gaseificação.....	57
Figura 10 – Gaseificador concorrente de duplo estágio de gaseificação	58
Figura 11 – Divisão das zonas no gaseificador	59
Figura 12 – Válvulas dosadoras de ar, placas de orifício e réguas escalonadas	61
Figura 13 – Gaseificador concorrente de duplo estágio de gaseificação utilizado nos testes	63
Figura 14.a, 14.b, 14.c – Sino (fechado), sistema de alimentação (com madeira) e tampa aberta, sistema de vibração para a descida da biomassa	64
Figura 15.a, 15.b, 15.c, 15.d – Grelha instalada, reservatório de cinzas e particulado, ciclone, grelha antes de ser instalada	65
Figura 16 – <i>Trap</i>	66
Figura 17 – Queimador (flare) e “chama piloto”	67
Figura 18 – Lenha de eucalipto utilizada no processo de gaseificação	68
Figura 19 – Grupo gerador	70
Figura 20 – Indicadores de parâmetros variáveis do motor e ignição	71
Figura 21 – Misturador	72
Figura 22 – Corpo borboleta.....	72
Figura 23 – Banco de carga puramente resistiva	73
Figura 24 – Ponto de coleta de gás após o gasômetro	73
Figura 25 – Bomba de sucção.....	73
Figura 26 – Representação gráfica do poder calorífico inferior e superior	90
Figura 27 – Representação do método usado para calcular a vazão do ar de entrada no gaseificador	91
Figura 28 – Dados de entrada para o cálculo da vazão.....	92

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	– Composição da matriz energética no Mundo.....	19
Gráfico 2	– Evolução da demanda de fontes energéticas no Brasil	20
Gráfico 3	– Demanda interna de energia elétrica por fonte	21
Gráfico 4	– Relação entre índice de desenvolvimento humano (IDH) de países considerados de baixo, médio e alto desenvolvimento, com a emissão de CO ₂ per capita (T)	25
Gráfico 5	– Volume de recarga em função do tempo	75
Gráfico 6	– Número de recargas em função do tempo de operação	76
Gráfico 7	– Variação da temperatura do nível em função do tempo.....	78
Gráfico 8	– Variação da temperatura do ar de entrada	79
Gráfico 9	– Variação da temperatura do gás de saída	80
Gráfico 10	– Variação das temperaturas em função do tempo e recargas.....	81
Gráfico 11	– Evolução das temperaturas em função do tempo	82
Gráfico 12	– Evolução das temperaturas em função do tempo	83
Gráfico 13	– Variação das temperaturas em função do tempo.....	83
Gráfico 14	– Composição do gás de síntese na “chama piloto”	87
Gráfico 15	– Composição do gás após o gasômetro.....	88
Gráfico 16	– Composição do gás de síntese em função da variação da temperatura.....	89
Gráfico 17	– Eficiência da conversão do carbono em função do fator de ar	95
Gráfico 18	– Variação da corrente em função da carga aplicada ao grupo.....	98
Gráfico 19	– Variação da temperatura do escapamento em função da carga aplicada.....	99
Gráfico 20	– Comparação de potências desenvolvidas pelo grupo gerador alimentado com GNV e gás de síntese.....	100
Gráfico 21	– Relação do consumo do gás de síntese com GNV em função da carga aplicada.....	101

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação das principais tecnologias empregadas na geração distribuída e porte de carga	28
Quadro 2 – Descrição do sistema de gaseificação e componentes agregados	62
Quadro 3 – Resumo das principais características técnicas do motor utilizado nos ensaios	71
Quadro 4 – Características do gerador	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição elementar do eucalipto e bagaço de cana	26
Tabela 2 – Composição imediata do eucalipto e bagaço de cana.....	26
Tabela 3 – Propriedades do Grupo Gerador Diesel.....	32
Tabela 4 – Características técnicas do Grupo Gerador Diesel.....	32
Tabela 5 – Classificação do gás de síntese quanto ao seu poder calorífico	34
Tabela 6 – Composição do gás de síntese referente a três tipos de gaseificadores.....	34
Tabela 7 – Estequiometria e entalpias das reações do processo de gaseificação ..	38
Tabela 8 – Condições operacionais dos gaseificadores mais usuais	51
Tabela 9 – Composição imediata e elementar da lenha de eucalipto.....	68
Tabela 10 –Recargas efetuadas em função do tempo	74
Tabela 11 –Composição do gás de síntese antes do filtro de manga, após 3,7 horas (222 minutos) de funcionamento.....	85
Tabela 12 –Composição do gás de síntese coletado antes do gasômetro.....	85
Tabela 13 –Composição do gás de síntese no bocal de teste (“chama piloto” – Figura 16)	86
Tabela 14 –Composição do gás de síntese após o gasômetro	88
Tabela 15 –Composição da biomassa utilizada (base úmida), para cada kg	94
Tabela 16 –Relação A/C e F/A em função do consumo de biomassa.....	96
Tabela 17 –Resultados do monitoramento do grupo gerador abastecido com gás de síntese	97
Tabela 18 –Composição do gás de escape, com o motor alimentado com gás de síntese	99
Tabela 19 –Elevação da carga do grupo gerador de 0 a 100 % alimentado com gás de síntese	102
Tabela 20 –Elevação da carga do grupo gerador de 0 a 100 % alimentado com gás de síntese	103
Tabela 21 –Resultados do teste com o grupo gerador alimentado com GNV	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIE	Agência Internacional de Energia
ANRE	Agency for Natural Resources and Energy
BEN	Balanco energético nacional
CDIAC	Carbon Dioxide Information Analysis Center
CIENTEC	Fundação de Ciência e Tecnologia, RS
CNI	Confederação Nacional da Indústria
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research
E	gerador ideal
ER-BR	Energias Renováveis – Brasil
FM	filtro de mangas
GD	Geração Distribuída
GLP	gás liquefeito de petróleo
GNV	gás natural veicular
H₂S	gás sulfídrico
IDH	índice de desenvolvimento humano
IEA	Agência Internacional de Energia
INEE	Instituto Nacional de Eficiência Energética
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LFB	leito fluidizado borbulhante
LFC	leito fluidizado circulante
MACI	motor alternativo de combustão interna
MAP	Mainfold air pressure – sensor de pressão absoluta
MCI	motor de combustão interna
MWth	Megawatt térmico
Nm³	normal metro cúbico
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PCI	poder calorífico inferior
PCS	poder calorífico superior
ppm	partes por milhão
psig	pounds per square inch gauge – libras por polegada quadrada manométrica

R²	linha de tendências
R_i	resistência interna
TC	Trocador de calor
TEP	tonelada equivalente de petróleo
VB	válvulas de regulação manual das entradas de ar
VMF	velocidade mínima de fluidização

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 ENERGIA	18
3.2 PANORAMA ENERGÉTICO MUNDIAL	18
3.3 SUPRIMENTO DE ENERGIA NO BRASIL	19
3.3.1 Energia Elétrica no Brasil	20
3.4 BIOMASSA COMO FONTE ENERGÉTICA	22
3.5 COMPOSIÇÃO DA BIOMASSA	25
3.6 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA	27
3.6.1 Principais Tecnologias Aplicadas Para a Geração Distribuída (GD)	28
3.7 GASEIFICAÇÃO	33
3.7.1 Fases da Gaseificação	35
3.8 CLASSIFICAÇÃO E TIPOS DE GASEIFICADORES	40
3.8.1 Gaseificadores de Leito Fixo	41
3.8.2 Gaseificadores de Leito Fluidizado	47
3.9 ORGANIZAÇÕES DE PESQUISAS SOBRE A GASEIFICAÇÃO NO BRASIL	52
3.10 A GASEIFICAÇÃO GERANDO ENERGIA ELÉTRICA	55
3.11 ANÁLISE DE TRABALHOS EXISTENTES	56
4 MATERIAS E MÉTODOS	57
4.1 GASEIFICADOR DE LEITO FIXO CONCORRENTE DE DUPLO ESTÁGIO UTILIZADO	57
4.2 OPERAÇÃO DO GASEIFICADOR CONCORRENTE	60
4.3 BIOMASSA UTILIZADA	67
4.4 GRUPO GERADOR	69
4.4.1 Motor	69
4.4.2 Gerador	72

4.5 BANCO DE CARGAS	73
4.6 EQUIPAMENTOS E MÉTODOS DE ANÁLISE DO GÁS DE SÍNTESE	74
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
5.1 TAXA DE ALIMENTAÇÃO DE BIOMASSA.....	74
5.2 MONITORAMENTO DAS TEMPERATURAS E COMPOSIÇÃO DO GÁS.....	77
5.2.1 Composição do Gás de Síntese.....	84
5.3 RELAÇÃO A/C E FATOR DE AR	91
5.4 DESEMPENHO DO GRUPO GERADOR	96
5.4.1 Composição dos Gases do Escapamento do Motor.	99
5.4.2 Potência Desenvolvida Alimentando o Grupo com GNV e Gás de Síntese ...	100
5.5 RELAÇÃO DO CONSUMO ENTRE GNV E GÁS DE SÍNTESE EM FUNÇÃO DA CARGA APLICADA	101
5.6 EFICIÊNCIA DO GASEIFICADOR E DO SISTEMA PILOTO	104
5.6.1 Eficiência do Gaseificador	104
5.6.2 Eficiência do Sistema Piloto	105
5.6.3 Considerações Sobre a Possível Implantação do Sistema em uma Escala Real	106
6 CONCLUSÕES	108
REFERÊNCIAS.....	110
RECOMENDAÇÕES	115
APÊNDICE	
APÊNDICE A – FORMA DE OPERAÇÃO DO GASEIFICADOR	120
ANEXOS	
ANEXO 1 – ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE	137
ANEXO 2 - LAUDO TÉCNICO DO GNV	145

1 INTRODUÇÃO

Os altos custos do petróleo e os riscos ambientais provocados pela queima de combustíveis fósseis, como o aumento da temperatura média do globo devido ao efeito estufa, por exemplo, tendo ainda como conseqüências, perturbações climáticas juntamente com catástrofes naturais, concentrou-se o interesse em pesquisas voltadas para fontes não convencionais de energia, tais como a energia proveniente da biomassa. O uso de combustível fóssil é uma prática meramente extrativista, de exploração primitiva da natureza, assim como a utilização direta da biomassa extraída do meio ambiente.

O aproveitamento da biomassa, hoje, também pode ser associado a estágios mais elevados de produção, envolvendo sofisticadas técnicas de processamento físico-químico para obtenção indireta de energia, como no caso da gaseificação.

A madeira comumente é utilizada como combustível sólido na queima direta como fonte energética, o que exige, nesse caso, fornalhas especiais, com pouca flexibilidade quanto ao controle e automação da queima. Os combustíveis líquidos e gasosos, por outro lado, são convenientemente dosados e distribuídos por tubulações, são de armazenamento mais prático, são intercambiáveis entre si com pouca ou nenhuma necessidade de alteração dos queimadores, são de queima facilmente controlada, podendo ser automatizada, e são, principalmente, utilizados como combustível em motores de combustão interna. A gaseificação da madeira é uma forma de transformar o combustível sólido numa forma mais nobre de energia com potencial de substituição dos derivados de petróleo.

A tecnologia de conversão de material orgânico em gás combustível teve origem no fim do século XVII, quando a forma mais antiga de produção de gás era a chamada destilação seca, que consistia no aquecimento do combustível em uma redoma, na ausência de oxigênio, dessa forma emitindo gases (CORTEZ, 1997). Muitas experiências na produção e uso do gás de madeira foram realizadas no século XVIII.

O gás combustível, até então, não havia tido aplicação comercial ou doméstica até 1830. Por volta de 1850, boa parte de Londres tinha sua iluminação a partir do gás de síntese (LIPP, 2001 apud ANDRADE, 2007).

A produção de gás de síntese na Europa foi consideravelmente mudada a partir de 1940, devido à descoberta do gás natural, e a importância do processo da gaseificação foi reduzida sensivelmente.

Pequenos gaseificadores de madeira e carvão vegetal foram utilizados para fins automotivos, principalmente antes e durante a segunda guerra mundial, devido à escassez do petróleo naquela época.

William Murdock, em 1972, estudou a produção de gás a partir de vários tipos de carvão e madeira, sob diferentes condições, a fim de se obter um combustível gasoso, com melhor eficiência, controle de combustão e com melhores características de transporte, podendo ser utilizado como matéria-prima para outros processos (DUARTE, 1983).

Entre os anos de 1973 e 1979, devido à crise energética, ressurgiu o interesse pela gaseificação, pois notou-se um efeito nocivo dos elevados custos e contínuo aumento dos preços do petróleo e, consecutivamente, de seus derivados, razão pela qual aumentou o interesse pelas fontes renováveis, amplamente disponíveis nos países em desenvolvimento (CORONADO; SILVEIRA; ARAUZO, 2006). No mundo todo, a necessidade de economizar energia e a iminente escassez dos combustíveis fósseis têm sido um aliado no desenvolvimento de novas tecnologias, visando eficiência energética ao empregar tecnologias racionais, a fim de minimizar os danos causados ao meio ambiente.

A partir dos anos 80 e 90, os estudos vinculando o efeito estufa ao uso dos combustíveis fósseis foi outro fator que valorizou a possibilidade do uso da biomassa com finalidades energéticas. Diante deste cenário, destacam-se, então, tecnologias da gaseificação de madeira.

Sendo o Brasil um país com grandes áreas agricultáveis e alto potencial de produção vegetal, tem também grande capacidade para a utilização da gaseificação de biomassa em conjunto com grupo gerador, utilizando motores de combustão interna, para a produção de energia elétrica a partir de biomassa, especialmente em áreas isoladas onde a conexão com a rede elétrica não é possível ou é de alto custo (WALTER et al., 2005 apud CORTEZ et al., 2008, p. 590).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar uma unidade piloto autônoma de produção de energia elétrica composta por grupo gerador síncrono trifásico de 50 kVA, com motor ciclo Diesel convertido para ciclo Otto, alimentado com gás de síntese proveniente de um gaseificador de leito fixo concorrente de duplo estágio de gaseificação.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1 – Avaliar o desempenho geral da unidade de gaseificação, utilizando lenha de eucalipto como carga, dando ênfase ao tempo e temperatura de estabilização.
- 2 – Avaliar a composição do gás de síntese produzido.
- 3 – Avaliar o desempenho elétrico e mecânico do grupo gerador alimentado com gás de síntese, tendo como referência os parâmetros de potência, tensão, frequência e rendimento quando alimentado anteriormente com GNV.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ENERGIA

A energia é um elemento vital para o crescimento da economia e desenvolvimento sustentável do país. Verifica-se que, desde a revolução industrial, o uso de combustíveis fósseis, em todas as suas formas, domina como fonte principal a produção de energia. Esta situação, originada pelos preços acessíveis, facilidade de utilização e aparente inesgotabilidade dos recursos, manteve-se ao longo dos anos. Hoje, constata-se que, além da finitude das reservas de energia fóssil, sua queima aumenta o efeito estufa, provocando danos ambientais que demandará grandes recursos e mudanças do estilo de vida dos países emissores, além de guerras entre nações pelo domínio na exploração do petróleo e posse de terras onde se localizam as reservas.

Com a crescente instabilidade socioeconômica, provocada pelo aumento dos preços das matérias-primas e as conseqüências ambientais que advêm da queima deste tipo de combustível, torna-se necessário encontrar novas fontes de energia mais limpas e processos mais eficientes.

3.2 PANORAMA ENERGÉTICO MUNDIAL

Os principais insumos energéticos usados pela indústria no mundo são o petróleo, o gás natural e o carvão. Esses insumos têm apresentado elevadas taxas de crescimento do consumo, devido, principalmente, ao desempenho das economias emergentes, lideradas pela China e pela Índia (CNI, 2007).

O crescimento acelerado da demanda, aliado à instabilidade política nas regiões produtoras de petróleo e gás natural e às pressões pela redução das emissões dos gases causadores do “efeito estufa”, traz preocupações sobre o equacionamento da oferta de energia e seu impacto nos preços (CNI, 2007).

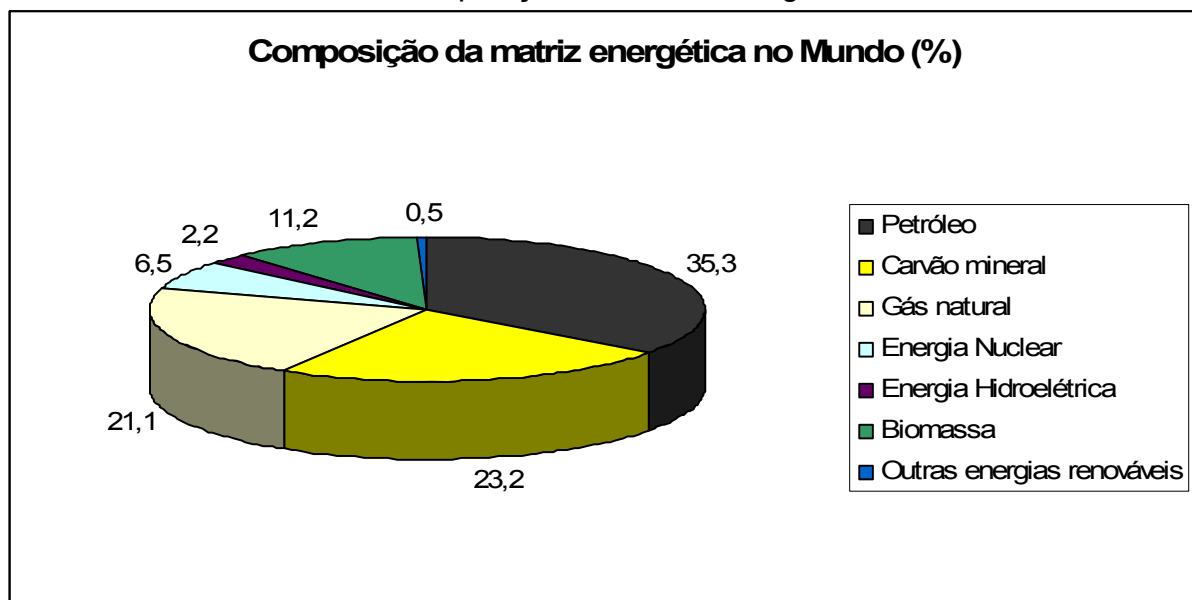
Segurança de suprimento e meio ambiente transformaram a energia em tema crítico. Dez países concentram 85% das reservas mundiais de petróleo, e boa parte desses países estão envolvidos em turbulências geopolíticas. A gasolina e o óleo diesel são responsáveis por quase toda a energia consumida no setor de

transportes, que, por sua vez, contribui com 25% das emissões dos gases de “efeito estufa” dos países industrializados (BEN, 2011).

O carvão é responsável por 23,2% do consumo mundial de energia. Desta parcela, dois terços são usados para geração de eletricidade, e quase todo o restante para uso industrial. Cerca de dois terços das reservas de carvão estão localizados em apenas quatro países: Rússia, Estados Unidos, China e Índia (CNI, 2007).

O Gráfico 1 destaca a utilização do petróleo como fonte de energia no mundo com 35,3% do total, e a biomassa com 11,2%.

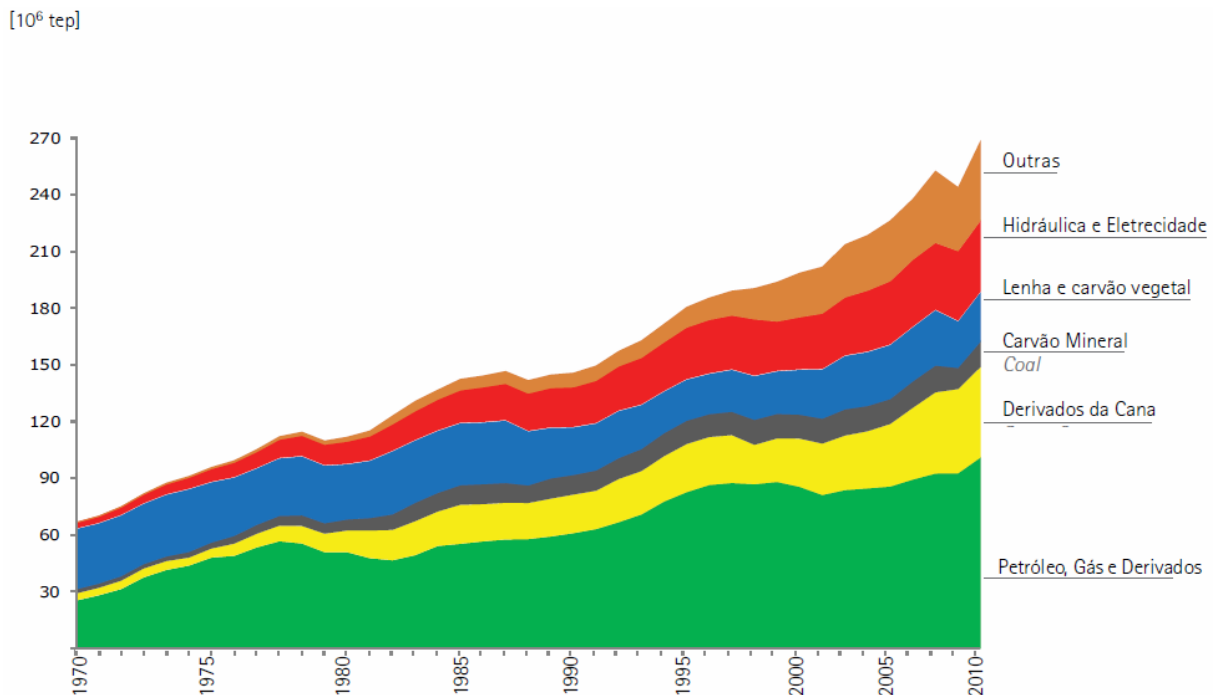
Gráfico 1 – Composição da matriz energética no Mundo



Fonte: BEN (2011) e IEA (2010). Biomassa: Madeira, bagaço de cana, lixívia, restos vegetais.

3.3 SUPRIMENTO DE ENERGIA NO BRASIL

Segundo Silveira (2000), o suprimento de energia num país é tido como uma das condições básicas para seu desenvolvimento econômico e seu progresso. O Gráfico 2 apresenta o consumo de energia no Brasil, e nela presencia-se o aumento de consumo de todas as formas de energia, observando-se que o crescimento do uso do petróleo foi menor que as outras formas de energia.

Gráfico 2 – Evolução da demanda de fontes energéticas no Brasil

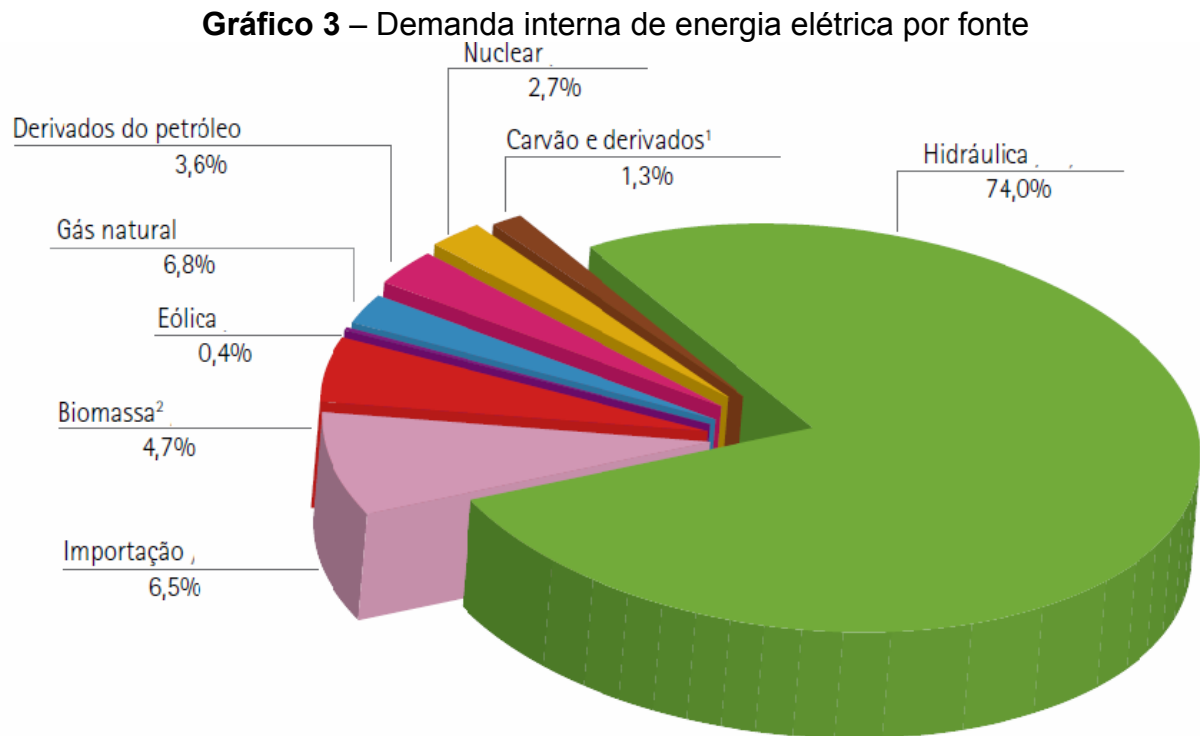
Fonte: BEN (2011). Tep.: Tonelada equivalente de petróleo.

A partir do ano 2000, nota-se um aumento relevante dos derivados da cana-de-açúcar e outras fontes de energia.

3.3.1 Energia Elétrica no Brasil

A eletricidade, em termos de suprimento energético, tornou-se uma das formas mais convenientes e versáteis de energia, sendo gerada principalmente através de hidrelétricas e termoelétricas, estas últimas movidas a combustível fóssil ou energia atômica. A energia hidrelétrica é considerada ambientalmente interessante, pois embora existam impactos ambientais para a instalação dos reservatórios de água, durante sua vida útil as hidrelétricas não produzem gases que originam o efeito estufa. Mesmo sendo uma energia de baixo custo na geração, a sua transmissão é de custo elevado, pois demanda linhas de transmissão e investimentos em estações elevadoras e abaixadoras de tensão. Essa energia, no meio rural, ajuda a consolidar a qualidade de vida da população, caracterizando um atrativo social.

O Brasil, quinto país do mundo em superfície, possui 8% do total de água doce existente no mundo. Diante deste quadro, verifica-se que o nosso país tem a fonte de energia elétrica mais abundante e de menor custo de geração, a de origem hidráulica, com 74%, como pode ser observado no Gráfico 3.



¹ Inclui gás de coqueria.

² Biomassa inclui lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações.

Fonte: BEN (2011).

O Brasil, entre outros países, está empenhado em desenvolver tecnologias alternativas que visam substituir uma grande parcela de combustíveis fósseis por combustíveis renováveis. Essas tecnologias eram consideradas de alto valor até algum tempo atrás; hoje, o custo de manutenção e instalação dessas tecnologias, por exemplo, a eólica, a solar e a de biomassa, entre outras, vem decaindo progressiva e significativamente.

O petróleo lidera e tem a tendência de continuar liderando o *ranking* das fontes energéticas. Outras fontes de energia também terão bastante destaque no próximo século, como a energia eólica, solar e biomassa, isso sem contar com os avanços relativos ao hidrogênio.

3.4 BIOMASSA COMO FONTE ENERGÉTICA

A biomassa é constituída pelo material produzido por todos os seres vivos (animais, vegetais, fungos e protistas) em seus diferentes processos, isto é, a matéria orgânica viva, desde quando fixa energia solar nas moléculas constituintes de suas células, passando por todas as etapas da cadeia alimentar ou trófica (BRISTOTI; SILVA, 1993). Alguns autores definem biomassa como qualquer material derivado da vida vegetal e que seja renovável em um período de tempo inferior a 100 anos (PROBSTEIN; HICKS, 1982); sendo assim, a maioria dos recursos energéticos como o petróleo, carvão mineral e xistos betuminosos não são considerados renováveis, apesar de serem derivados da vida vegetal.

A biomassa foi, durante muito tempo, a maior fonte primária para produção energética. Nikolaus August Otto, criador do motor de combustão, concebeu a sua invenção para funcionar a etanol, assim como Rudolf Christian Karl Diesel, inventor do ciclo diesel, utilizou inicialmente óleo de amendoim. No entanto, depois da descoberta do potencial energético muito superior dos combustíveis fósseis, a utilização da biomassa como combustível foi caindo em desuso. Porém, com a elevação dos preços do petróleo, preocupações com o fato de se pensar terem atingido o pico da sua produção, as emissões de gases de efeito estufa estão provocando um aumento no interesse em alguns combustíveis derivados da biomassa (SPEIGHT, 2008).

Bridgwater (1995) afirma que a biomassa é considerada o combustível com maior potencial para o futuro, principalmente quando é levada em conta a possibilidade da utilização de resíduos domésticos, industriais e agrícolas. Por esses e outros atrativos é que os estudos na conversão energética da biomassa tornam-se efetivos. Dentro do potencial energético brasileiro, destacam-se as fontes geradoras exclusivamente de eletricidade, em que se observa a biomassa com 4,7%, no Gráfico 3.

Higman e Van der Burgt (2003 apud FONSECA, 2009) definem, de forma abrangente, a biomassa como sendo qualquer combustível ou matéria bruta derivados de organismos que estiveram vivos recentemente. Tal definição claramente exclui os tradicionais combustíveis fósseis, que, mesmo tendo sido derivados de matéria orgânica vegetal e animal, necessitaram de milhões de anos para sua conversão na forma como são encontrados atualmente. Com exceção de

algumas microalgas e matérias com altos índices de umidade, a biomassa se caracteriza, essencialmente, por ser uma matéria carbonada em estado sólido.

A biomassa é uma fonte de energia renovável, cuja utilização tem recebido grande atenção devido a considerações ambientais e de aumento da necessidade de energia em nível mundial; é limpa e tem uma quantidade negligenciável de enxofre, N_2 e constituintes formadores de cinza, o que provoca baixas emissões de SO_2 (dióxido de enxofre) e fuligem, quando comparado com os combustíveis fósseis (SPEIGHT, 2008).

Assim, do ponto de vista energético, o conceito geral abordado pelo CENBIO (2002) é que biomassa seria todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizado para produção de energia.

As principais limitações de combustíveis de biomassa sólida são as dificuldades de manuseio e falta de portabilidade para os motores móveis. Para tratar dessas questões, é feita a conversão de biomassa sólida em combustíveis líquidos e gasosos. Meios biológicos (fermentação) e meios químicos (pirólise, gaseificação) podem ser usados para produzir combustíveis líquidos de biomassa. Por exemplo, o metano é o gás produzido para as necessidades locais de energia, por via anaeróbia de digestão microbiana dos dejetos orgânicos.

No Japão, a parcela da biomassa no suprimento total de energia primária correspondeu, em 2003, a apenas 1,3%. A geração de eletricidade e a produção de calor responderam, com parcelas iguais, pela quase totalidade do consumo (AIE, 2006). As principais fontes de biomassa são os resíduos industriais, resíduos agroindustriais (esterco e resíduos de beneficiamento de madeira) e resíduos sólidos urbanos (ANRE, 2006).

A Finlândia é um caso de destaque quanto ao emprego da biomassa na produção de eletricidade, com relação ao ano de 2003, quando, do total de energia elétrica produzida, 11,2% foi proveniente da biomassa (AIE, 2006). A maior central de biomassa do mundo é a central de Alholmens Kraft, a qual se situa neste país. Os principais combustíveis utilizados são: cascas de árvores, sobras de madeiras, turfa, produtos provenientes do processo de refinação da madeira e carvão (como combustível complementar).

A biomassa é uma fonte de energia renovável, e o Brasil possui um grande potencial dessa energia. Sua aplicação em sistemas de gaseificação

conhecido como mecanismo de desenvolvimento limpo, sustentabilidade e viabilidade é que justifica o desenvolvimento desse trabalho, além também de ser empregada em usinas de carvão para operar com gás.

No Brasil, uma das principais utilizações da biomassa para geração de energia elétrica, tem sido na cogeração nas usinas de álcool e açúcar, sendo aproveitado o bagaço da cana para alimentar as caldeiras, gerando vapor necessário às moendas e alimentando geradores elétricos.

Existem inconvenientes na utilização da biomassa como energia primária na geração de energia, como informa Migliorini (1980): grande quantidade de resíduos gerados indiretamente, como os resíduos industriais, e diretos, como as próprias cinzas. Essas apresentam grande volume, de difícil manuseio, devendo ser depositadas ou incineradas.

Trabalhos de Karekesi et al. (2005 apud GUARDABASSI, 2006) têm classificado as tecnologias de uso da biomassa em três categorias, de acordo com a tecnologia empregada na sua utilização energética. São elas:

- tecnologias tradicionais de uso da biomassa (ou biomassa tradicional): combustão direta de madeira, lenha, carvão vegetal, resíduos agrícolas, resíduos de animais e urbanos, para cocção, secagem e produção de carvão;
- tecnologias “aperfeiçoadas” de uso da biomassa (ou biomassa “aperfeiçoada”): tecnologias aperfeiçoadas e mais eficientes de combustão direta de biomassa, tais como fogões e fornos;
- tecnologias modernas de uso da biomassa (ou biomassa moderna): tecnologias avançadas de conversão de biomassa em eletricidade e o uso de biocombustíveis, além de experiências com energias renováveis para eletrificação de comunidades pobres e isoladas com a utilização de painéis fotovoltaicos, biodigestores e gaseificação de biomassa (CHAUREY, 2005);

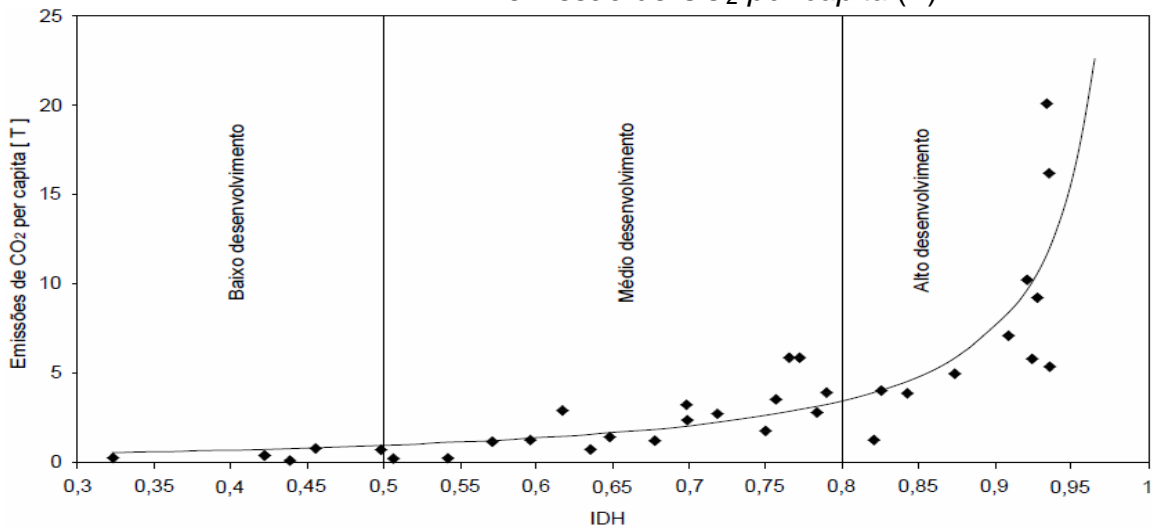
O interesse no uso de energias renováveis e não fósseis diz respeito à diminuição da emissão de CO₂ na atmosfera, por contribuir para a formação do efeito estufa.

O dióxido de carbono é o mais importante gás de efeito estufa provocado pelas atividades humanas. A concentração desse gás na atmosfera vem

aumentando consideravelmente, havendo um acréscimo mais pronunciado desde a era pré-industrial, passando de 280 ppm para 379 ppm em 2005, sendo que, na década entre 1995 e 2005, houve a maior taxa de aumento (IPCC, 2007).

Como consequência do modelo de vida moderna, baseado no uso de energia fóssil, há uma relação direta entre o índice de desenvolvimento humano (IDH) e o nível de emissões *per capita* (Gráfico 4).

Gráfico 4 – Relação entre índice de desenvolvimento humano (IDH) de países considerados de baixo, médio e alto desenvolvimento, com a emissão de CO₂ *per capita* (T)



Fonte: CDIAC apud Andrade (2007).

As fontes de energia que mais se destacam atualmente como fontes naturais menos impactantes são a solar, hídrica, eólica e de biomassa. Esta última merece destaque, pois é uma fonte primária que pode ser usada de diversas formas, entre elas a gaseificação.

3.5 COMPOSIÇÃO DA BIOMASSA

Para poder determinar a potencialidade de um combustível e, portanto, poder avaliar se este está sendo usado dentro de sua plena capacidade, deve-se primeiramente conhecer as suas características químicas e térmicas fundamentais, as quais são sua composição elementar, composição imediata e poder calorífico, em que:

- **Composição elementar** é o conteúdo em percentagem de massa de carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), umidade e material residual (cinzas). Determina-se utilizando a norma ASTM Standard Methods for the Ultimate Analysis of Coal and Coke, D 3176-74 (CLESCERI et al., 1983). É a característica técnica mais importante do combustível e constitui a base para análise dos processos de combustão.

- **Composição imediata** é o conteúdo em porcentagem de massa de carbono fixo, voláteis, umidade e cinzas. Determina-se utilizando a norma ASTM Standard Methods for the Ultimate Analysis of Coal and Coke, D 3172-73 (CLESCERI et al., 1983).

As Tabelas 1 e 2 apresentam a composição elementar e imediata da biomassa de eucalipto e bagaço de cana.

Tabela 1 – Composição elementar do eucalipto e bagaço de cana

Tipo da biomassa	Composição elementar (%)					
	C	H	O	N	S	A
Eucalipto	49,00	5,87	43,97	0,30	0,01	0,30
Bagaço de cana	47,50	5,35	40,77	0,65	0,21	5,89

Fonte: Jenkins (1990).

Tabela 2 – Composição imediata do eucalipto e bagaço de cana

Tipo da biomassa	Composição Imediata (%)		
	voláteis	cinzas	carbono fixo
Eucalipto	81,42	0,79	17,82
Bagaço de cana	73,78	77,27	14,95

Fonte: Jenkins (1990).

- **Poder calorífico** de um energético é a quantidade de Energia liberada na forma de calor durante a combustão completa da unidade de massa do combustível, podendo ser medido em kJ/kg; é a quantidade de calor que libera um quilograma ou um metro cúbico de combustível ao se oxidar completamente. O valor quantitativo desse parâmetro pode variar muito de acordo com o teor de umidade do combustível. Define-se o poder calorífico inferior (PCI), quando não se considera o calor de condensação de umidade dos produtos da combustão, e poder calorífico

superior (PCS), quando é considerada a energia requerida para evaporar a umidade presente no combustível.

Para a biomassa das Tabelas 1 e 2, o PCI do eucalipto é de 19,42 MJ/kg e do bagaço de cana 17,33 MJ/kg (JENKINS, 1990), tendo o padrão ASTM Standard Method for Gross Calorific Value of Solid Fuel by the Adiabatic Bomb Calorimeter, D 2015 – 77 (CLESCERI et al., 1983), como método de análise.

3.6 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Geração Distribuída é uma expressão utilizada para designar geração de energia elétrica através de fontes distribuídas de energia, não necessitando de transporte de energia por meio de uma rede de transmissão (MARTINS, 2006). É o uso de tecnologias de geração de energia em pequena escala, localizadas próximas às cargas alimentadas, inclusive utilizando o sistema de cogeração, que consiste no aproveitamento local do calor residual originado nos processos termodinâmicos de geração de energia elétrica, que, de outra forma, seria desperdiçado. O aproveitamento pode ser para uma aplicação secundária, que pode ou não estar ligada com o processo principal, implementado em suas próprias instalações.

A GD tem como objetivo principal atender consumidores em localidades distantes, onde a rede elétrica não está disponível. Este sistema permite a diminuição das perdas pela transmissão, podendo se adequar às necessidades de carga do local e a disponibilidade de recursos energéticos do local. Geralmente de pequeno porte, os equipamentos utilizados podem ser célula de combustível, motor Stirling, microturbinas e motores de combustão interna.

Geração distribuída, segundo Electric Power Research Institute (apud ACKERMANN, 2001), define-se como sendo a geração de “alguns” quilowatts até 50 MW.

3.6.1 Principais Tecnologias Aplicadas Para a Geração Distribuída (GD)

As unidades de GD podem ser classificadas em três categorias: tecnologia, fonte de combustível e interface com a rede (se disponível e necessária), conforme constam no Quadro 1, que trata das principais tecnologias e porte de acordo com a carga suportada.

Quadro 1 – Classificação das principais tecnologias empregadas na geração distribuída e porte de carga

Tecnologia	Fonte de combustível	Interface	Pequeno < 100 kW	Intermediário 100 kW – 1 MW	Grande > 1 MW
Pequenas turbinas a gás	Combustível fóssil e biogás	Conexão direta			X
Motores recíprocos com geradores síncronos ou de indução	Combustível fóssil e biogás	Conexão direta	X	X	X
Eólica	Renovável	Inversor	X	X	X
Fotovoltaico	Renovável	Inversor	X	X	X
Células a combustível	Combustível fóssil e renovável	Inversor	X	X	X
Solar térmico	Renovável	Conexão direta	X	X	X
Microturbinas	Combustível fóssil	Inversor	X	X	

Fonte: Adaptado de NARUC (1999).

O sistema de geração de energia elétrica com gerador acoplado ao motor alternativo de combustão interna (MACI) é uma tecnologia aplicada como Geração Distribuída.

• Microturbinas a gás

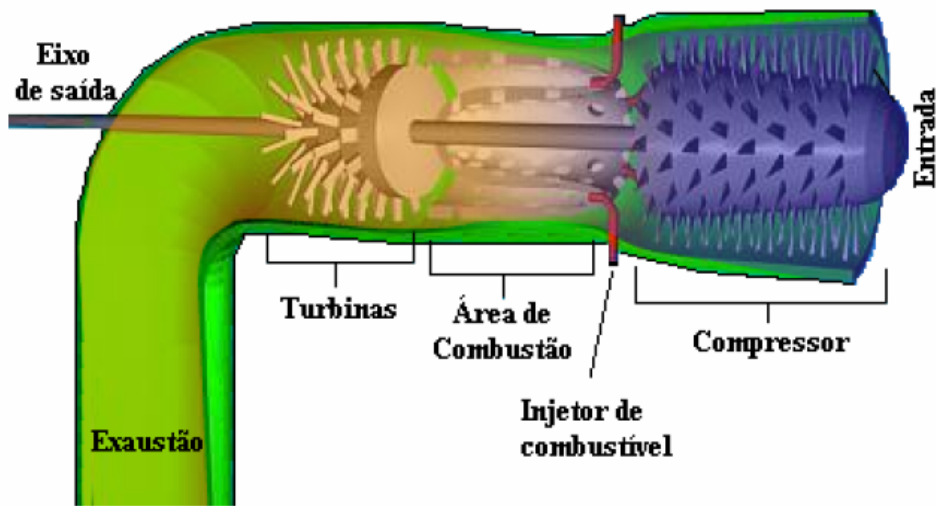
As microturbinas evoluíram das aplicações aeroespaciais e automotivas para aplicações em sistemas elétricos de potência. Podem ser encontradas no mercado na faixa de 30 kW até 250 kW e, dentre suas vantagens, está a flexibilidade de combustível utilizado (diesel, gasolina, biogás) (CORTEZ et al., 2008).

Existem, no mundo, em centros de pesquisa, estudos sobre a gaseificação de biomassa operando com microturbinas, por exemplo, a CSIRO –

Commonwealth Scientific and Industrial Research, a JC Smale & Co e a Capstone (fabricante de turbinas) interessados em criar sistemas com potências na faixa de 25 a 200 kW, sendo o consumo previsto de biomassa em 1 kg/kWh.

Microturbinas são utilizadas em processos que necessitam de potência mecânica/elétrica ou de propulsão. É formada basicamente por três elementos: compressor, câmara de combustão e a turbina propriamente dita. O esquemático de uma turbina a gás é mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Ilustração da turbina a gás



Fonte: Martins (2006).

O processo para obtenção de qualquer um dos dois tipos de potência citados inicia-se com a aspiração do ar da atmosfera no compressor, onde é posteriormente comprimido. Dessa forma, ocorre uma elevação na temperatura devido à alta razão de compressão. Em seguida é enviado para a câmara de combustão, onde ocorrerá a mistura com o combustível, haverá a queima e o aquecimento, formando gases quentes. Estes escoam para a turbina e se expandem produzindo trabalho no eixo do compressor e da carga, geralmente um gerador elétrico.

- **Turbina a vapor**

São máquinas de combustão externa, não havendo, portanto, contato dos gases resultantes da queima do combustível no fluido de trabalho. A energia presente no vapor do fluido de trabalho gera energia mecânica através do movimento de rotação de um eixo.

O acionamento da turbina ocorre pela expansão do vapor de alta pressão, proveniente de uma caldeira convencional. Porém, o vapor proveniente das turbinas é de baixa ou média pressão, sendo utilizado em processos que necessitam de um baixo nível de temperatura.

- **Motores de combustão interna ciclo Otto**

O motor a combustão interna ciclo Otto é uma máquina que trabalha com os princípios da termodinâmica e com os conceitos de compressão e expansão de fluidos gasosos para gerar força e movimento rotativo. Criado e patenteado por Nikolaus August Otto, por volta do ano de 1866, este motor funciona com um ciclo de quatro tempos e os mesmos princípios até os dias atuais. Converte a energia calorífica produzida pela combustão do combustível, que pode ser líquido (gasolina ou etanol) ou gasoso, em energia mecânica capaz de imprimir torque e movimento. O carburante, constituído de combustível mais ar, é queimado no interior dos cilindros do motor, por centelha elétrica produzida pelas velas.

Tecnologia muito difundida em escala comercial são os MACI (motores alternativos de combustão interna), segundo Viana Junior (2001 apud SALES; ANDRADE; LORA, 2005), devido à sua simplicidade, fácil instalação, operação e custo reduzido, além de poderem ser operados com gás de síntese sem a necessidade de modificações. De acordo com Casado (2005), a transformação da energia calorífica resultante da queima ou da explosão de uma mistura de ar/combustível é feita no interior, na câmara de explosão. Os MCI (motores de combustão interna) são baseados no princípio de que os gases se expandem quando aquecidos. Controlando-se essa expansão dos gases, pode-se obter pressão, a qual será utilizada para movimentar o eixo, ou virabrequim da máquina, tendo, assim, a transformação de energia calorífica do combustível em energia mecânica.

Os motores de combustão interna podem acionar geradores elétricos, sendo uma alternativa para a produção de eletricidade em locais isolados.

- **Motores de combustão interna ciclo Diesel**

O Motor Diesel ou motor de ignição por compressão é um motor de combustão interna inventado pelo engenheiro alemão Rudolf Diesel (1858-1913), em que a combustão do combustível se faz pelo aumento da temperatura provocado pela compressão de ar e se destaca ainda hoje pela economia de combustível e robustez com relação ao Ciclo Otto, dado sua taxa de compressão superior. Enquanto o motor Ciclo Otto aspira a mistura ar/combustível para o cilindro, o motor Diesel aspira apenas ar. No motor Diesel, ocorre combustão do combustível pelas elevadas temperaturas (500°C a 650°C) do ar comprimido na câmara de combustão. À medida que o pistão se aproxima do limite máximo de seu curso, um fino jato de combustível é impulsionado para o interior do cilindro. Devido à alta compressão, o ar fica tão quente que, ao receber o combustível, faz este entrar em combustão espontânea, dispensando a presença da vela de ignição.

- **Grupo moto gerador – (GMG)**

A maioria dos projetos envolvendo geração de energia a partir de biomassa, utilizando o processo de gaseificação, utiliza motores de combustão interna alternativos (MCI). Os projetos envolvem motores a gasolina, a gás ou a diesel.

Para a utilização do gás de biomassa em motores a gasolina, não é necessário fazer grandes modificações neles, podendo funcionar somente com o gás. Dessa forma, a razão de mistura gás-ar geralmente utilizada é de 1:1, podendo-se introduzi-la diretamente no carburador. Entretanto, os motores a diesel não conseguem operar somente com o gás de biomassa, podendo apenas substituir o diesel em até 90%, devendo-se realizar a partida com diesel e introduzir o gás de gaseificação gradativamente ou, ainda, fazer sua modificação para ciclo Otto (MARTINS, 2006).

O Grupo Moto Gerador (GMG), quando empregado em sistemas estacionários, geralmente utiliza como combustível o gás natural, o gás liquefeito de

petróleo (GLP), o óleo Diesel ou óleos pesados residuais e também o gás de síntese (LORA; HADDAD, 2006).

O Grupo Moto Gerador a diesel é considerado um dos dispositivos de menor custo para a geração de energia elétrica. O diesel é um hidrocarboneto econômico; quando utilizado para produção de energia elétrica, pode poupar cerca 30% do seu custo total, se comparado a outras tecnologias de geradores a motor, segundo alguns estudos (LORA; HADDAD, 2006). A Tabela 3 apresenta propriedades, quanto ao uso deste gerador:

Tabela 3 – Propriedades do Grupo Gerador Diesel

Fonte	Obtenção	Usos	Vantagens	Desvantagens
GMG a Diesel	Aquisição no mercado	Produção de energia elétrica.	Tecnologia amadurecida. Não depende de fonte inconstante.	Poluente. Libera muita fumaça. Necessita de controle do nível de ruído.

Fonte: Lora e Haddad (2006).

São largamente utilizados e os mais desenvolvidos tecnicamente dentro do contexto tecnológico de geração de energia distribuída. Estão disponíveis desde pequenas capacidades, como de 5 kW para geração de energia de *back-up* residencial até motores de grande porte de potência de 30MW ou maiores (LORA; HADDAD, 2006). A Tabela 4 apresenta uma visão geral das características deste tipo de gerador.

Tabela 4 – Características técnicas do Grupo Gerador Diesel

Disponível comercialmente	Sim
Faixa de capacidades	5 kW a 30 MW ou maiores
Combustível	Gás natural, óleo diesel, gás de aterro sanitário, etc.
Eficiência	25 a 45%
Emissões de Poluentes	Pode necessitar de controle das emissões para NO _x e CO
Emissão total de CO ₂ (g/CO ₂)	443 – 1005 por kW (dependendo da fonte)
Outras características	Adequação aos sistemas de cogeração (a eficiência pode ultrapassar 80%)
Custo do Investimento por kW	500 US\$
Status comercial	Gerador amplamente disponível

Fonte: Lora e Haddad (2006).

Esta tecnologia tem o seu interesse devido à sua elevada eficiência, ao baixo custo inicial e à facilidade de manutenção, resultado de uma infraestrutura de serviços bem estabelecida. Relata-se, ainda, que o desenvolvimento de motores menores que 250 kW têm sido alvo de melhorias em termos de eficiência, potência específica e nível de emissão de poluentes. Novos materiais possibilitam a redução de peso, custo e perdas de calor (LORA; HADDAD, 2006).

3.7 GASEIFICAÇÃO

A tecnologia de gaseificação não é nova: em 1812, a maior parte da cidade de Londres era iluminada por gás produzido a partir da gaseificação do carvão (MAKRAY, 1984). Atualmente, a geração de energia elétrica através da tecnologia da gaseificação de biomassa é um atrativo alternativo para o tratamento térmico de resíduos sólidos (GODINHO, 2006). Diferentes aplicações do gás mostram a flexibilidade de gaseificação e, portanto, permitem que ele seja integrado com diversos processos industriais, bem como sistemas de geração de energia.

O auge da produção de gás de síntese foi durante a segunda guerra mundial; devido à escassez do petróleo, no mundo todo, cerca de um milhão de veículos rodavam com gás de síntese proveniente dos chamados gasogênios (gaseificadores de leito fixo acoplado ao veículo). No Brasil, este número chegou a 20.000 e utilizavam, como combustível, pedaços de madeira, coque e turfa. Cuidados adicionais com a manutenção eram necessários, devido ao alcatrão e ao particulado presentes no gás. O abandono desta tecnologia se deu logo após a 2ª Guerra, quando começou a haver o reabastecimento dos combustíveis derivados do petróleo.

A gaseificação de biomassa, segundo Feo et al. (2003), pode ser definida como a conversão termoquímica de materiais sólidos ou líquidos à base de carbono (matéria-prima) para a produção de combustível gasoso pela ação de um agente gaseificador¹ (outro gás ou composto gasoso).

A gaseificação é descrita como sendo um processo de conversão térmica da matéria orgânica em combustível, usando um agente de gaseificação. Para Kinto e Udaeta (2001), a gaseificação se trata da desvolatilização e a conversão

¹ Ou agente oxidante.

da biomassa, em uma atmosfera de vapor ou ar (ou ambos), para a produção de um gás de médio ou baixo poder calorífico. O gás produzido é de baixo poder calorífico, caso o agente oxidante seja o ar; médio poder calorífico, se o agente oxidante for vapor ou oxigênio; e também existem os gases com alto poder calorífico, obtido com hidrogênio. O que classifica o seu poder calorífico não é exatamente o agente de gaseificação, mas, sim, a quantidade de energia que ele pode gerar em Joules (J). A Tabela 5 apresenta os números para cada faixa de poder calorífico.

Tabela 5 – Classificação do gás de síntese quanto ao seu poder calorífico

Classificação	MJ/Nm ³
Baixo poder calorífico	até 5
Médio poder calorífico	5 a 10
Alto poder calorífico	10 a 40

Fonte: Sordi et al. (2006).

O gás de baixo poder calorífico é também denominado de gás pobre. Em sua composição estão presentes o CO, CO₂, H₂, CH₄, N₂, para o ar como agente oxidante, além de outros elementos e contaminantes, como o alcatrão e particulados, por exemplo (BRIDGWATER; GRASSI, 1991). Há, na literatura, uma variedade de composições de *syngas*. Para referência de análise do presente trabalho, foram escolhidas as composições mostradas na Tabela 6. São gases produzidos por três diferentes processos de gaseificação, utilizando ar como agente de gaseificação.

Tabela 6 – Composição do gás de síntese referente a três tipos de gaseificadores

Composição (%)	Tipo de gaseificador		
	Leito fluidizado	Contracorrente	Concorrente
H ₂ (%)	9	11	17
CO (%)	14	24	21
CO ₂ (%)	20	9	13
CH ₄ (%)	7	3	1
N ₂ (%)	50	53	48

Fonte: Bridgwater e Grassi (1991).

Ocorre gaseificação direta quando o agente oxidante é utilizado para oxidar parcialmente a matéria-prima. Se o processo não ocorre com um agente oxidante, é chamada de gaseificação indireta e precisa de uma fonte de energia

externa. Nesse caso, o vapor é o agente mais comumente usado, de acordo com Hauserman et al. (1997 apud FEO et al., 2002), por ser de fácil produção, além de aumentar a concentração de hidrogênio no gás produzido.

3.7.1 Fases da Gaseificação

A primeira fase em todos os processos termoquímicos é o aquecimento da partícula de combustível. Esta fase ocorre até a biomassa atingir uma temperatura próxima da temperatura do sistema. A taxa de aquecimento pode variar até 280°C, dependendo de vários fatores, entre eles o tamanho da partícula do combustível, tipo de alimentação e tipo de gaseificação. Durante os estágios iniciais do aquecimento, em que se verificam temperaturas baixas, a água é fisicamente adsorvida na superfície externa e contida nos poros da partícula, que vai evaporando. Uma vez que a vaporização consome energia, o que sucede é que a presença de água (umidade) no combustível contribui para a diminuição da velocidade de aquecimento. É por este motivo que o teor de umidade no combustível tem uma grande importância; daí, a necessidade de, em algumas circunstâncias, ser necessário efetuar a secagem da biomassa antes da sua utilização (BASU, 2006).

Existem três etapas termoquímicas principais: pirólise, combustão e gaseificação. Referem-se a processos de elevada temperatura, que decompõem um determinado combustível sólido ou líquido em substâncias mais simples em estado gasoso. Quando o processo é conduzido na presença de oxigênio suficiente, denomina-se combustão e dá origem a gases simples (principalmente CO₂ e H₂O) e cinzas, libertando calor. Na ausência de oxigênio ou na presença de quantidades limitadas, dá origem a gases simples, hidrocarbonetos leves e pesados, álcoois e ácidos carboxílicos, e a um resíduo carbonáceo; este processo é endotérmico, pelo que necessita de energia, normalmente fornecida pela combustão parcial; estas reações ocorrem no âmbito de um grupo de processos denominados de pirólise, gaseificação e liquefação. Para aplicação à biomassa, estes processos podem ser considerados individualmente e, dependendo das condições operatórias, produzir produtos específicos. No entanto, no processo de gaseificação, a pirólise e a combustão ocorrem, sendo neste caso, consideradas como fases da gaseificação e não como processos separados. A diferença entre combustão e gaseificação reside

no fato de, na combustão, ser fornecido ao sistema, quantidade de agente oxidante em excesso, e a gaseificação ocorrer em condições sub-estequiométricas. Esta situação irá provocar desigualdades na composição dos produtos formados.

O processo de conversão térmica de biomassa envolve alguns ou todos os processos descritos a seguir:

Pirólise: biomassa + calor = carvão vegetal, gás e óleo;(3.1)

Gaseificação: biomassa + oxigênio limitado = gás combustível;(3.2)

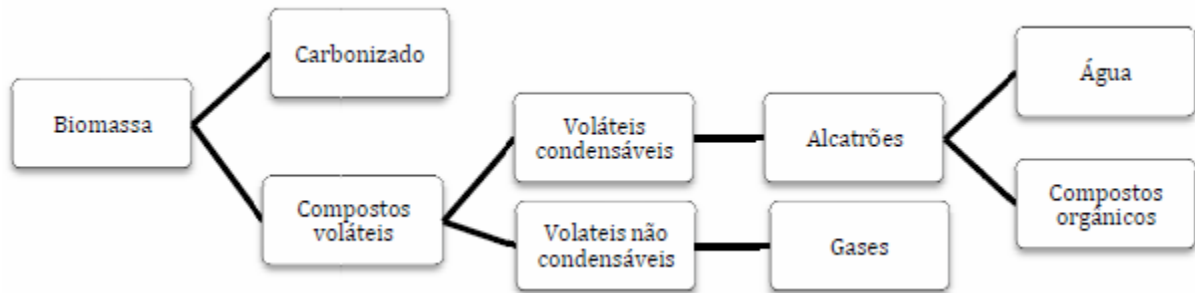
Combustão: biomassa + oxigênio estequiométrico = produtos da combustão.(3.3)

• Pirólise

A pirólise caracteriza-se por um processo físico-químico no qual a biomassa é aquecida a temperaturas relativamente baixas (500°C – 800°C) em atmosfera não oxidante, dando lugar à formação de um resíduo sólido rico em carbono (carvão) e uma fração volátil composta de gases e vapores orgânicos condensáveis, como pode ser visto na Figura 2. As proporções desses compostos dependem do método de pirólise empregado, dos parâmetros do processo e das estatísticas do material a ser tratado (BEENACHERS; BRIDGWATER, 1989 apud CORTEZ et al., 2008, p. 333).

A pirólise ocorre pelo processo de degradação térmica do combustível sólido, na qual pode ser em ausência completa do agente oxidante ou em quantidade tal que a gaseificação ocorra de forma produtiva. É sempre um dos primeiros passos nos processos termoquímicos, em que é seguido por total ou parcial oxidação dos produtos primários (BRIDGWATER, 2003). Os voláteis libertam-se durante a pirólise, logo não são necessárias temperaturas muito elevadas para ocorrer essa libertação.

Figura 2 – Produtos resultantes da pirólise da biomassa



Fonte: Adaptado de Di Blasi (2000).

Chum (1991 apud PEREIRA, 2009) descreve a pirólise de biomassa do seguinte modo: inicialmente, a superfície da partícula começa a se desidratar, e vapor de água, dióxido de carbono, ácido fórmico (ou ácido metanoico, CH_2O_2 – tóxico) e ácido acético são liberados. A libertação dos voláteis é resultado de uma série de reações químicas complexas, devido à decomposição térmica e cracking² da matéria orgânica, e separação de diferentes componentes em gases individuais (OGADA; WERTHER, 1995). Esta fase é influenciada pelo aumento da taxa de transferência de calor no interior da partícula de combustível, diminuindo o tempo de conversão e afetando a quantidade total de voláteis libertados e o tempo de residência no interior do gaseificador.

Em seguida, ocorrem as reações exotérmicas. Os gases combustíveis começam a libertar-se, e forma-se o carbonizado. Considera-se que a pirólise está completa à temperatura de 600°C.

O processo de reação dos produtos de pirólise com o agente de gaseificação é composto por várias reações, algumas bastante complexas, a maioria endotérmicas, que são apresentadas na Tabela 7.

² Processos termoquímicos que tornam hidrocarbonetos em outros mais simples.

Tabela 7 – Estequiometria e entalpias das reações do processo de gaseificação

	Eq.	Reações químicas	
Oxidação	4		$C(s) + O_2 = CO_2$
	5		$C(s) + \frac{1}{2}O_2 = CO$
Boudouard	6		$C(s) + CO_2 = 2CO$
Water-gas	7	Primária	$C(s) + H_2O = CO + H_2$
	8	Secundária	$C(s) + 2H_2O = CO_2 + 2H_2$
Metanação	9		$C(s) + 2H_2 = CH_4$
Water-gas shift	10		$CO + H_2O = CO_2 + H_2$
“Reforming” com CO₂	11		$CH_4 + CO_2 = 2CO + 2H_2$
	12		$C_nH_m + n CO_2 = 2n CO + \left(\frac{m}{2}\right) H_2$
	13		$C_nH_m + \left(\frac{n}{4}\right) CO_2 = \left(\frac{n}{2}\right) CO + \left(m - \frac{3n}{2}\right) H_2 + \left(\frac{3n}{4}\right) CH_4$
“Cracking”	14		$C_{n+p}H_{m+q} + (+xH_2) \rightarrow C_nH_{m+x} + C_pH_{q+x}$

Fonte: Adaptado de Pereira (2009).

As reações de combustão entre o carbono e o oxigênio (Eq. 4 e 5) são exotérmicas e, quando ocorrem em extensão adequada, fornecem energia necessária para os passos seguintes ou na forma de calor útil. Os produtos formados são o monóxido e dióxido de carbono, em diferentes proporções, em função da temperatura atingida. Numa atmosfera de baixa concentração de oxigênio, habitualmente usadas em gaseificação, produz-se frações mais elevadas de elementos não queimados, tais como CO, H₂, CH₄ e carbonizado, dependendo, ainda, da temperatura, do combustível considerado, do tipo e volume do agente de gaseificação utilizado.

O carbono sólido pode, ainda, reagir com o dióxido de carbono, segundo a reação de *Boudouard* (Eq. 6), produzindo CO.

As reações *water-gas* (Eq. 7 e 8) ocorrem entre o carbono e o vapor de água, são endotérmicas e favorecidas por elevadas temperaturas e pressão reduzida.

A reação de metanação ocorre entre o carbono e o hidrogênio (Eq. 9).

Water-gas shift (Eq. 10) propicia uma pequena alteração na composição da mistura gasosa obtida, especialmente sentida na razão CO/H₂.

Em fase gasosa, podem ainda ocorrer diversas reações de “*reforming*”

entre hidrocarbonetos e vapor de água ou CO₂, formando CO, H₂ ou metano (Eq. 11 a 13). Estas reações são reações endotérmicas que normalmente são consideradas para explicar a evolução das misturas gasosas a temperaturas mais elevadas.

Na reação de “*cracking*” (Eq. 14), por ação da temperatura, ocorre a quebra de ligações químicas em moléculas pesadas de hidrocarbonetos com a formação de radicais como espécies intermediárias e podem ainda envolver o consumo de hidrogênio, necessário para estabilizar as moléculas de hidrocarbonetos leves. (ANDRÉ, 2007).

• **Gaseificação**

Gaseificação é um processo termoquímico que converte um combustível sólido ou líquido num combustível gasoso, rico em H₂, CO e outros hidrocarbonetos, com ou sem influência de um agente de gasificação (Basu, 2006). Em geral, a gaseificação envolve a reação entre o carbono com ar atmosférico, vapor de água, dióxido de carbono ou uma mistura destes gases, a temperaturas elevadas, para produzir um produto gasoso que pode ser usado para gerar energia elétrica.

• **Impactos ambientais**

A gaseificação de biomassa, por ser uma oxidação parcial de resíduos orgânicos, tem como produto um gás composto basicamente de CO₂, CO, H₂, CH₄, N₂ e vapor d’água. E ao contrário do gerado pelo carvão, tem conteúdo de enxofre insignificante (KINOSHITA et al., 1997), e a maior preocupação ambiental seria com as cinzas e o alcatrão recolhidos. Nas aplicações mais usuais da gaseificação, pode-se desconsiderar a formação térmica de NO_x, pois a temperatura da chama do gás produto não ultrapassa 1100°C (JANSEN; KOPPEJAN; MEULMAN, 2002).

- **Razão de equivalência (RE)**

Na combustão, a quantidade de ar a fornecer é determinada pela estequiometria, ou seja, quantidade ideal para que todo o combustível se queime, e depende, também, da composição do combustível. Num gaseificador, o agente de gaseificação fornecido é apenas uma parte da quantidade estequiométrica. A qualidade do gás obtido de um gaseificador depende fortemente da RE, devendo ser significativamente menor que 1,0 para assegurar que não ocorra a combustão completa.

- **Temperatura**

A temperatura do leito afeta todas as reações químicas envolvidas na gaseificação. Irá depender do tipo de alimentação (umidade, PC, conteúdo em cinzas e outros, RE, agente de gaseificação, perdas de energia no reator, aquecimento externo, etc. (NARVÁEZ et al., 1996).

Quanto maior for a razão de equivalência, maior será a temperatura do leito, uma vez que irá haver uma maior conversão do carbonizado a gases de combustão completa, fazendo com que a temperatura aumente. Assim, o controle da temperatura num gaseificador é essencial para evitar a formação de CO_2 e H_2O e, assim, conseguir um gás rico em compostos com propriedades combustíveis.

- **Tempo de residência**

Para combustão completa, o tempo de residência da partícula dentro do reator deve ser superior ao tempo que a partícula de carbono sólida leva para ser completamente convertida em gás, fundamentalmente composto por CO_2 e H_2O . Este tempo depende da taxa de oxidação da partícula e de outros fatores, tais como temperatura de combustão e tamanho da partícula.

Na gaseificação, o objetivo é converter totalmente a partícula sólida em gás, sem, no entanto, deixar que se formem gases de combustão completa. Daí, vê-se a grande importância que o controle da quantidade de agente oxidante tem no processo de gaseificação, para o caso de se remover contaminantes, como

compostos de enxofre ou alcatrões, por exemplo; há que se ter em conta que estas operações requerem um tempo de residência do gás um pouco superior.

3.8 CLASSIFICAÇÃO E TIPOS DE GASEIFICADORES

De acordo com Sánchez (2010), um gaseificador deve ser capaz de produzir um gás combustível limpo e de alta qualidade a partir de uma larga variedade de combustíveis. Deve trabalhar eficientemente com pouca atenção. Deve ter custo compatível e ter durabilidade suficiente para uma aplicação requerida. Na prática, estes requisitos são mutuamente conflitantes, determinando que, para cada projeto individual, se faça um estudo relacionado ao combustível utilizado e ao uso final particular. Os gaseificadores podem ser classificados, segundo Ciferno (2002 apud SALES; ANDRADE; LORA, 2005), conforme pressão em atmosféricos ou pressurizados e segundo o leito, em fixo ou fluidizado e também pelo poder calorífico.

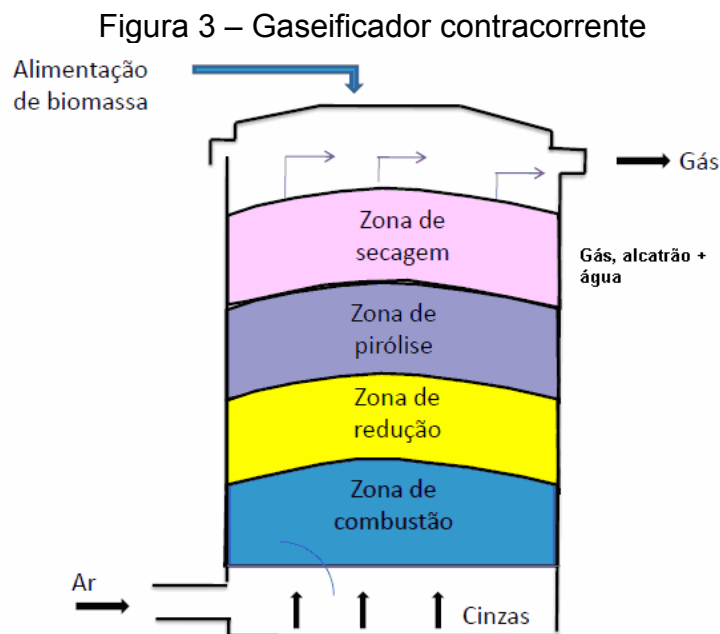
3.8.1 Gaseificadores de Leito Fixo

De acordo com Sales, Andrade e Lora (2005), esse sistema apresenta a vantagem de utilizar tecnologias simples, existindo um limite de dimensionamento de 10 a 15 toneladas por hora de biomassa seca, operando normalmente com temperaturas na ordem de 1.000°C na zona de combustão. Os gaseificadores de leito fixo são classificados de acordo com a direção do fluxo de ar em gaseificadores concorrente (*downdraft*) ou fluxo cruzado (*cross-flow*) e contracorrente (*updraft*). Considerados simples e eficientes, trabalham com combustíveis de alta densidade e granulometria (10 – 100 mm), sendo indicados para gaseificar carvão e madeira. Os gaseificadores de leito fixo são subdivididos em contracorrente, de fluxo cruzado e concorrente descritos a seguir:

• **Gaseificadores Contracorrente**

A alimentação é feita pela parte superior do gaseificador. O agente de gaseificação (ar) é introduzido na parte inferior. O combustível fica suspenso sobre a grelha por onde o ar (no caso) é injetado. A combustão completa realiza-se

no fundo do leito na zona de oxidação, formando CO_2 e H_2O ; há temperaturas em torno de 1000°C . Os gases quentes, em seguida, passam pela zona de redução, onde são reduzidos a H_2 e CO já saindo mais frio, em torno de 750°C . Mais acima do leito, mais precisamente na zona de pirólise, a reação faz a transformação da biomassa em alcatrão e outros produtos, pela gaseificação incompleta que ocorre nessa etapa. Nesse tipo de gaseificador, o gás percorre todo o leito até que saia; esse fato faz com que ele saia com uma grande quantidade de alcatrão e particulados, pois, após a pirólise, ele não sofre mais intervenção por outras zonas de reações, impedindo que esse alcatrão seja quebrado ou diluído. A Figura 3 exemplifica um gaseificador contracorrente.



Fonte: Lora e Haddad (2006).

• Vantagens:

– Simplicidade operacional, capacidade de gaseificar materiais com alto teor de umidade.

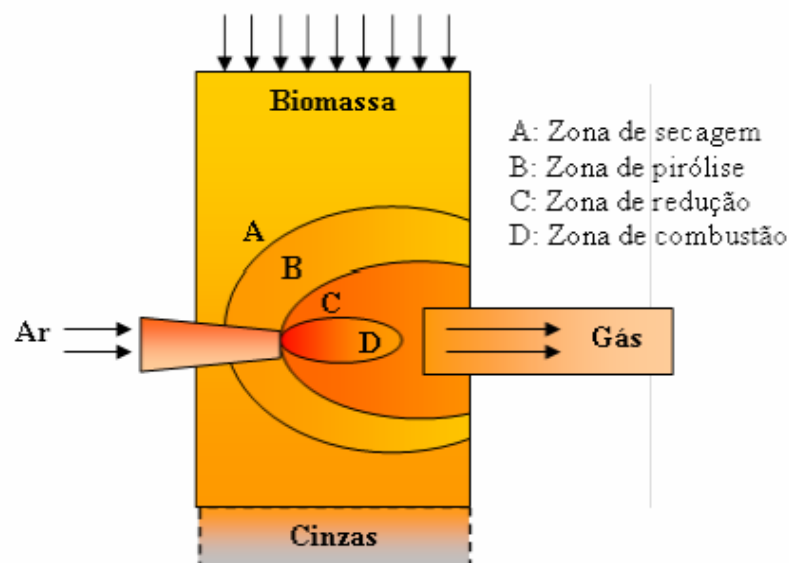
• Desvantagens:

– Para ser usado em motores de combustão interna ou turbinas, o alcatrão deverá ser removido da corrente gasosa em menos de 100 mg/Nm^3 (HASLER E NUSSBAUMER, 1999).

• Gaseificador de fluxo cruzado

Nos gaseificadores de fluxo cruzado, o combustível é fornecido pela parte superior do reator, enquanto o ar é alimentado por uma das paredes laterais. O gás gerado sai pela parede oposta na mesma direção em que foi fornecido. As zonas de combustão e gaseificação (ou redução) estão próximas à entrada do ar e à saída do gás energético obtido. As cinzas são removidas pela parte inferior do reator. O equipamento possui relativa simplicidade de construção e peso reduzido. O gás gerado apresenta um considerável conteúdo de alcatrão, pelo que a aplicação mais imediata está na produção de energia térmica. A Figura 4 representa um gaseificador de leito cruzado.

Figura 4 – Gaseificador de fluxo cruzado



Fonte: Cortez et al. (2008).

• Gaseificadores concorrente (*downdraft*)

Gaseificadores de leito fixo concorrente são os mais amplamente utilizados para essa aplicação, pois são capazes de gerar um gás mais limpo do que os outros tipos de reatores. Foram empregados em larga escala em automóveis, na época da segunda guerra mundial. Eles podem, e na maioria das vezes devem, operar com material de tamanho relativamente grande, quando

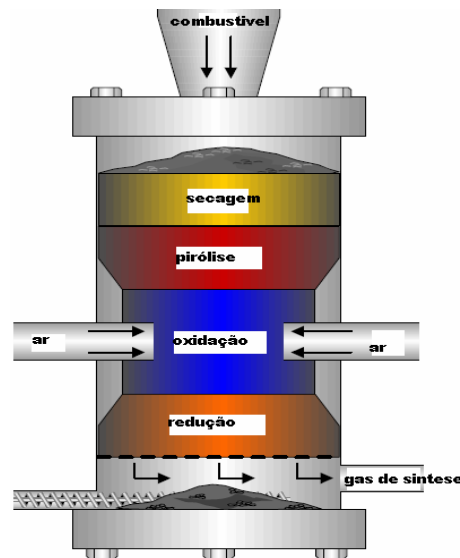
comparados com gaseificadores de leito fluidizado, por exemplo, que utilizam biomassa de baixa granulometria como a serragem. China e Índia possuem projetos desse tipo para casca de arroz.

Os gaseificadores concorrentes são constituídos de um vaso onde a alimentação do combustível é feita pela parte superior e o ar é introduzido em uma posição acima de uma região chamada garganta, sendo que o gás gerado passa através de uma grelha, que sustenta o combustível, e é posteriormente conduzido à saída.

Em se tratando de métodos de limpeza do alcatrão para o gás de síntese, há dois métodos: o chamado método primário e método secundário. No método primário, a limpeza ocorre internamente ao reator, já no momento da formação do gás, procurando melhorias no projeto do equipamento que permitam a redução da geração de alcatrão; o método secundário utiliza-se recursos externos ao reator, a fim de separar do gás o alcatrão já produzido.

Dá-se esse nome ao gaseificador devido ao fluxo de gás, que desce juntamente no mesmo sentido da biomassa, por efeito de gravidade e à abertura de saída do gás pela parte inferior. A alimentação do combustível é feita pela parte superior, e o agente gaseificador é insuflado na zona de oxidação. O gás de síntese é extraído logo abaixo da zona de redução. Neste tipo de gaseificador, as regiões são bem distintas, como a zona de secagem, de pirólise, de oxidação e de redução. Produzem uma quantidade de alcatrão relativamente baixa, pois o alcatrão produzido na região de pirólise sofrerá o “cracking” térmico, quando passar pela zona de combustão e oxidação de alta temperatura homogênea, porém, mesmo assim, o alcatrão pode escapar a frio sem a conversão. Outro inconveniente deste sistema é que uma grande parte do combustível de energia é convertida em calor, diminuindo o poder calorífico do gás de síntese produzido. A Figura 5 representa um gaseificador de leito fixo concorrente.

Figura 5 – Gaseificador de leito fixo concorrente



Fonte: Adaptado de Cortez et al. (2008).

• Vantagens:

- unidade simples, baratas e de fácil operação;
- alta eficiência na conversão do carbono;
- baixo teor de partículas de cinzas no gás;
- baixo teor de alcatrão no gás.

• Desvantagens:

- pouca possibilidade para controlar a região central da reação (somente movendo-se a grelha);
- requer um combustível uniforme para atingir operação ótima;
- baixa capacidade volumétrica.

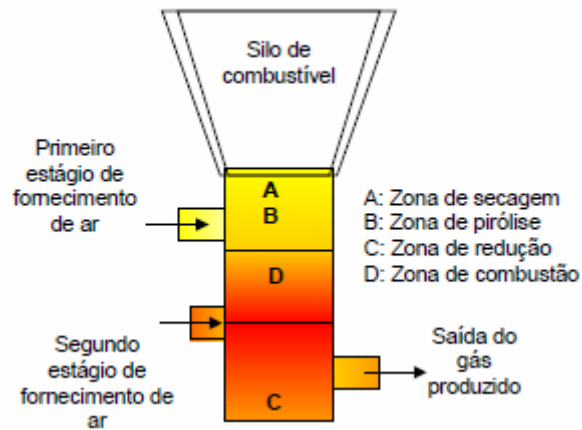
(BUECKENS; SCHOETERS, 1985 apud CORTEZ et al., 2008).

• **Gaseificador concorrente de duplo estágio**

O objetivo de implementar um segundo estágio de gaseificação (zona de oxidação) é eliminar a quantidade de alcatrão que não foi eliminado no primeiro estágio. Denominado de método primário para eliminação de alcatrão, possui vantagens significativas sobre o método secundário, como eliminar filtros e

sistema de lavagem do gás e diminuição do volume do sistema com conseqüente diminuição de custos e eliminação de efluentes, por exemplo. Sendo assim, alguns projetos têm sido desenvolvidos no sentido de aprimorar os reatores do tipo concorrente, criando o conceito de duplo estágio de gaseificação. A Figura 6X ilustra um exemplo de gaseificador concorrente de duplo estágio.

Figura 6 – Gaseificador de leito fixo concorrente de duplo estágio



Fonte: Adaptado de Cortez et al. (2008).

Existem dois conceitos de reatores de duplo estágio de gaseificação, um bem mais complexo, em que o combustível é primeiramente pirolisado em um reator externo, sendo seus voláteis parcialmente queimados e os produtos dessa combustão utilizados para gaseificar o carvão gerado no processo de pirólise. Essa tecnologia foi desenvolvida na Universidade técnica da Dinamarca, para a qual se mostram valores de 35 mg/Nm^3 para o teor de alcatrão no gás produzido.

O outro conceito de duplo estágio, mais simples, utiliza a injeção do agente de gaseificação em duas regiões do reator, criando duas zonas de alta temperatura, através das quais os voláteis da região de pirólise devem passar, provocando o craqueamento térmico do alcatrão, propiciando a geração de um gás mais limpo. A quantidade de alcatrão para esse tipo de reator pode atingir valores menores que 10 mg/Nm^3 , quando, em se tratando de ar como agente de gaseificação, for pré-aquecido à temperatura de 210°C (BHATTACHARYA, 1999).

Para um dado valor fixo da vazão de ar no primeiro estágio, o acréscimo da vazão de ar no segundo estágio resulta em uma diminuição do teor de

alcatrão com aumento dos percentuais de CO e H₂ do gás gerado (BHATTACHARYA, 1999).

O interesse em utilizar o gaseificador concorrente de duplo estágio é a praticidade de operação com relação ao de leito fluidizado, bem como a pequena quantidade de alcatrão produzida com relação aos outros (BHATTACHARYA, 1999).

3.8.2 Gaseificadores de Leito Fluidizado

Estudos em torno de gaseificadores de leito fluidizado aumentaram significativamente no final dos anos setenta, devido à crise do petróleo. Após a crise, quase todas as pesquisas sobre gaseificação foram interrompidas devido à economia. As indústrias que envolviam calor e energia, por outro lado, continuaram as pesquisas sobre o leito fluidizado.

Sales, Andrade e Lora (2005) descrevem gaseificadores de Leito Fluidizado tendo como característica um sistema de distribuição uniforme de temperatura e possibilidade de bom contato entre sólidos e gás, boa circulação das partículas de biomassa e velocidade de reação. Normalmente, utiliza-se um leito de areia com granulometria até 0,5 mm, que geralmente intensifica a troca de calor entre as partículas, aumentando a eficiência do processo. Permite trabalhar com uma ampla faixa de combustíveis sólidos, além de ser um sistema de maior capacidade produtiva. Essa categoria de gaseificadores é dividida, ainda, em leito fluidizado borbulhante (LFB) e em leito fluidizado circulante (LFC), podendo ser atmosférico ou pressurizado.

O agente de fluidização, geralmente o ar, normalmente é acionado em várias etapas. O ar primário é adicionado no fundo do leito fluidizado, sendo que este não pode ter uma velocidade muito baixa, ou seja, é necessária uma velocidade mínima de fluidização (VMF), para que o ar não apenas goteje na areia, não formando, assim, as bolhas necessárias.

Uma desvantagem para os combustíveis de biomassa utilizados em tecnologias de leito fluidizado é que, dependendo do material do leito e da composição do combustível, podem ocorrer problemas relacionados às cinzas, quando o sistema atingir temperaturas baixas. Problemas econômicos podem ser gerados devido a sua operação incorreta, pois todo o sistema deve ser interrompido, além de ser de difícil limpeza e substituição do leito fluidizante. Dentre eles,

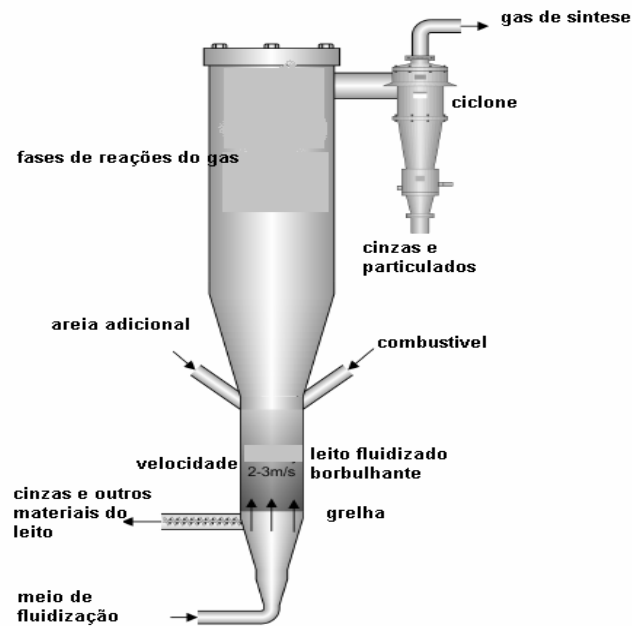
destacam-se gaseificadores de leito fluidizado borbulhante e gaseificador de leito fluidizado circulante. Existe um reator em leito fluidizado em operação na CIENTEC (Fundação de Ciência e Tecnologia) em Porto Alegre, RS, com capacidade para produzir até 1 MWth (Megawatt térmico) de gás combustível de baixo poder calorífico ou até 2 MWth de gás de síntese ou de médio poder calorífico. Neste laboratório, já foram ensaiados os seguintes combustíveis sólidos: carvão mineral gaúcho e catarinense, turfa, cavacos de madeira, casca de arroz, casca de coco de babaçu.

Os gaseificadores de Leito Fixo são divididos em duas categorias: Gaseificadores de Leito Fluidizado Borbulhante (LFB) e Gaseificadores de Leito Fluidizado Circulante (LFC), descritos a seguir.

- **Gaseificadores de leito fluidizado borbulhante**

A alimentação é feita acima do leito de areia e o agente de gaseificação é introduzido a partir do fundo, em velocidades de 2-3 m/s, resultando em borbulhas através do leito. A velocidade do agente de fluidização é de grande importância para o tamanho e velocidade das bolhas; assim, influencia a troca de calor entre a mistura e as partículas de combustível. O gás de síntese é retirado pela parte superior do reator através de um ciclone para separar areia e cinzas. A Figura 7 exemplifica o gaseificador de leito fluidizado borbulhante.

Figura 7 – Gaseificador de leito fluidizado borbulhante



Fonte: Adaptado de Milne et al. (1998).

Existe uma planta de gaseificação de biomassa com reator de leito fluidizado na Universidade Estadual de Campinas, SP (UNICAMP) com o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros de operação para diferentes tipos de biomassa, como casca de arroz, bagaço de cana, serragem e borra de café, por exemplo, destacando-se um poder calorífico superior de 21,8 MJ/kg para este último.

• Vantagens:

Estes reatores permitem altas taxas de transferência, superior aos de leito fixos. Eles também resultam em uma boa mistura cinética, otimizando a transferência de calor, bem como tempo de residência. Esses fatores contribuem para as taxas de carbono de alta conversão e, conseqüentemente, alta produtividade. Além disso, o conteúdo de alcatrão no gás de síntese é bastante baixo, embora não tão baixo como outros conceitos como gaseificadores *downdraft*.

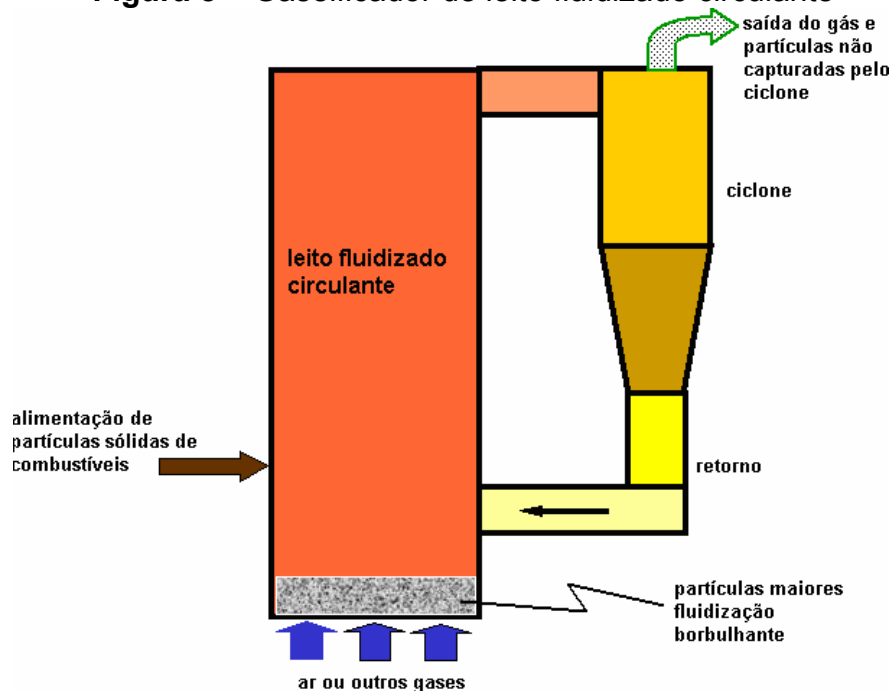
• Desvantagens:

O gás de síntese é rico em partículas. A tecnologia é bastante avançada, sobretudo com sobrepressão. Há perigo de aglomeração no leito quando da utilização de combustíveis de biomassa. Formação de bolhas grandes podem resultar em desvio de gás através do leito.

• Gaseificador de leito fluidizado circulante

Em Lahti, Finlândia, existe em operação gaseificador um de leito fluidizado circulante com capacidade de 40 a 70 MWth (Megawatt térmico), construído em 1976. Após 1986, foi convertido para operar com madeira e serragem. Neste tipo de gaseificador, as partículas arrastadas pelo processo interno de gaseificação são enviadas novamente para o leito. Devido ao maior tempo de residência das partículas, possui uma maior conversão de carbono. A Figura 8 representa o gaseificador de leito fluidizado circulante.

Figura 8 – Gaseificador de leito fluidizado circulante



Fonte: Cortez (2008).

Existem ainda outros tipos de gaseificadores, como de leito em suspensão, que requer a redução do material em partículas finas e que é considerado um procedimento de alto custo e de alto consumo energético, mas produzem gás quase isento de alcatrão a temperaturas de aproximadamente 1.500°C. Opera com pouco tempo de residência, em torno de segundos. Para a gaseificação em pequena escala, este tipo de gaseificação se torna inviável. O gaseificador com aquecimento externo é outro tipo de gaseificador em que não

existe uma relação custo/benefício muito boa, por necessitar de um agente externo, como eletricidade, combustíveis fósseis ou orgânicos para a geração do calor necessário.

A Tabela 8 apresenta as condições operacionais dos gaseificadores mais usuais, de acordo com Olofsson, Nordin e Söderlind (2005).

Tabela 8 – Condições operacionais dos gaseificadores mais usuais

Tipo de Gaseificador	contracorrente	concorrente (1 estágio)	Fluxo cruzado	Fluidizado borbulhante	Fluidizado circulante
Tipo de combustível	madeira	madeira	madeira	madeira	madeira
Alimentação de biomassa (ton/d) base seca	<10	<15	<1	5-180	10-110
Poder calorífico (MJ/Nm ³)	4 a 5 (ar)	5 (ar)	-	4,5 a 7,9(ar), 4 a 6 (ar e vapor) e 5.5-13 (O ₂ e vapor)	4 a 7 (ar)
Conteúdo de alcatrão (mg/Nm ³)	35000	500-1000	-	13500	baixo
Agente gaseificador	Ar, oxigênio ou vapor	Ar, em alguns casos pode-se usar vapor	ar	ar, oxigênio, vapor	ar, oxigênio, vapor
Pressão (bar)	atmosférica	atmosférica	atmosférica	1 a 35	1 a 19
Temperatura (°C)	300-1000	300-1000	300-1000	650-950	800-1000

Fonte: Adaptado de Olofsson, Nordin e Söderlind (2005).

Com a finalidade de alimentar um motor de combustão interna com o gás gerado no processo de gaseificação, o gaseificador que mais se adéqua para tal aplicação é o gaseificador de leito fixo concorrente, por ser particularmente apropriado para a gaseificação de madeira (MENDIS; STASSEN; STILES, 1989), devido à sua capacidade de produzir menos alcatrão no gás combustível final, além de ser de operação simples e estável. A disposição em sequência das zonas de secagem, pirólise, oxidação e redução faz com que os gases provenientes da zona de oxidação atravessem o leito de carvão a alta temperatura com um tempo de residência ideal para que sua composição se aproxime da composição de equilíbrio.

Observa-se pela Tabela 8, que o gaseificador concorrente apresenta vantagens sobre os outros, principalmente em se tratando de quantidade de alcatrão no gás produzido, utilizando ar como agente de gaseificação à pressão atmosférica.

3.9 ORGANIZAÇÕES DE PESQUISAS SOBRE A GASEIFICAÇÃO NO BRASIL

Várias universidades e órgãos de pesquisa brasileiros se dedicam a pesquisas sobre gaseificação, entre elas estão:

UNICAMP – Universidade de Campinas: reator de leito fluidizado instalado no Departamento de Engenharia Térmica e Fluídos (DETF) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEM) na UNICAMP. O ar é injetado na parte de baixo do reator por uma placa de orifícios com cerca de 2000 furos de 1,5 mm. A biomassa é introduzida no reator por uma rosca sem fim, refrigerada a água e instalada 50 mm acima da placa distribuidora. O gás, ao sair do topo do reator, passa por um ciclone que permite coletar particulados, passando, em seguida, por uma placa de orifício para a medida da vazão, até ser descarregado na atmosfera por uma chaminé. O material inerte do leito é formado por óxido de alumina branco (alumina).

Gaseificando-se cascas de arroz, observou-se que a maior eficiência a frio foi obtida para uma relação ar combustível (AC) na faixa de 1,43 a 2,8, chegando a mais de 35% de eficiência. Para uma mistura AC de 2,04, obteve-se uma eficiência máxima de 53,9%. Notou-se, também, a dependência entre os parâmetros AC e temperatura do reator, como se esperava, pois, com o aumento do combustível em relação ao ar, pode-se esperar um aumento nas taxas de reação, tornando as temperaturas mais elevadas.

Conclui-se, destes dados, que o fator de ar, ou relação AC, é o fator fundamental para o desempenho do reator. O AC ótimo depende do tipo de biomassa, sendo 1,89 para casca de arroz e de 4,00 para a serragem. Devido aos problemas com o sistema de alimentação de combustível, houve flutuação na qualidade do gás, confirmando o que outros pesquisadores já haviam observado em seus experimentos.

A utilização de biomassa fibrosa, por exemplo, bagaço de cana, apresentou sérios problemas na alimentação, exigindo um novo desenho de rosca do alimentador. Com base na experiência adquirida neste reator, o grupo de trabalho

da UNICAMP pretende desenhar um reator maior, diâmetro de 300 mm com capacidade de 100 a 120 KW. Com isto, será possível aprimorar o sistema de alimentação de combustível, a filtragem dos gases e elaborar uma sistemática mais adequada de partida do reator.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas: Existe no Laboratório de Combustão e Gaseificação do IPT um gaseificador de leito movente (também chamado de leito fixo), com diâmetro interno de 0,5 m e altura de 3 m, possibilitando alturas de leito de até 2,5 m. O reator é revestido internamente com refratário silicoaluminoso monolítico e seu corpo construído em várias partes, possibilitando diversas configurações: contracorrente, concorrente e com reciclo de gases de topo.

O leito de material em processamento apoia-se sobre uma grelha tronco cônica que gira excentricamente em relação à seção transversal do gaseificador. As cinzas resultantes escoam por gravidade por um espaço anular entre a grelha e a carcaça do gaseificador, caindo na bacia de selagem, que gira solidariamente a grelha.

Os sistemas de alimentação disponíveis são: um recipiente içado manualmente através de roldana e um sistema de transporte pneumático. Em qualquer dos casos, o material é depositado num pequeno silo, do qual é conduzido ao interior do reator pela manobra de duas válvulas motorizadas, intercaladas por um reservatório de transferência.

O gás gerado pode ser enviado diretamente a uma tocha ou, então, passar por um sistema de limpeza e, deste, ir para a tocha ou para outro equipamento onde deva ser utilizado.

Este equipamento já foi utilizado para muitas corridas, em operações com cavacos de lenha, carvão vegetal, turfa, carvão de casca de coco de babaçu, carvão mineral, bagaço de cana peletizado e resíduos florestais peletizados, totalizando mais de 2000 horas de operação. As máximas potências de operação estão por volta de 500 kW.

Atualmente, o IPT desenvolve, em parceria com o CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa, o BUN – Biomass Users Network do Brasil e a Universidade do Amazonas, o projeto GASEIFAMAZ “Comparação entre Tecnologias de Gaseificação de Biomassa Existentes no Brasil e no Exterior e Formação de Recursos Humanos na Região Norte”. Esse projeto é patrocinado pela

FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos, empresa de fomento do Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT).

UFPA – Universidade Federal do Pará: O Departamento de Engenharia Elétrica, juntamente com o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará (UFPA), vem desenvolvendo projetos de biomassa, como: Utilização de Resíduos da Flora Paraense para Produção de Briquetes Energéticos, Utilização de Resíduos da Flora Paraense para a Produção de Energia, Utilização de Resíduos de Madeira para a Produção de Vapor, Utilização de Resíduos da Flora Paraense para Obtenção de Produtos de Alto Valor Agregado, Utilização de Resíduos de Capoeiras para produção de Briquetes Energéticos.

Atualmente, a UFPA está desenvolvendo o “Programa ENERBIO / UFPA Utilização de Resíduos de Biomassa de Açaí e Cacau para a Produção de Energia”, sob coordenação da Prof^a. Dr^a. Brígida da Rocha. O projeto consiste em:

- obtenção do poder calorífico do açaí e do cacau;
- realização de testes através de gaseificação (gaseificadores importados do Indian Institute of Science);
- realização de testes de combustão direta;
- briqueteamento dos resíduos do cacau;
- briqueteamento dos resíduos do açaí;
- utilização de briquetes dos resíduos de cacau e açaí para a geração de energia.

Resultados esperados:

- melhoria na qualidade de vida da população;
- adequação as normas MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo);
- limpeza ambiental;
- geração e manutenção de empregos diretos e indiretos;
- viabilidade da qualidade de vida para gerações futuras;
- agregação de valor aos produtos;
- contribuição do acréscimo do PIB do estado do Pará, entre outros.

EFEI – Universidade Federal de Itajubá: A EFEI – Universidade Federal de Itajubá, sobre coordenação do Prof. Dr. Electo Silva Lora, em 2002 iniciou um trabalho no projeto de gaseificação financiado pela CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais, COPERSUCAR – Cooperativa de Produtos de Cana, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo Ltda e pela FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos. O gaseificador é de leito fluidizado circulante de 210 KW e é alimentado com casca de arroz, serragem e bagaço de cana.

3.10 A GASEIFICAÇÃO GERANDO ENERGIA ELÉTRICA

A densidade energética da biomassa é baixa se comparada com outras fontes como a do carvão e petróleo. Esta baixa densidade energética e a característica dispersa da produção da biomassa favorecem sua aplicação a uma conversão energética (eletricidade ou combustíveis) realizada em instalações descentralizadas, para evitar altos custos de transporte da biomassa. Uma visão geral do processo da geração de energia elétrica a partir da gaseificação de biomassa é a seguinte:

Energia Bioquímica (Biomassa) → Energia Térmica (Calor) + Energia Química (PC dos Gases) → Máquinas Térmicas gerando Potência Mecânica → Potência Mecânica (eixo) → Geradores Elétricos → Energia Elétrica.

Utilizando um motor ciclo diesel para uso híbrido com gás de síntese, pode-se substituir até 80% do diesel; os outros 20% são necessários para a ignição da mistura combustível. Exemplos são trabalhos desenvolvidos pela equipe do Prof. Mukunda, no Indian Institute of Science (MUKUNDA, 1993).

Para motor de ignição a centelha (Ciclo Otto), não é necessário um combustível auxiliar para a combustão do gás, mas o motor tem seu desempenho muito prejudicado se sua taxa de compressão não for adequada ao gás. Fossum et al. (2001 apud MURARO, 2006) quantificam a redução em aproximadamente 30% e sugerem modificações para otimizar o seu uso, como aumentar o diâmetro das válvulas, a altura dos pistões e a taxa de compressão, por exemplo.

3.11 ANÁLISE DE TRABALHOS EXISTENTES

Ângulo (2002) fez experimentos de gaseificação com casca de arroz em leito fluidizado com o objetivo de variar o fator de ar (FA), mantendo o tempo de residência (TR) do gás no leito constante, a fim de produzir a mesma quantidade de energia sem aumentar a concentração de CO₂ na atmosfera. Os objetivos foram inconclusivos, havendo uma variação de até 72% na sua eficiência.

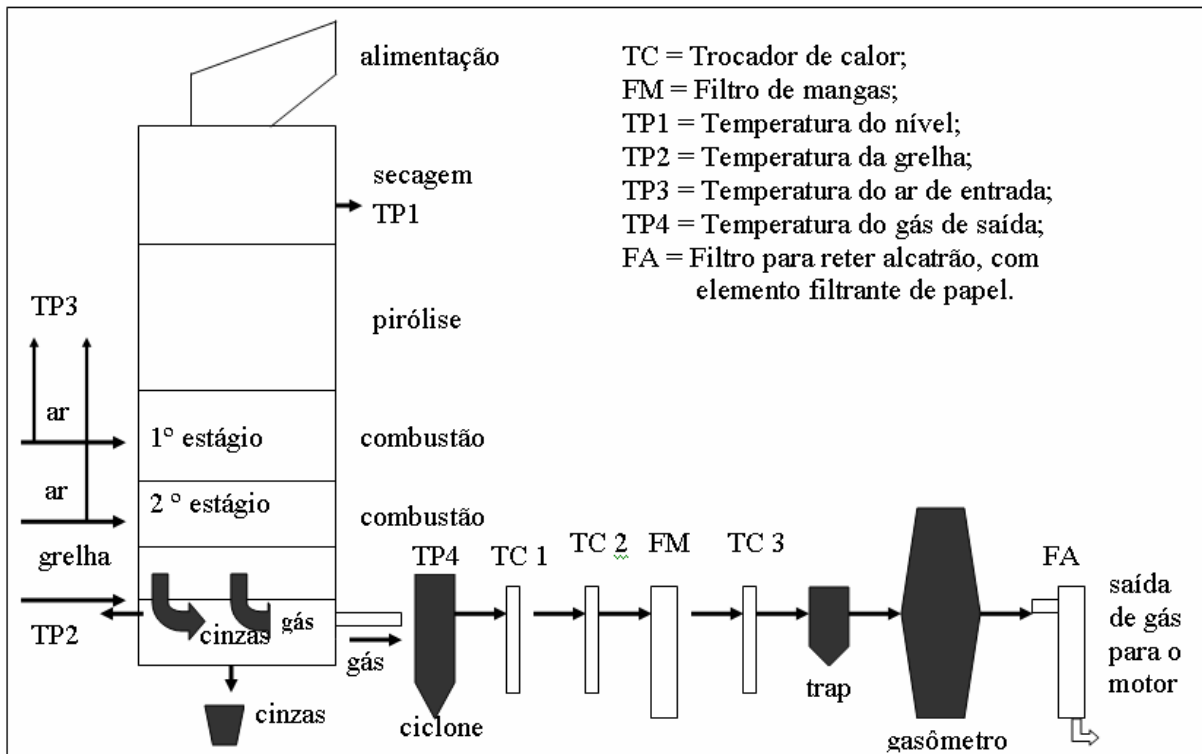
Makray (1984) estudou a “Gaseificação de Madeira em Gaseificador Concorrente para a Produção de Gás de Médio Poder Calorífico e gás de Síntese”, com o intuito de verificar as condições de operação do gaseificador para a produção de gás de síntese e de médio poder calorífico; estudar os efeitos da umidade da madeira e variar o agente de gaseificação em ar enriquecido com oxigênio, oxigênio puro e oxigênio e vapor. Os resultados comprovam a eficiência na utilização deste tipo de gaseificador para geração de gás de síntese com umidade da madeira de no máximo 20%. A vazão do agente de gaseificação não interfere significativamente na composição do gás, e como melhor agente gaseificador se destacou o oxigênio puro.

4 MATERIAS E MÉTODOS

4.1 GASEIFICADOR DE LEITO FIXO CONCORRENTE DE DUPLO ESTÁGIO UTILIZADO

Foi utilizado um gaseificador concorrente de duplo estágio (TERMOQUIP, 2009), cujo esquema pode ser visto na Figura 9. Os equipamentos de medição são calibrados de fábrica e o tratamento dos erros e incertezas não foram tratados, mesmo assim os ensaios contribuíram para demonstrar que o sistema de geração de eletricidade à partir da gaseificação de biomassa é funcional.

Figura 9 – Diagrama esquemático do gaseificador concorrente de leito fixo de duplo estágio de gaseificação



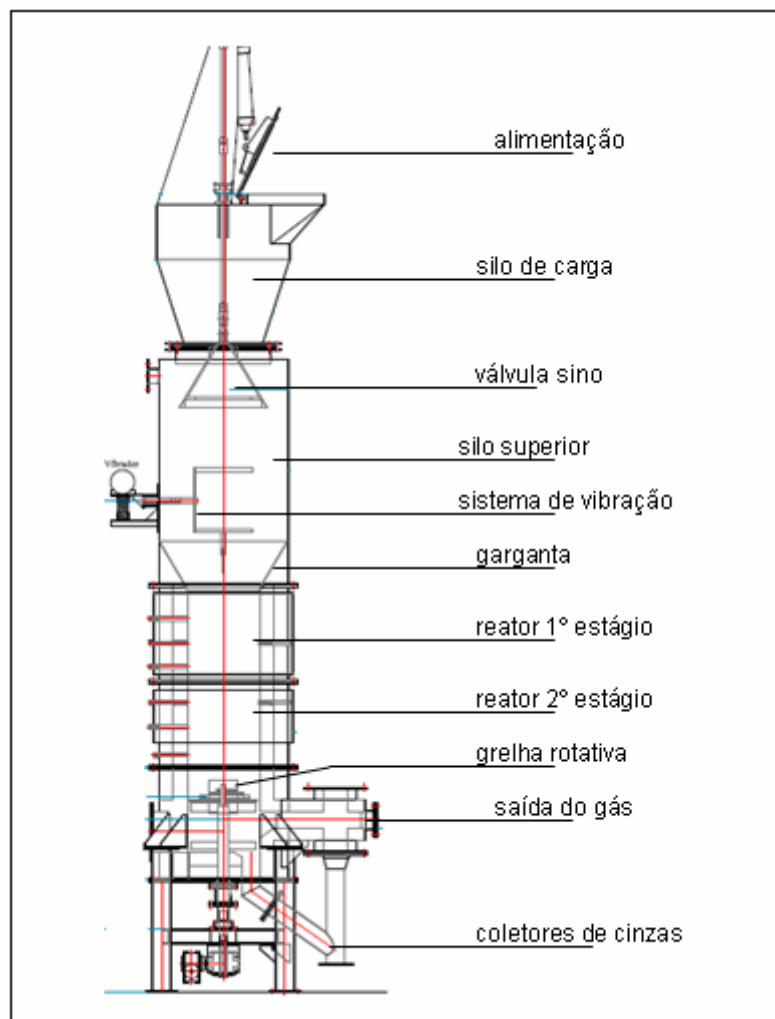
Fonte: O autor.

A construção é de forma modular, dividida em partes unidas por flanges e que requerem um projeto cuidadoso na zona de oxidação. A distribuição do ar no reator deve ser de tal forma que se forme uma zona de alta temperatura em toda a seção transversal do reator. A uniformidade da distribuição do ar na zona de oxidação é importante para evitar a presença de regiões frias que permitam a passagem do alcatrão sem craqueamento. A distribuição de ar no interior dos

estágios é feita utilizando-se bicos radiais na parede do reator, garantindo, assim, uma temperatura heterogênea nestas regiões.

Para o monitoramento das temperaturas, foram instalados termopares tipo K, de acordo com a Figura 8, em que o TP 1, no silo superior, informa o momento de efetuar uma recarga e é chamado de “temperatura do nível”; o TP 2 monitora a temperatura da grelha, que, de acordo com o fabricante, não deve ultrapassar os 800°C; o TP 3 monitora a temperatura do ar (agente oxidante) de entrada, tanto do 1º como do 2º estágios; e o TP 4 monitora a temperatura do gás de saída. A Figura 10 ilustra o gaseificador em si, com suas divisões e funções de operação. As temperaturas nas zonas de combustão e redução não foram monitoradas.

Figura 10 – Gaseificador concorrente de duplo estágio de gaseificação

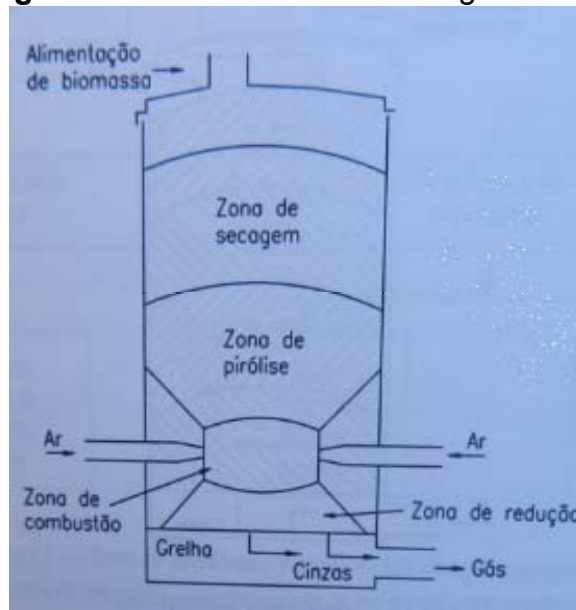


Fonte: Adaptado de Termoquip (2011).

O diâmetro interno do reator é reduzido na zona de combustão (Figura 10), criando uma “garganta” (revestida em material cerâmico), que aumenta a velocidade dos gases e facilita a manutenção da uniformidade de temperaturas na seção transversal, a fim de craquear o alcatrão que por ali passa. O gás é liberado diretamente na zona de redução (Figura 11).

A zona de secagem ou silo é um depósito interno; tem a função de dar ao gaseificador uma autonomia de operação, além de secar a biomassa pela temperatura ali atingida e possui um vibrador temporizado para contribuir na descida da lenha, funcionando de 4 em 4 minutos por 4 segundos. Superior a este silo se encontra o silo de carga, que se limita a ser um estoque de lenha, vindo a liberar esta lenha pela abertura pneumática de válvula em forma de sino.

Figura 6 – Divisão das zonas no gaseificador



Fonte: Cortez (2008).

Na zona de pirólise, inicia-se a produção do gás, além do alcatrão e particulados, tendo seu término na zona de redução. Todo carvão e lenha ficam suspensos pela grelha rotativa em forma de tronco de cone (Figura 15.a e 15.d), logo abaixo da zona de redução.

4.2 OPERAÇÃO DO GASEIFICADOR CONCORRENTE

Foram executados quatro ensaios (ou corridas) válidos distintos.

O primeiro teste ocorreu somente com o 1º estágio funcionado, por um período de 6 horas. Devido a imprevistos de funcionamento dos dois estágios simultaneamente, visto que neste dia seria efetuada a única análise dos gases, optou-se por não arriscar e comprometer o desenvolvimento do processo da análise do gás de síntese. Neste primeiro teste, a temperatura da grelha não foi monitorada, tomando-se como referência a temperatura do gás de saída.

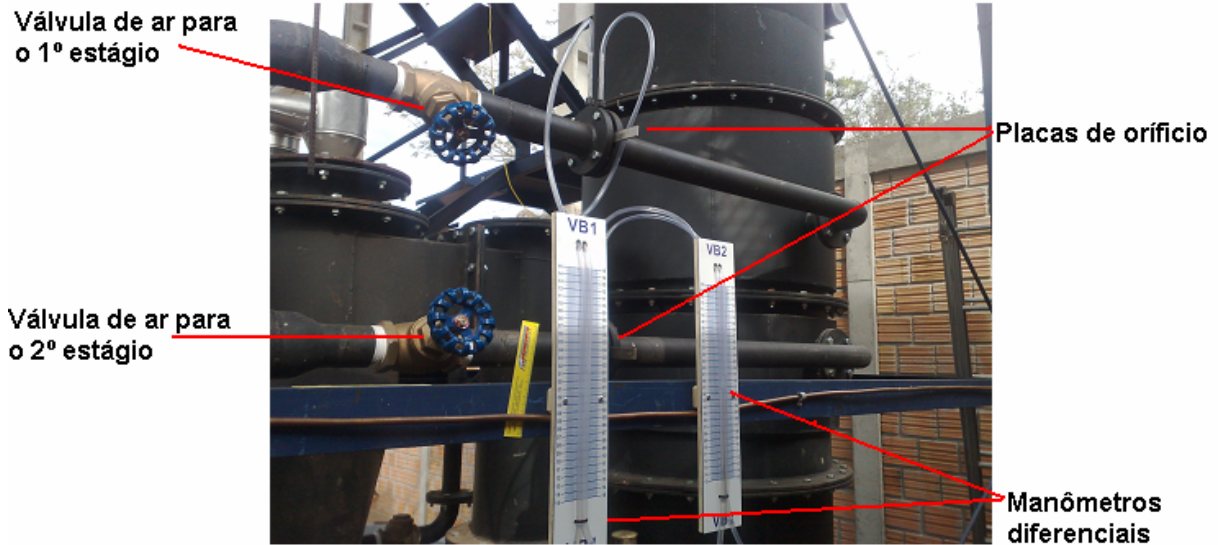
O tempo total do segundo teste foi de três horas, com o objetivo principal de monitorar a temperatura da grelha, já que esta pendência foi sanada, instalando-se um termopar tipo K nesta região e observando a temperatura máxima alcançada, e, também, de pôr em operação o gaseificador com os dois estágios de gaseificação.

Para o terceiro teste, foi retirada a válvula de vazão das cinzas, a qual bloqueava com o tempo seu escoamento para o depósito de cinzas, causando explosões no selo hídrico e interrupção na operação do sistema. Neste ensaio, o gaseificador foi operado com os dois estágios em funcionamento.

No quarto teste, também utilizaram-se os dois estágios de gaseificação, procurando manter a diferença de pressão medida em C.A. em 2 para o 2º estágio e 4 para o 1º estágio, de modo que o fluxo do primeiro seja maior que do segundo. O único imprevisto foi o entupimento do filtro de mangas com aproximadamente 25 horas de utilização total, não comprometendo o funcionamento do gaseificador anteriormente ao acontecimento.

Os ensaios de gaseificação foram feitos com ar atmosférico como agente gaseificador. A umidade da lenha variou de 11,37% a 16,42% durante os ciclos. A abertura de passagem de ar é feita por meio de válvulas (Figura 12), uma para cada estágio de gaseificação, e medida por meio de diferença de nível em C.A., que representa a pressão diferencial, por meio das placas de orifício instaladas na tubulação de ar após as válvulas, conforme se observa na Figura 12.

Figura 7 – Válvulas dosadoras de ar, placas de orifício e réguas escalonadas



Fonte: O autor.

Existem agregados que formam o sistema de gaseificação, além do preparo da madeira. O controle da vazão de ar é feito manualmente por válvula, procurando-se mantê-la constante, e monitorado pela diferença de pressão em coluna d'água em mm. No Quadro 2, é denominado o sistema de operação do gaseificador.

Quadro 2 – Descrição do sistema de gaseificação e componentes agregados

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); - filtro para conter alcatrão, com elemento filtrante de papel (FA).
Sistema de partida	- queimador de teste; - queimador de partida; - maçarico.
Sistema de aquisição de dados	- termopares; - temperaturas do agente gaseificador, da grelha, gás produzido e do nível; - rotação da grelha.
Sistema de refrigeração do gás	- torre de resfriamento.
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.

Fonte: O autor.

O reator de aproximadamente 6,82 m de altura e 260 mm de diâmetro externo e 150 mm interno é fabricado com chapas de aço carbono, revestido no interior, com concreto refratário isolante HVL 24 (Figura 13).

Figura 8 – Gaseificador concorrente de duplo estágio de gaseificação utilizado nos testes



* Aquece o agente gaseificador com o gás de saída.

** queimador provido de um piloto continuamente aceso para garantir a queima do gás combustível ao ar livre e em local seguro.

Fonte: O autor.

O sistema de alimentação de biomassa é composto por um silo de carga e silo superior. A passagem da biomassa do silo de carga para o silo superior dá-se por um sino que se abre (abaixa), quando da necessidade de complementar a quantidade de biomassa no silo superior, sendo que esse sino não tem ação quando a tampa do silo de carga esta aberta, por medida de segurança. A biomassa desce o leito do gaseificador por meio da gravidade com a ajuda de um sistema de vibração intermitente, com possibilidade de regulagem. As Figuras 14.a, 14.b e 14.c identificam o sino (fechado), sistema de alimentação cheio com a tampa aberta e sistema de vibração para a descida da biomassa, respectivamente.

Figura 9.a, 14.b, 14.c – Sino (fechado), sistema de alimentação (com madeira) e tampa aberta, sistema de vibração para a descida da biomassa



14.a



14.b



14.c.

Fonte: O autor.

A taxa de consumo de madeira foi realizada volumetricamente pela quantidade de recargas efetuadas no gaseificador, tanto em volume como em massa, tendo como padrão um recipiente de $0,1 \text{ m}^3$, equivalente a 30 kg de biomassa.

O conjunto para fornecimento do agente de gaseificação é o soprador Siemens com 3.405 rpm com vazão máxima de $2,8 \text{ m}^3/\text{min}$. O sistema de aquecimento deste ar é por trocador de calor com o próprio gás gerado e válvulas de controle de vazão. O sistema de retirada das cinzas dá-se por uma grelha rotativa (Figuras 15.a e 15.d), que pode ser ajustada para dar, no máximo, duas voltas completas por hora, em sentido horário ou anti-horário com ranhuras e lacunas para “raspar” as cinzas e enviá-las ao reservatório (Figura 15.b). A função de a velocidade da grelha ser variável se justifica pela determinação do tempo de residência da biomassa no leito do gaseificador. Alterando-se a velocidade da grelha, altera-se o tempo de residência e, consecutivamente, a composição do gás gerado. Ao lado do reservatório das cinzas, fica o reservatório de material particulado, retirado do gás, pelo ciclone (Figura 15.c) num pré-processo de filtragem.

Figura 10.a, 15.b, 15.c, 15.d – Grelha instalada, reservatório de cinzas e particulado, ciclone, grelha antes de ser instalada



15.a



15.b



15.c



15.d

Fonte: O autor.

Além do ciclone (Figura 15.c), existe o filtro de mangas, para uma limpeza mais eficiente do gás produzido. Seu princípio de funcionamento consiste na introdução do gás contaminado no corpo central do filtro, através de uma antecâmara devidamente dimensionada, no sentido de evitar o choque direto do particulado com as mangas, assim como reduzir a velocidade do fluxo e precipitar, por efeito de gravidade, o particulado de maior granulometria. O gás, ainda contaminado, é então conduzido para o interior do corpo central e forçado a passar através das mangas de filtragem, local de retenção do particulado ainda em suspensão. Na sequência, o gás, já isento de impurezas, passa para parte superior, saindo do filtro por meio de bocal(ais) localizado(s) em uma de suas laterais.

Para concluir o sistema de limpeza básico, pode haver um incremento de filtros ou outros dispositivos de tratamento do gás, por exemplo, o *trap* (Figura 16), que contribui na remoção da umidade do gás. Consiste num equipamento de aço de 163 mm de diâmetro por 540 mm de altura por onde o gás entra, se condensa e sai com menos umidade, além de recolher a umidade contida na tubulação, já condensada anteriormente pelo trocador de calor (resfriador do gás). Após a passagem do gás pelo *trap*, ele passa pelo gasômetro, a fim de manter a estabilidade da pressão para posteriormente ser enviado ao motor.

Figura 11 – Trap

Fonte: O autor.

Após a passagem do gás pelo ciclone, ele é queimado no “flare” (Figura 17), que tem a função de eliminar o excesso ou simplesmente queimar o gás quando não está sendo utilizado, evitando sua eliminação na atmosfera. Este queimador é ligado a um bico alimentado com gás liquefeito de petróleo (GLP), que, por motivo de segurança, fica todo o tempo ligado; ao seu lado fica a “chama piloto”, por onde se observa a qualidade do gás, de acordo com a chama e sua autonomia de queimar por si só (Figura 17).

Figura 12 – Queimador (flare) e “chama piloto”



Fonte: O autor.

As temperaturas foram medidas utilizando termopares tipo K na região do nível da carga, da grelha, do ciclone, como temperatura do gás de saída e da tubulação do ar de entrada, sendo informadas em display digital.

O processo detalhado de operação de ligar e desligar o sistema estão no Apêndice A.

4.3 BIOMASSA UTILIZADA

A biomassa utilizada no processo de gaseificação do teste foi madeira de eucalipto cortado em pedaços cilíndricos, com diâmetro de 8 cm e altura de 9 cm, volume de 452 mm³ aproximadamente (Figura 18) e umidade média de 16,42%, de um total de cinco pedaços retirados aleatoriamente da pilha e medidos com um Higrômetro Digisystem DL 2000. A lenha é disponível em grande quantidade, de forma física e espécie homogênea. As características da composição da lenha de eucalipto foram retiradas da literatura e são descritas na Tabela 9,

sendo que, pela análise imediata, é considerada antes de ser feita a sua combustão e, na análise elementar, após sua combustão.

Figura 13 – Lenha de eucalipto utilizada no processo de gaseificação



Fonte: O autor.

As dimensões da madeira influenciam diretamente sobre o escoamento do material sólido no gaseificador, afetam também a penetração dos jatos de ar no leito e a velocidade de pirólise da partícula. Tanto partículas excessivamente pequenas como as muito grandes, podem resultar em teores elevados de alcatrão no gás. Para o primeiro caso, por causa da deficiência de penetração de ar no leito devido a sua baixa porosidade e, no segundo, devido ao longo tempo necessário para a pirólise completa.

Tabela 9 – Composição imediata e elementar da lenha 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	0,3
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).

Após o fim da operação do gaseificador, seriam coletadas as cinzas e o material particulado do ciclone para fazer análise da quantidade da massa gerada de resíduo, por meio de pesagem dos mesmos, porém, como nesta corrida, o gaseificador enfrentou problemas de eliminação das cinzas, o óbvio foi desconsiderar estas grandezas. O condensado do *trap* foi colhido após o ciclo e dosado com um béquer.

A reposição de lenha fica condicionada à elevação da temperatura do nível, chegando ao máximo em 85°C; dessa forma, a temperatura do nível (ver Figura 9 – TP 1) diminui, pois a temperatura da lenha é menor que do interior do gaseificador, criando uma isolação, até que essa camada seja consumida.

4.4 GRUPO GERADOR

4.4.1 Motor

Para compor um grupo gerador de 50 kVA (45 kW), com motor ciclo Otto, é necessário um motor com potência maior que os disponíveis no mercado. Deste modo, foi preciso adaptar um motor ciclo Diesel com as especificações necessárias, transformando-o em ciclo Otto, já que o intuito não é funcionar com diesel, nem mesmo parcialmente.

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 isócrono 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 marcha 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 no teste é o da Figura 19.

Figura 14 – Grupo gerador



Fonte: O autor.

O sistema é regulado para 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. O Quadro 3 resume as principais características do grupo.

Quadro 3 – Resumo das principais características técnicas do motor utilizado nos ensaios

Motor MWM D 229-4	
Aspiração	natural
Disposição / cilindros / válvulas	Linha / 4 / 8 válvulas
Cilindrada total	3.92 Litros
Diâmetro X curso	102 x 120 mm
Taxa de compressão	11:1
Sistema de ignição	ER-BR
Misturador ar/combustível	Mixer 50

Fonte: Adaptado de ER-BR (2010).

O monitoramento do motor é feito por instrumentos de medição que o auxiliam no bom desempenho e acusam falhas em seu funcionamento, como superaquecimento e rotação, por exemplo. O quadro de instrumentos e ignição é mostrado na Figura 20.

Figura 20 – Indicadores de parâmetros variáveis do motor e ignição



Fonte: O autor.

As Figuras 21 e 22 representam o misturador de combustível e corpo borboleta respectivamente, que têm por finalidade dosar a quantidade de ar/combustível que vai para o cilindro, de acordo com a carga aplicada.

Figura 15 – Misturador

Fonte: Autoria própria, 2011.

Figura 16 – Corpo borboleta

Fonte: Autoria própria, 2011.

4.4.2 Gerador

Foi utilizado o gerador Kohlbach KCEL acoplado ao motor. Trata-se de um trifásico síncrono “brushless”, devido ao fato de que neste tipo de gerador o regulador se adéqua 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 sobrevelocidade. 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, ele 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 pelo Quadro 4. Essas limitações são para preservar o desgaste prematuro do equipamento.

Quadro 4 – Características do gerador

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

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

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

Fonte: MWM (2011)

4.5 BANCO DE CARGAS

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 23. 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 fervera, interrompendo os testes.

Figura 17 – Banco de carga puramente resistiva trifásica



Fonte: O autor.

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 gasto geral do sistema após um ciclo de operação.

4.6 EQUIPAMENTOS E MÉTODOS DE ANÁLISE DO GÁS DE SÍNTESE

O conjunto de amostragem do gás tem por finalidade retirar amostras de gás diretamente da tubulação de saída do gaseificador em pontos diferentes, sendo aspirado por bomba a vácuo 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 (O_2 – comburente e não combustível) no gás de síntese foi feita pelo equipamento Servomex 570A, e detector paramagnético. Para determinação da quantidade de monóxido de carbono (CO – levemente inflamável), metano (CH_4 – combustível), nitrogênio (N_2 – inerte) e dióxido de carbono (CO_2 – liberado da queima de combustíveis), foram utilizados cromatógrafo gasoso SRI, modelo 8610C e, para o hidrogênio (H_2 – combustível), cromatógrafo gasoso marca Varian modelo CG 3400, por meio de detecção por condutividade térmica. O argônio foi utilizado como gás de arraste. A análise foi feita pela White Martins e a descrição completa dos procedimentos pode ser vista com mais detalhes no Anexo 1.

Os pontos de coleta e número de amostras utilizadas foram: antes do filtro de mangas, uma vez; antes do gasômetro, três vezes; chama piloto, três vezes (gás sem intervenção de filtros e trocadores de calor); escapamento do motor (determinar a quantidade de elementos não queimados), uma vez, e, após o gasômetro (ponto em que o gás não sofre mais intervenções, indo direto para o motor (Figura 24)), cinco vezes. Foi utilizada uma bomba de sucção (Figura 25) 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.

Figura 18 – Ponto de coleta de gás após o gasômetro



Fonte: O autor.

Figura 19 – Bomba de sucção



Fonte: O autor.

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.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 TAXA DE ALIMENTAÇÃO DE BIOMASSA

A carga inicial do gaseificador foi de 0,1 m³ (30 kg) de carvão vegetal, ou o carvão resultante da última operação e 0,3 m³ (90 kg) de biomassa. A associação entre o volume e a massa foi feita a través de um recipiente de 0,1 m³ cheio de biomassa, incluindo os vazios e sua pesagem. As recargas eram efetuadas quando a temperatura do nível do gaseificador atingia 85°C. A taxa de alimentação de biomassa foi monitorada para os quatro testes.

A Tabela 10 apresenta as recargas em função do tempo no primeiro teste.

Tabela 10 – Recargas efetuadas em função do tempo

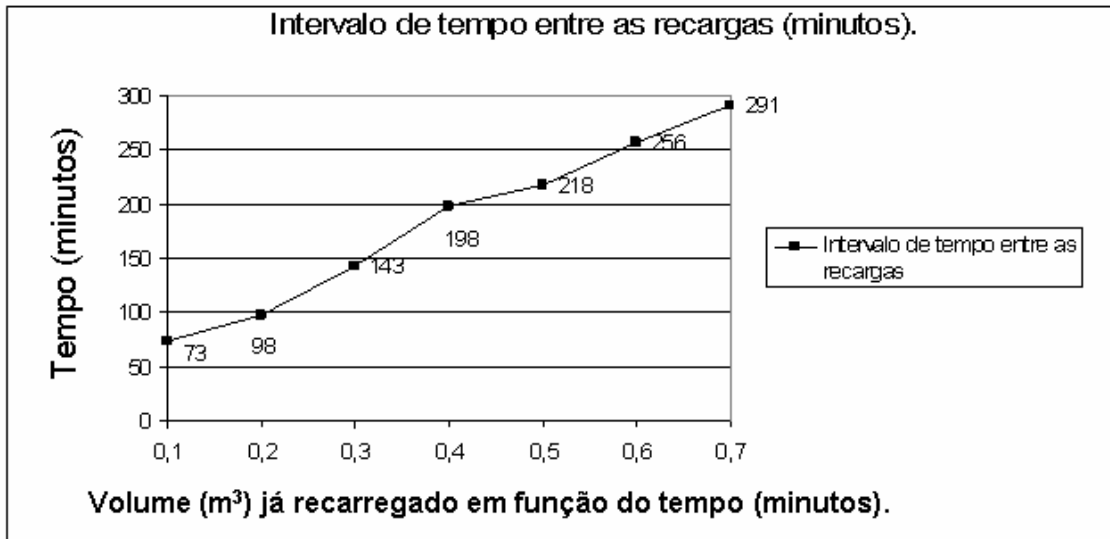
Tempo (horas)	Tempo (min.)	Recargas	Volume (m ³)	Peso (Kg)
10:22*	0	0	0,3	90
11:35	73	1	0,1	30
12:00	98	2	0,1	30
12:45	143	3	0,1	30
13:40	198	4	0,1	30
14:00	218	5	0,1	30
14:38	256	6	0,1	30
15:13	291	7	0,1	30
16:25	363	fim	-	-
Média	-	≅1rec/51 min.	≅1m ³ /45min.	≅0,82 kg/min.

* início do ciclo.

Fonte: O autor.

Durante todo o ciclo de operação, que foi de 363 minutos, foram utilizados 300 kg de biomassa, tendo uma média de 49,6 kg/hora (0,16 m³/h), com recargas a cada 43 minutos, na média, de acordo com a Tabela 10.

Pode-se observar o consumo de biomassa em função do tempo de operação do gaseificador. O Gráfico 5 mostra o intervalo de tempo entre as recargas realizadas.

Gráfico 5 – Volume de recarga em função do tempo

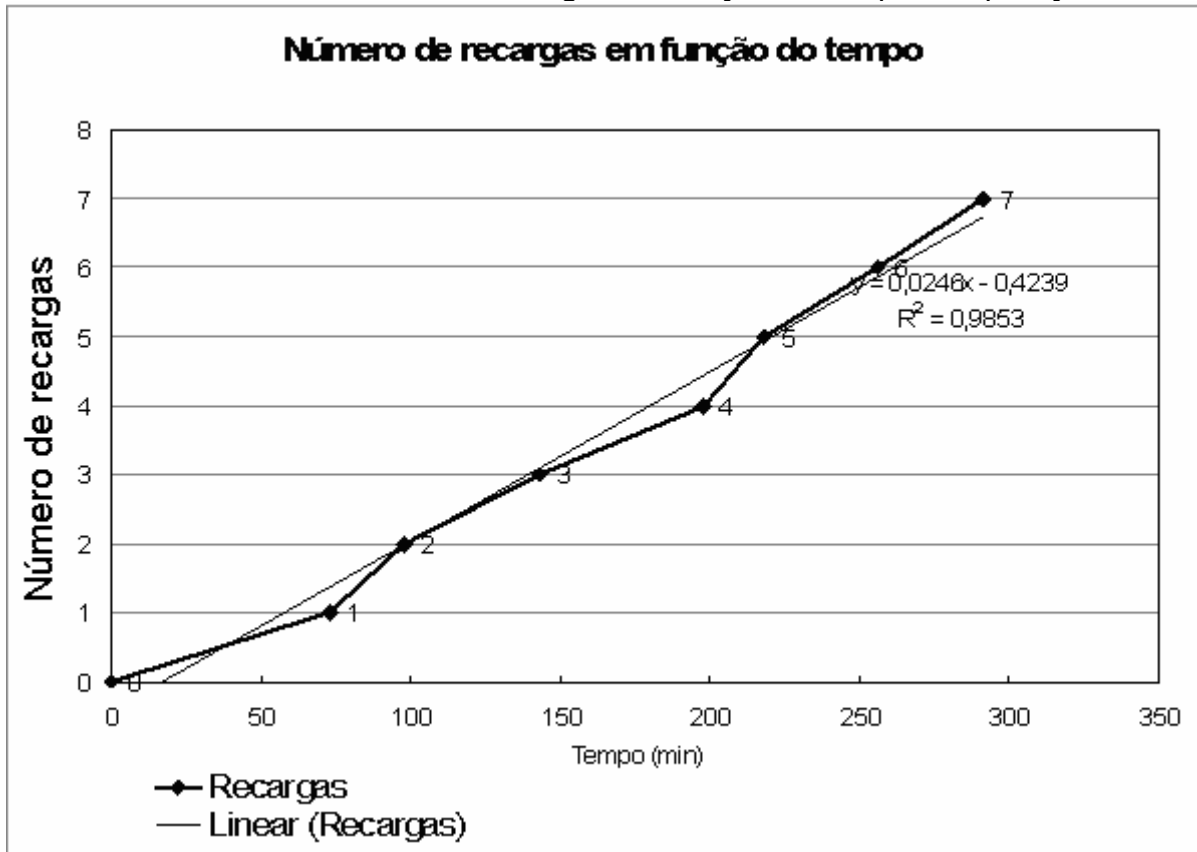
Obs.: após 248 minutos de operação do gaseificador, o motor passa a consumir gás de síntese.

Fonte: O autor.

Em função do tempo, a quantidade de recargas se torna quase linear. Mesmo com o motor consumindo gás, a partir de 248 minutos (4 horas e 4 minutos), não houve alteração no número de recargas. O momento de ser recarregado é definido quando a temperatura do nível chega aos 85°C (ou próximo); isto significa que a lenha já foi parcialmente consumida, diminuindo a camada isolante entre a zona de combustão e o termopar localizado na região superior do silo de carga. A média de tempo entre as recargas foi de aproximadamente 36,33 minutos e de temperatura para as recargas foi de 72,1°C, após o sistema se estabilizar.

O Gráfico 6 apresenta o número de recargas em função do tempo e, também, a Linha de tendência estatística, a qual exhibe a tendência em dados e possibilita prever problemas futuros. Esta análise também é chamada de análise de regressão e é capaz de fazer uma estimativa da relação entre variáveis, para que determinado valor possa ser previsto a partir de uma ou mais variáveis diferentes.

Gráfico 6 – Número de recargas em função do tempo de operação



Fonte: O autor.

Usando a análise de regressão, podemos estender uma *Linha de tendência estatística* em um gráfico além dos dados reais para prever valores futuros. Com esta curva, é possível precisar em 98,53% o tempo da próxima recarga em função dos dados colhidos durante o ciclo.

No segundo teste, o tempo total decorrido foi de 3 horas, com o objetivo principal de elevar a temperatura da grelha e funcionar o sistema com os dois estágios. Além da carga inicial de 90 kg, foi efetuada somente uma recarga após 1 hora e 50 minutos do início da operação com a temperatura do nível em 84°C. O consumo médio de combustível durante o teste foi de 40 kg/h, considerado baixo, devido ao pouco tempo de operação do sistema, sem que ainda estivesse estabilizado. No momento em que foi desligado, já estava próximo da 2ª recarga, em 76°C.

A duração total do terceiro teste foi de 11 horas, com uma soma de 14 recargas mais a carga inicial de 90 kg, originando um consumo médio de 46,36 kg/h de combustível. A média de tempo entre as recargas foi de 42 minutos.

No quarto teste, o tempo total de operação foi 6 horas, o consumo de combustível foi de 50 kg/h, somando 10 recargas, perfazendo a média de uma recarga a cada 36 minutos.

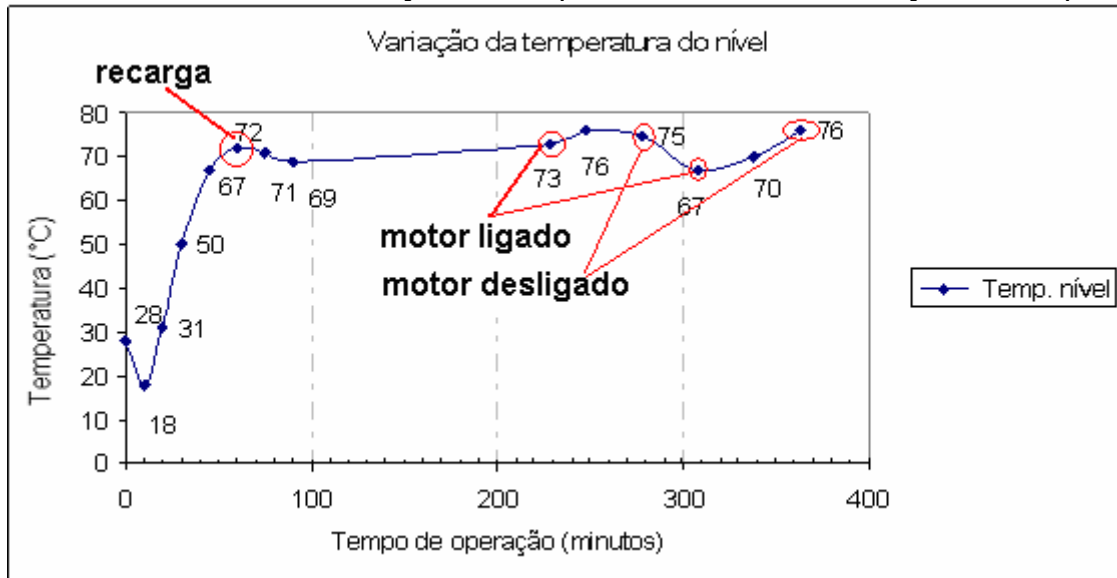
5.2 MONITORAMENTO DAS TEMPERATURAS E COMPOSIÇÃO DO GÁS

Um parâmetro importante para compreender as reações que ocorrem no interior do gaseificador é a temperatura. Por meio dela, pode-se estimar em qual região está ocorrendo a pirólise, onde há combustão, o momento de recarga, a temperatura do gás de saída, a temperatura do ar de entrada e o momento de estabilização. Para o monitoramento das temperaturas, foram instalados termopares nessas regiões, incluindo a região da grelha (excluindo o primeiro teste), que representa a temperatura de referência de todo o sistema.

Primeiro teste:

- Temperatura do nível (Gráfico 7):

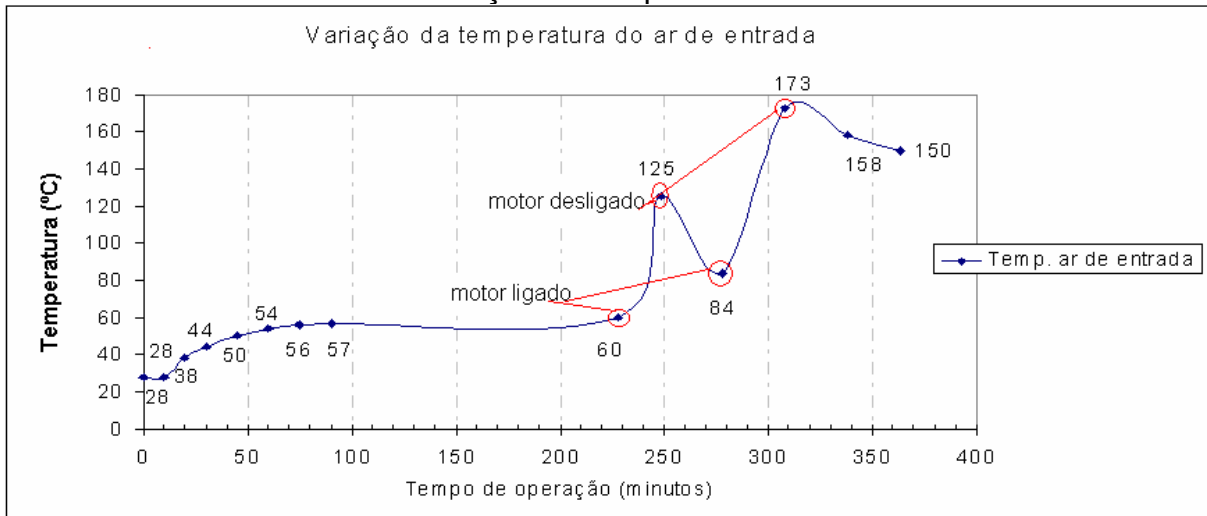
Verifica-se, pelo Gráfico 7, que no início da operação a temperatura do nível está em 28°C, caindo para 18°C após o início da aeração e elevando-se aos 72°C até que se efetue a segunda recarga, tendo uma pequena queda para 69°C e voltando a elevar-se até 73°C em 230 minutos, momento em que o motor é ligado, contribuindo para que a temperatura se eleve mais, devido à diminuição de volume de gás no interior do gaseificador, alcançando os 75°C, sendo desligado neste momento e fazendo com que a temperatura caia a 67 ° C, momento este em que o motor é ligado novamente, fazendo com que a temperatura suba ao máximo de 76°C. A diminuição ou o aumento do volume de biomassa interfere na variação da temperatura do nível, o que é de se prever, e o motor em funcionamento também o faz, devido ao aumento ou diminuição do volume de gás no interior do gaseificador.

Gráfico 7 – Variação da temperatura do nível em função do tempo

Fonte: O autor.

- Temperatura do ar de entrada (Gráfico 8):

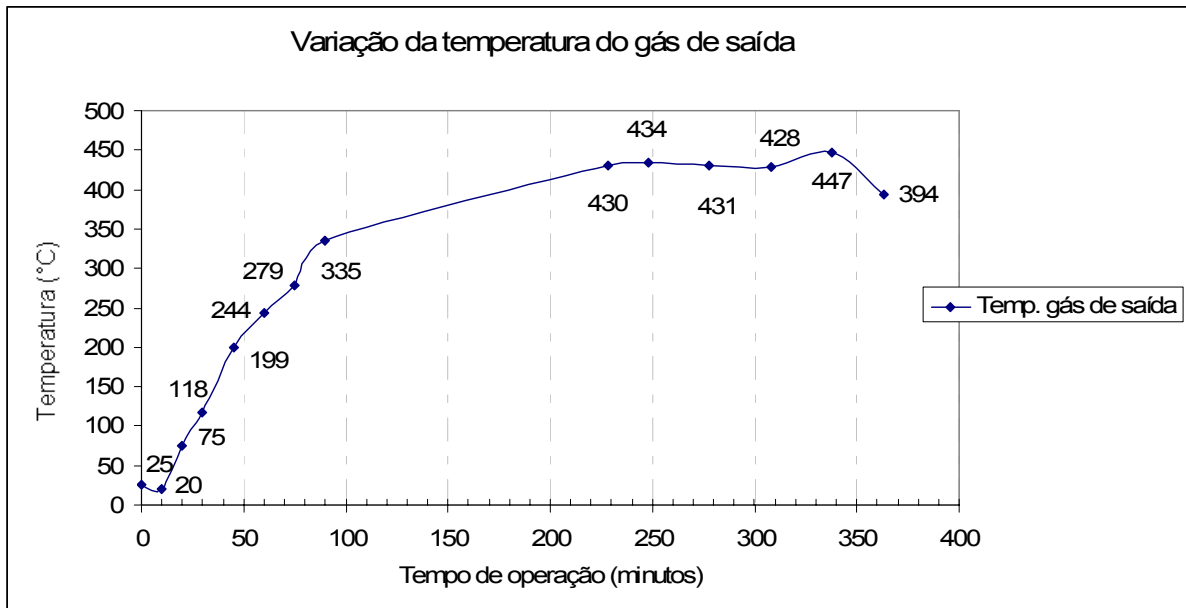
A temperatura do ar de entrada (Gráfico 8) se elevou a 57°C em 90 minutos, mantendo-se praticamente estável por mais 130 minutos na média dos 60°C, subindo a 125°C com o motor ligado. Isso deve-se ao fato de a temperatura do gás de saída também ter aumentado e, como este passa pelo trocador de calor com o ar de entrada, também se aquece mais. Aos 250 minutos, o motor é desligado, fazendo com que a temperatura diminua aos 84°C. Ligando novamente o motor, a temperatura vai para 173°C aos 310 minutos, sendo reduzido a 150°C até o fim do ciclo, com 363 minutos. A variação da carga aplicada ao grupo gerador também interfere nas temperaturas, pois, conforme se varia a carga no motor, o consumo de combustível também varia.

Gráfico 8 – Variação da temperatura do ar de entrada

Fonte: O autor.

- Temperatura do gás de saída (Gráfico 9):

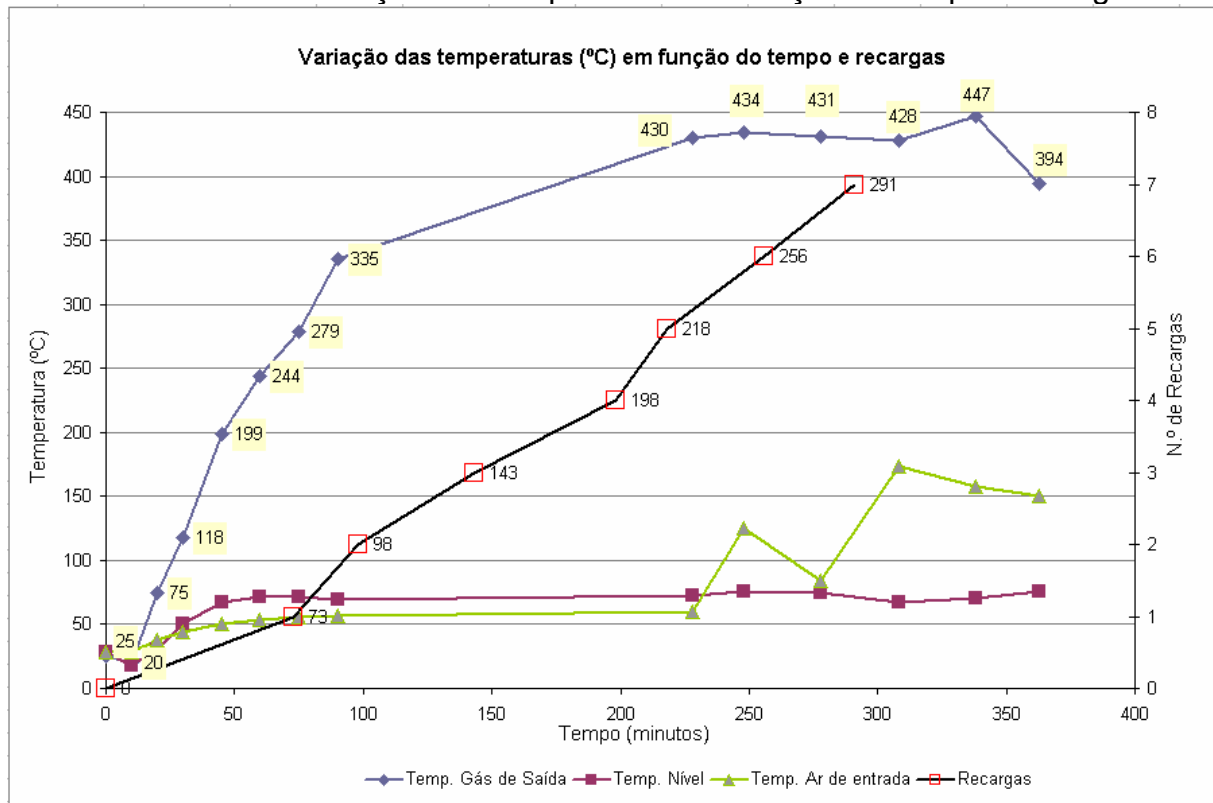
Observa-se, pelo Gráfico 9, que a temperatura do gás de saída, teve um aumento brusco de 335°C em 80 minutos, que se refere ao tempo de aquecimento do sistema até que se estabilize, subindo mais lentamente até os 430°C aos 230 minutos, tendendo a se estabilizar nesta faixa com o motor ligado. Houve um declínio entre 280 e 310 minutos, de 431°C para 428°C, momento em que o motor é desligado. Aos 310 minutos, o motor foi novamente ligado, contribuindo com que a temperatura se elevasse aos 447°C, aos 340 minutos. Quando se desliga o motor definitivamente, a temperatura diminui em 53°C em 20 minutos. Pequenas oscilações ocorrem devido à quantidade de carga aplicada ao motor.

Gráfico 9 – Variação da temperatura do gás de saída

Fonte: O autor.

A influência da temperatura é relacionada diretamente com a composição, umidade e quantidade de alcatrão no gás de síntese, o que interfere diretamente em curto prazo (por exemplo, poder calorífico) ou longo prazo, por exemplo, alcatrão e particulados incrustados no interior do motor.

Pelo Gráfico 10, observa-se uma relação entre recarga estabilizada no tempo de 218 minutos, juntamente com a temperatura do gás de saída. Aos 240 minutos, observa-se que a temperatura do ar de entrada sofre muita influência do funcionamento do motor, oscilando para mais ou para menos, conforme é ligado ou desligado, respectivamente.

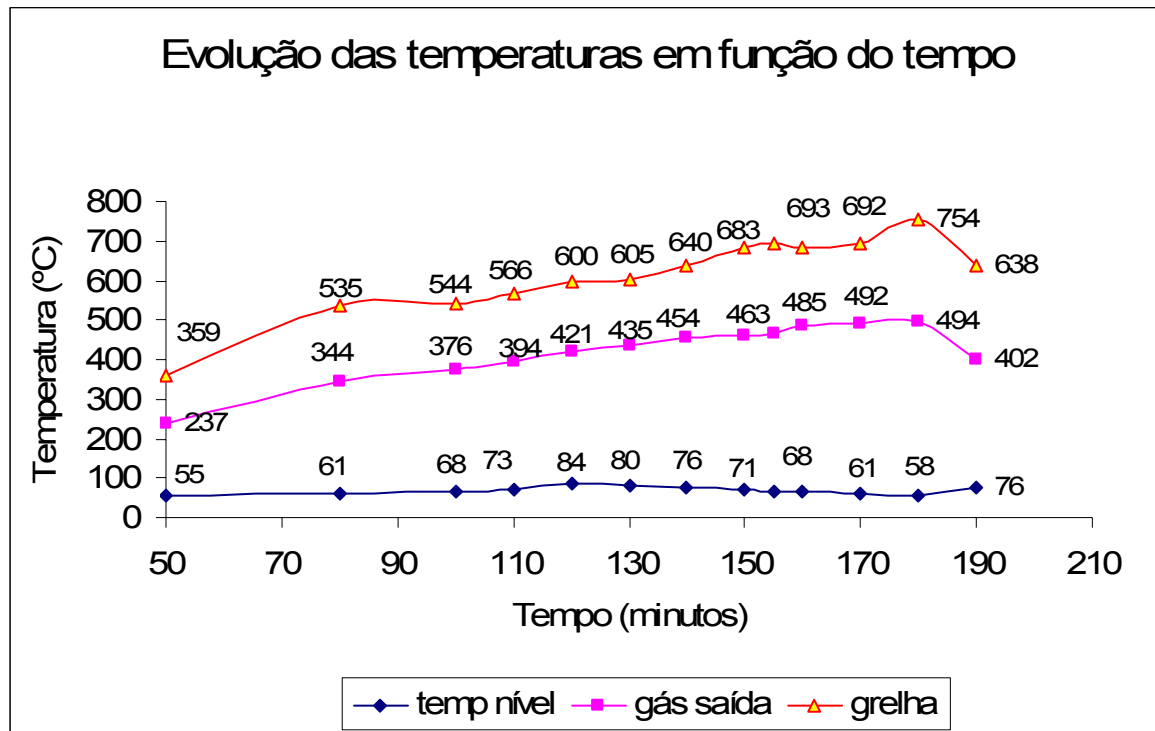
Gráfico 10 – Variação das temperaturas em função do tempo e recargas

Fonte: Adaptado de Marigonda (2011).

Segundo teste:

No segundo teste, pode-se monitorar a temperatura da grelha que representa o local por onde o gás gerado sai do gaseificador e, ainda, representa a temperatura ideal de trabalho do gaseificador em relação a sua estabilização, alcançando pico de 754°C e se estabilizando em 683-693°C, em 15 minutos de operação. No momento de abertura da válvula do gás para o motor, em 180 minutos, sua temperatura cai para 638°C, devido à eliminação do gás a altas temperaturas no seu interior. A temperatura do gás de saída ficou ligeiramente maior no segundo teste em relação ao primeiro, estabilizando na faixa dos 485-492°C, aos 160 minutos de operação do gaseificador, chegando ao máximo de 494°C. A temperatura do nível é determinada pelo momento da recarga, sendo uma recarga efetuada em média aos 71,5°C, chegando ao máximo de 84°C. O limite para que o sistema desligasse foi programado em 90°C.

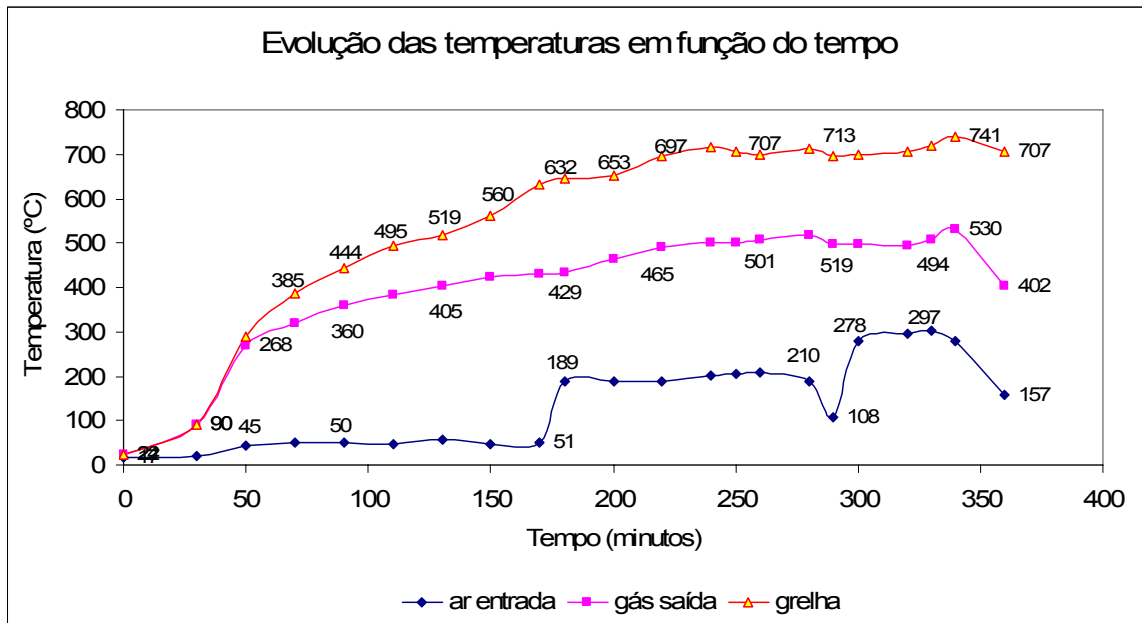
O Gráfico 11 representa a evolução das temperaturas em função do tempo de operação do gaseificador.

Gráfico 11 – Evolução das temperaturas em função do tempo

Fonte: O autor.

Terceiro teste:

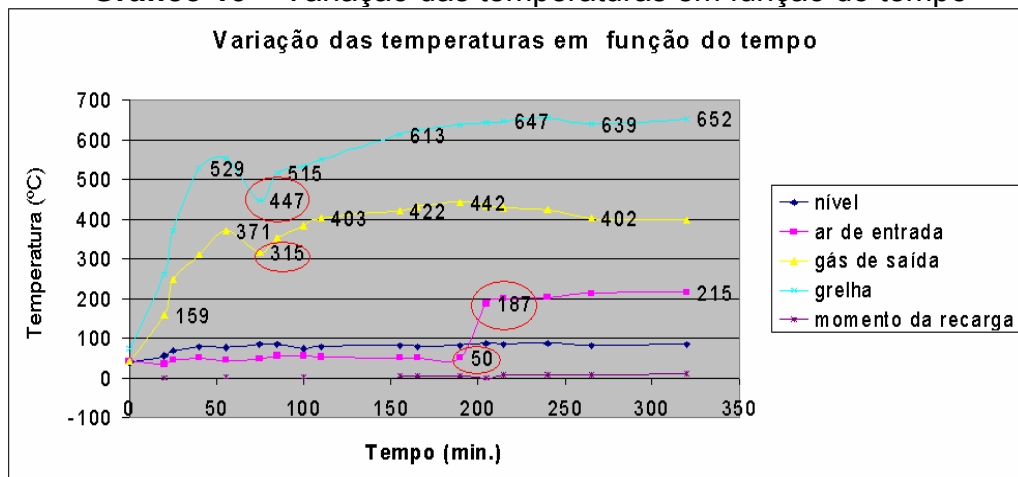
Para o terceiro teste, monitorou-se, também, a temperatura do ar de entrada. Observou-se, no primeiro teste, que sua variação é alta quando é ligado o motor, repetindo-se também neste, saindo da faixa dos 50°C (170 minutos) para 189-210°C (180 minutos) e, num outro momento, na faixa dos 278-297°C (300 minutos), dependendo da carga aplicada ao motor, pois seu consumo também varia em função da carga. Aos 220 minutos, observa-se a tendência na estabilização da temperatura do gás de saída e também da grelha, porém ainda sofrem pequenas alterações em função da utilização do motor. Até os 50 minutos, as temperaturas do gás de saída e ar de entrada caminham juntas, pois os dois trocam calor, porém, como as condições para que a grelha se aqueça mais, devido ao fato de estar suportando todo o carvão incandescente; a partir deste ponto, suas temperaturas vão se distanciando, como observado no Gráfico 12.

Gráfico 12 – Evolução das temperaturas em função do tempo

Fonte: O autor.

Quarto teste:

O quarto teste foi trabalhado com diferenças de pressão maiores para o 1º estágio e menores para o 2º (médias de 40 e 20 mm c.a., respectivamente, procurando manter sempre no 2º a metade do 1º), tendo como objetivo minimizar ou cessar as explosões provocadas em testes anteriores. Sendo a pressão do primeiro estágio maior que a do segundo, o fluxo tende a descer e não subir, gerando um fluxo contrário ocasionando as explosões. O Gráfico 13 apresenta a evolução das temperaturas de acordo com o tempo, momento das recargas e motor ligado.

Gráfico 13 – Variação das temperaturas em função do tempo

Fonte: O autor.

Observa-se, pelo Gráfico 13, que a maior variação na temperatura do ar de entrada é em 200 minutos, momento em que o motor é ligado, saltando dos 50°C para 187°C em aproximadamente 10 minutos. Diminuindo a concentração do gás no interior do gaseificador, gera-se mais calor, elevando a temperatura do ar de entrada, pelo trocador de calor, gás de saída/ar de entrada. Pode-se, também, observar variações, tanto para temperatura da grelha, quanto para o gás de saída, entre 50 e 100 minutos, momento este de recarga, que, por diferença de temperatura (biomassa a temperatura ambiente), tendem a abaixar. O nível serve de parâmetro para se efetuar uma nova recarga, por volta dos 80°C.

O gaseificador esteve em operação por aproximadamente 6 horas, até que foi detectado o entupimento do filtro de mangas. Foi observado que a quantidade de gás já não estava sendo mais suficiente para alimentar o motor, mesmo sem aumentar sua carga (do motor). O problema foi solucionado, lavando o filtro e deixando-o secar. Foi constatado que o filtro deve ser limpo a cada 24 horas, considerando o tempo total do motor funcionando com gás de síntese, momento que o filtro de mangas esteve em operação, porém o entupimento precoce pode ter ocorrido pelo alto volume de particulados na composição do gás quando da ineficiência do sistema de coleta de cinzas.

5.2.1 Composição do Gás de Síntese

Uma das limitações mais importantes deste trabalho é o fato de ter sido efetuada somente a análise da composição do gás de síntese em um teste, visto o alto custo cobrado por empresas especializadas, e de o cromatógrafo adquirido pela instituição ainda não estar em operação.

Durante os ensaios de gaseificação do primeiro teste, foram feitas as análises periódicas do gás produzido.

A análise da composição do gás de síntese foi realizada nos pontos ao longo do sistema de gaseificação: antes do filtro de mangas, antes do gasômetro, na chama piloto e após o gasômetro, descritas a seguir.

- Composição do gás de síntese antes do filtro de manga, com o gaseificador em operação após 3,7 horas (3 horas e 42 minutos):

Neste ponto o gás sai a 430°C, passa pelo trocador de calor com o ar de entrada e por mais dois trocadores de calor com água para seu resfriamento, chegando em média a 30°C. Os valores são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Composição do gás de síntese antes do filtro de manga, após 3,7 horas (222 minutos) de funcionamento

Componente	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	CH ₄
%	12,1	5,8	54,3	15,9	10,4	1,5

Fonte: White Martins (2011).

Observa-se que, na composição do gás de síntese, o teor de N₂ diminui, mesmo sendo inerte (ALVES, 1986), com relação ao ar atmosférico, enquanto que gases combustíveis são produzidos, por exemplo, H₂ (12,1%) e CO (15,9%).

- Composição do gás de síntese coletado antes do gasômetro:

Além dos trocadores de calor, o gás ainda passa pelo filtro de mangas e pelo *trap*. Alterando-se o ponto de coleta para antes do gasômetro, identifica-se uma quantidade de 16,9% de H₂, 19,5% de CO e 2% de CH₄, com aproximadamente 5 horas de funcionamento, conforme apresentado na Tabela 12. É possível verificar o acompanhamento desta variação, em que, conforme o tempo aumenta, a composição do gás melhora com relação ao gás combustível.

Tabela 12 – Composição do gás de síntese coletado antes do gasômetro

Componente	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	CH ₄
3,88 h (230 min. - %)	7,60	10,70	67,10	8,40	5,30	0,90
4,55 h - (273 min. - %)	16,90	0,20	50,90	19,50	10,50	2
Média (%)	12,25	5,45	59,00	13,95	7,90	1,45

Fonte: White Martins (2011).

Após 3 horas e 50 minutos, considerando como já estabilizada a temperatura do gaseificador e a produção de gás, observa-se que com 40 minutos de intervalo, o H₂, o CO, o CO₂ e o CH₄ aumentaram sua concentração, enquanto que o N₂ e O₂ diminuíram. Justifica-se isto, por ter sido ligado o motor após os 233 minutos e, devido a este fato, ainda sofrer alterações na temperatura.

Com o motor ligado, a temperatura tende a aumentar, e a conversão do carbono sólido também, contribuindo para a formação de H₂ e CO.

A quantidade de O₂ fica praticamente nula, justificando-se pelo aumento do processo de combustão, consumo de gás pelo motor e diminuição do volume de gás gerado no interior do gaseificador.

- Composição do gás de síntese na chama piloto:

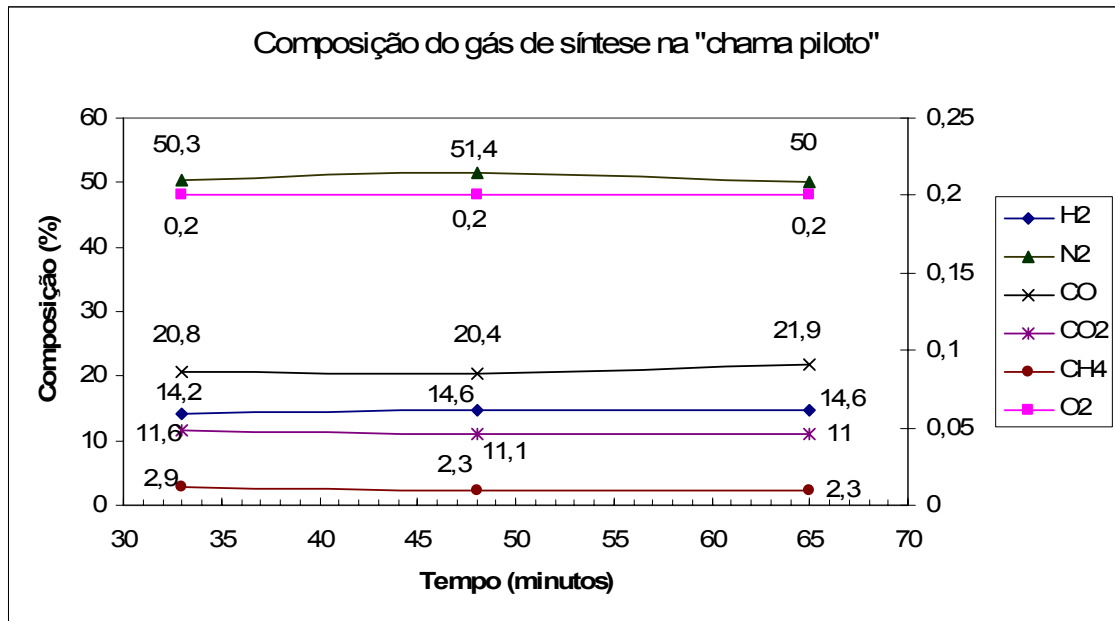
A análise da composição do gás de síntese na chama piloto foi feita com três medições, sendo que a primeira foi com 33 minutos de funcionamento, a segunda, 48 minutos e a terceira com 1 hora e cinco minutos, apresentada na Tabela 13. O fato de efetuar medições neste ponto foi para que o gás gerado não sofresse intervenções externas de filtros, sendo queimado e medido da forma que foi gerado, com temperaturas ainda baixas.

Tabela 13 – Composição do gás de síntese no bocal de teste (“chama piloto” – Figura 16)

Componente	H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	CH ₄	Temp. gás saída do gaseificador (°C)
0,55 h – (33min) (%)	14,2	0,2	50,3	20,8	11,6	2,9	119
0,8 h – (48 min) (%)	14,6	0,2	51,4	20,4	11,1	2,3	199
1,05 h – (65 min) (%)	14,6	0,2	50,0	21,9	11,0	2,3	244
Média (%)	14,5	0,2	50,6	21,0	11,2	2,5	187,3

Fonte: White Martins (2011).

Pelo Gráfico 14, é possível observar que, neste ponto, e de acordo com o tempo decorrido, a concentração do gás não sofreu alterações significativas.

Gráfico 14 – Composição do gás de síntese na “chama piloto”

Fonte: O autor.

Observa-se que, no intervalo de tempo de 32 minutos, a composição de oxigênio se manteve constante, e a dos demais não sofreu alterações significativas.

Neste período, o motor não foi ligado, e o sistema estava em fase de estabilização, ou seja, momento em que o gaseificador é ligado até que atinja temperatura máxima. Dentre os pontos de medição, destaca-se este pelo fato de as temperaturas ainda estarem baixas no período de estabilização do gaseificador. Pela Tabela 13, é possível observar que a maior quantidade de metano gerado foi neste intervalo de tempo, devido ao fato de o CH₄ ser formado a baixas temperaturas e de acordo com a reação de metanação (Eq. 9). No entanto, com o aumento da temperatura, ocorrem as reações de “*reforming*” (Eq. 11 a Eq. 13), o que provoca o consumo de metano, aumentando o conteúdo de hidrogênio.

- Composição do gás após o gasômetro (Gráfico 15).

Foram efetuadas 5 análises após o gasômetro, devido ao fato de o gás não sofrer mais interferências neste ponto, já sendo conduzido diretamente para o motor. Apenas uma destas leituras foi efetuada com o motor desligado. Na Tabela

14, é apresentada a concentração para cada teste e a hora da medida, juntamente com sua média.

Tabela 14 – Composição do gás de síntese após o gasômetro. Teste 1

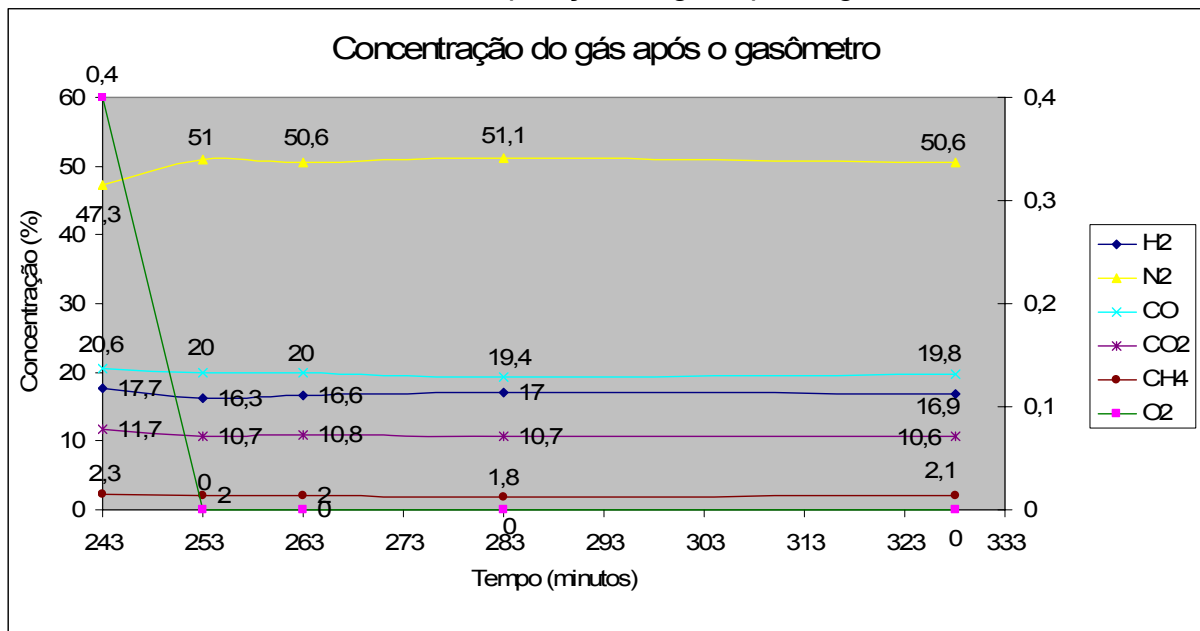
Ponto:	Após o Gasômetro							
Hora	Tempo (min)	Concentração (%)						Temp. gás saída (°C)
		H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	CH ₄	
14:25	243*	17,7	0,4	47,3	20,6	11,7	2,3	434
14:35	253	16,3	<0,1	51,0	20,0	10,7	2,0	433
14:45	263	16,6	<0,1	50,6	20,0	10,8	2,0	432
15:05	283	17,0	<0,1	51,1	19,4	10,7	1,8	431
15:50	328	16,9	<0,1	50,6	19,8	10,6	2,1	446
Média (%)		16,9	0,1	50,1	20,0	10,9	2,0	

* Motor desligado.

Fonte: White Martins (2011).

A análise da concentração do gás de síntese após o gasômetro é verificada e comentada de acordo com o Gráfico 15.

Gráfico 15 – Composição do gás após o gasômetro

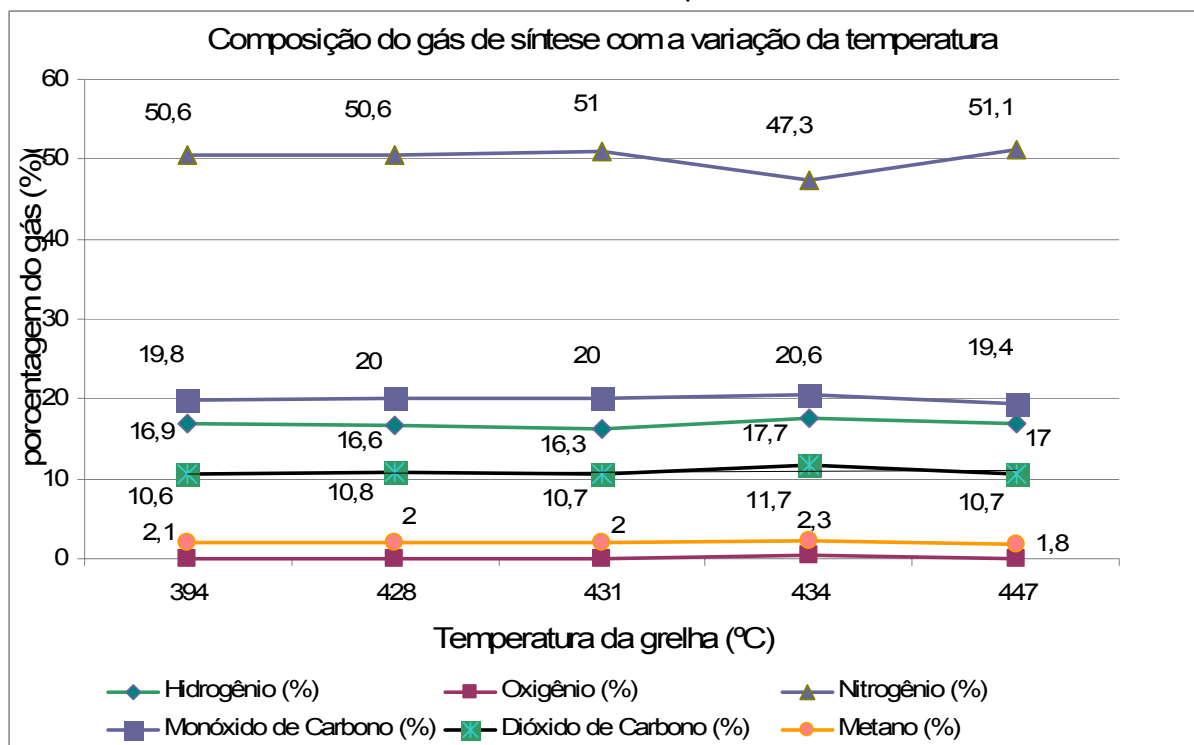


Fonte: O autor.

O tempo total decorrido desde a primeira análise até a última foi de 1 h e 25 minutos, e, como pode ser observada na Gráfico 15, a concentração não sofreu variações significativas, mesmo com o motor ligado após 10 minutos da primeira coleta. A diferença maior ficou por conta da concentração de oxigênio, que caiu de 0,4% para < 0,1%, o que mostra a estabilidade em todo o processo.

A relação entre a composição do gás de síntese com relação a sua temperatura de saída foi estabelecida no Gráfico 16.

Gráfico 16 – Composição do gás de síntese em função da variação da temperatura

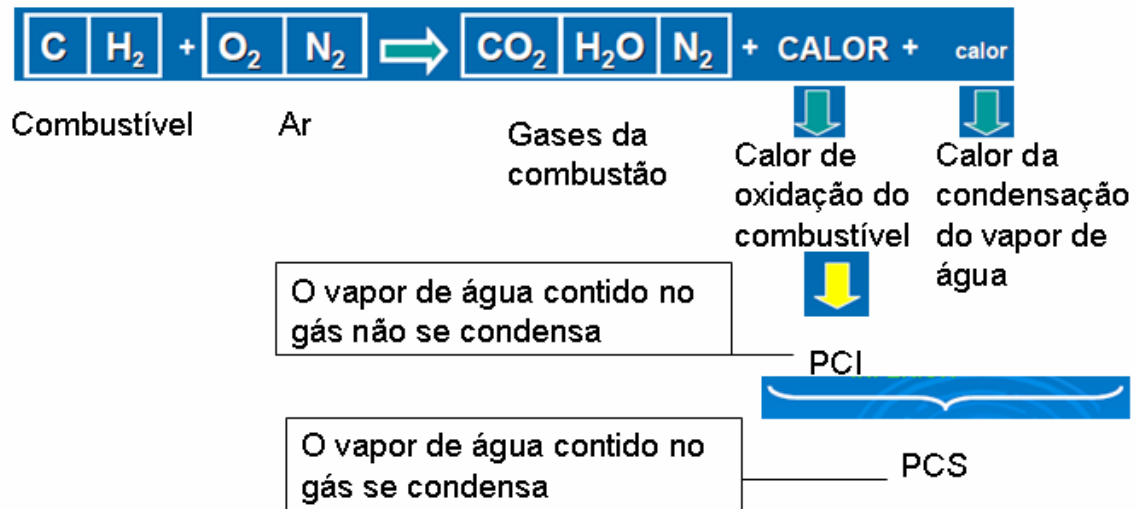


Fonte: O autor.

Com a variação da temperatura em 53°C, de acordo com o Gráfico 16, pode-se observar que a maior alteração na composição do gás de síntese é com a temperatura em 434°C, momento em que o motor é ligado. A concentração de nitrogênio é menor, e quantidades de metano, hidrogênio e monóxido de carbono são maiores que a média.

De posse dos valores da composição do gás de síntese após o gasômetro pôde-se calcular seu poder calorífico. A interpretação gráfica do poder calorífico inferior e superior é representada pela Figura 26.

Figura 20 – Representação gráfica do poder calorífico inferior e superior



Fonte: O autor.

Empiricamente, expressões que consideram a composição do combustível, como a fórmula de Dulong, nos permitem 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 14), utilizando-se, então, a Fórmula de Dulong:

$$PCS = 3050.CO + 3070.H_2 + 9500.CH_4 + 13950.C_2H_2 + 15000.C_2H_4(5.1)$$

$$PCI = 3050.CO + 2580.H_2 + 8530.CH_4 + 13500.C_2H_2 + 14050.C_2H_4(5.2)$$

$$PCS \cong 1411,23 \text{ kcal/Nm}^3 \text{ ou } 5,91 \text{ MJ/Nm}^3.$$

$$PCI \cong 1308,63 \text{ kcal/Nm}^3 \text{ ou } 5,48 \text{ MJ/Nm}^3.$$

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]

C_2H_2 e $C_2H_4 = 0$

$C_2H_4 = \text{Teor de } C_2H_4 \text{ [Nm}^3 \text{ } C_2H_4/ \text{ Nm}^3 \text{ combustível]}$

CO_2 , N_2 são inertes na combustão, e O_2 não entra na equação.

5.3 Relação A/C E Fator de Ar

De acordo com pesquisas de gaseificação, o fator de ar ou conhecido também como a razão de equivalência ou “equivalence ratio” em inglês, é uma das variáveis operacionais mais importantes na gaseificação com ar (NARVÁEZ et al., 1996). Em gaseificação, esta variável corresponde ao valor da relação ar – combustível real utilizado durante o processo –, dividido pela relação ar – combustível teórico ou estequiométrico. Desta maneira, o fator de ar define a proporção de combustível queimado (combustão completa) com relação à quantidade gaseificada (oxidação parcial e/ou redução).

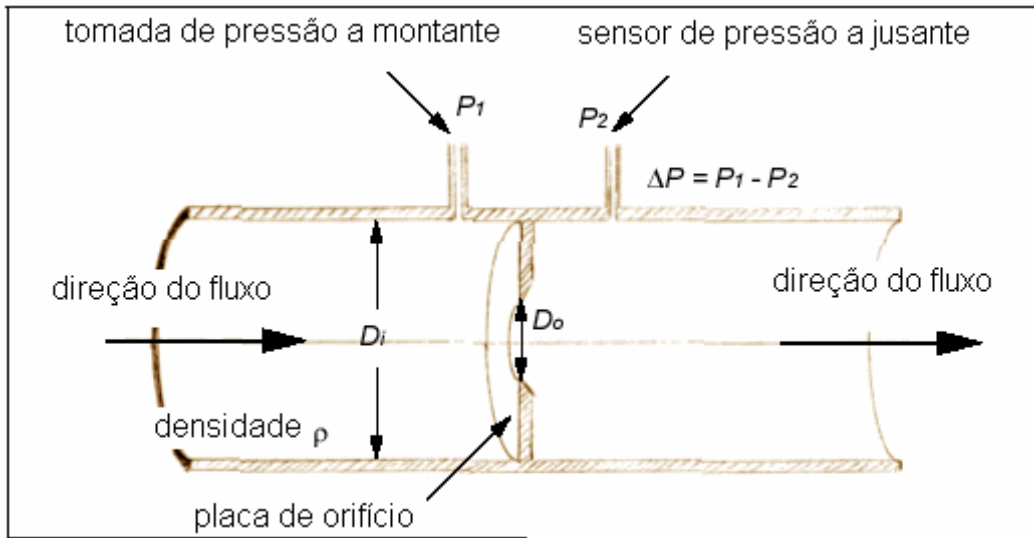
Segundo Wander, Altafini e Barreto (2004), valores típicos para a relação ar – combustível real, em unidades pequenas de gaseificação de madeira com altas perdas de calor – estão em torno de 2 e 2,4 kg.ar/kg.biomassa.

Para o primeiro teste, foi considerado somente o primeiro estágio de gaseificação com placa de orifício de 3,1 cm de diâmetro.

Para os demais testes foram utilizados os dois estágios, tendo no segundo a placa de orifício de 3,02 cm de diâmetro.

A placa de orifício causa uma resistência à passagem do ar, causando uma diferença de pressão entre os dois lados da placa, como indica a Figura 27 e os dados de entrada pela Figura 28.

Figura 21 – Representação do método usado para calcular a vazão do ar de entrada no gaseificador



Fonte: Adaptado de Efunda (2012).

Figura 22 – Dados de entrada para o cálculo da vazão

Pipe (inlet) diameter upstream of orifice, D_i :	5	cm
Orifice diameter (less than the inlet diameter), D_o :	3.1	cm
Pressure difference across the orifice, Δp :	29	inH2O
Fluid density, ρ :	1.29	kg/m ³
Flow Coefficient, C_f :	0.7	

Fonte: Efunda (2012).

Utiliza-se a equação de Bernoulli para descrever o fluxo no tubo horizontal:

(5.3)

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho V_2^2 - \frac{1}{2} \rho V_1^2$$

Em que: a localização 1 é a montante do orifício, e a localização 2 é a jusante do orifício. Recomenda-se que a localização 1 seja posicionada a montante do orifício, e a localização 2 seja posicionado em meio a jusante do tubo do orifício. Uma vez que a pressão em 1 será maior do que a pressão de 2 (para o fluxo movendo-se de 1 a 2), a diferença de pressão, tal como definido, será uma quantidade positiva; encontra-se a vazão (em m³/h ou kg/h).

Resultados:

Para o primeiro teste, utilizando somente o primeiro estágio, com 49,6 kg/h de consumo de biomassa, a relação A/C é 5,23 kg.ar/kg.biomassa ou 4,057 m³.ar/kg.biomassa, utilizando a média das leituras da diferença de pressão pela placa de orifício.

Para o segundo teste com 40 kg/h de consumo de biomassa, a relação A/C, utilizando os dois estágios, é de 9,46 kg.ar/kg.biomassa. (7,35 m³.ar/kg.biomassa)

Para o terceiro teste, com 46,36 kg/h de consumo de biomassa, a relação A/C, utilizando os dois estágios, é de 10,62 kg.ar/kg.biomassa (7,82 m³.ar/kg.biomassa).

Para o quarto teste, com 50 kg/h de consumo de biomassa, a relação A/C, utilizando os dois estágios, é 10,46 kg.ar/kg.biomassa. (10 m³.ar/kg.biomassa).

Verifica-se que praticamente se mantém o consumo de biomassa, porém o volume consumido de ar dobra com os dois estágios em funcionamento.

- Fator de ar

O processo de gaseificação pode ser qualificado como um processo de combustão parcial, no qual somente uma parcela dos elementos químicos constituintes do combustível sofre oxidação total. Assim, a gaseificação pode ser comparada a uma combustão com falta de ar.

Qualquer combustível convencional requer, de acordo com sua composição, uma quantidade específica de oxigênio (e, portanto, de ar, uma vez que este é o agente fornecido), para atingir teoricamente uma reação completa de combustão. Uma quantidade menor que esta produz combustão incompleta e, portanto, perda de calor potencial. Uma quantidade maior gera perdas excessivas de energia através dos gases de combustão.

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

$$FA = \text{Var}/VA(5.4)$$

Altitude média no local: 827 m.

Temperatura média no local: 28°C.

Em que:

Var: volume de ar empregado na gaseificação em relação ao consumo de combustível;

Var 1º teste (somente o 2º estágio): 4,057 m³.ar/kg.biomassa;

Var 2º teste (2 estágios em operação): 7,35 m³.ar/kg.biomassa;

Var 3º teste (2 estágios em operação): 7,82 m³.ar/kg.biomassa;

Var 4º teste (2 estágios em operação): 10 m³.ar/kg.biomassa.

VA: volume de ar estequiométrico necessário para a combustão completa;

Composição elementar da biomassa de eucalipto:

C: 49% H: 5,87% O: 43,97% N: 0,3% cinzas: 0,3%

Considerando a umidade média em 15%, significa que, em 1 Kg de biomassa, 150 g é H₂O.

Composição do gás produto

CO₂: 10,9% CO: 20% H₂: 16,9% CH₄: 2% N₂: 50,1%

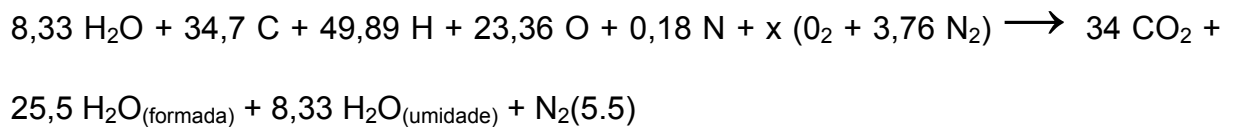
Para cada 1 kg de biomassa úmida, sua composição é informada na Tabela 15.

Tabela 15 – Composição da biomassa utilizada (base úmida), para cada kg

Elemento	Massa (g)	Massa atômica	Quantidade de matéria (mol)
H ₂ O	150	18	8,33
C	416,5	12	34,7
H	49,89	1	49,89
O	373,75	16	23,36
N	2,55	14	0,18
CINZAS	2,55		
TOTAL	1 kg		

Fonte: Adaptado de Sánches (2009).

A equação estequiométrica na combustão completa fica:



Balanco de oxigênio necessário (sem umidade)

$$23,36 + 2x = 2 \cdot 34 + 25,5(5.6)$$

$$x = \text{VA} = 35 \text{ kg.ar/kg.biomassa}$$

Var 1º teste: 4,05 m³.ar/kg.biomassa

$$\text{FA} \cong 0,12.$$

Var 2º teste: 7,35 m³.ar/kg biomassa

$$\text{FA} \cong 0,21.$$

Var 3º teste:

$$\text{FA} \cong 0,22.$$

Var 4º teste: 10 m³.ar/kg.biomassa

$$\text{FA} \cong 0,28.$$

A Tabela 16 apresenta os resultados obtidos de F/A e relação ar/combustível para o consumo de biomassa para cada um dos quatro testes.

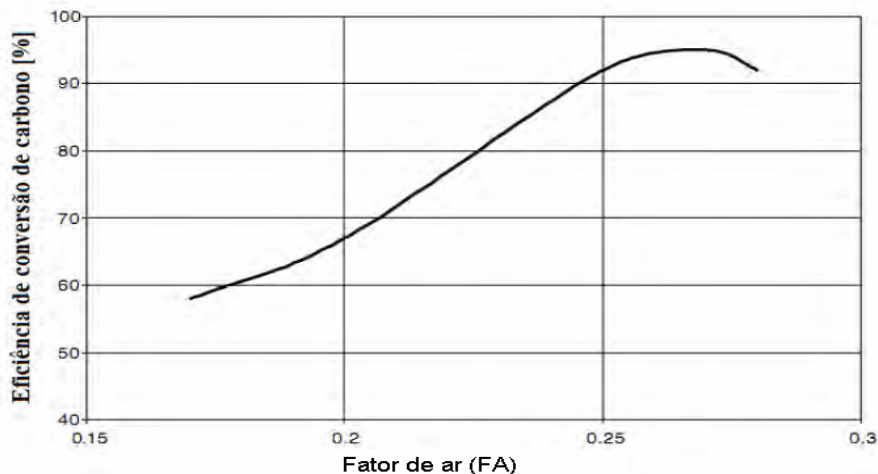
Tabela 16 – Relação A/C e F/A em função do consumo de biomassa

Teste	Consumo de biomassa (kg/h)	A/C (kg.ar/kg.biomassa)	A/C (m ³ .ar / kg.biomassa)	F/A
1	49,60	5,23	4,05	0,12
2	40,00	9,46	7,35	0,21
3	46,36	10,62	7,82	0,22
4	50,00	10,46	10,00	0,28

Fonte: O autor.

Num combustor, a quantidade de ar a fornecer é determinada pela estequiometria, que depende da composição do combustível e dos requisitos de excesso de ar. Num gaseificador, o agente de gasificação fornecido é apenas uma parte da quantidade estequiométrica. 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. O Gráfico 17 justifica o interesse em se determinar o FA, para a conversão do carbono presente no combustível sólido.

Gráfico 17 – Eficiência da conversão do carbono em função do fator de ar



Fonte: Adaptado de Basu (2006 apud PEREIRA, 2009).

Um valor de FA muito baixo (<0,2) resulta em problemas, incluindo conversão incompleta do carbono, formação de alcatrões e produto gasoso com baixo poder calorífico. Por outro lado, o FA muito elevado (>0,4) resulta na formação

excessiva de gases de combustão (CO_2 e H_2O) com relação aos gases combustíveis que se pretendem (H_2 e CO) (NARVÁEZ et al., 1996). Isto causa uma diminuição do PCI do produto gasoso. Em instalações de gasificação, o FA é mantido entre 0,2 e 0,3 (BASU, 2006 apud PEREIRA, 2009).

5.4 DESEMPENHO DO GRUPO GERADOR

O grupo gerador ou motogerador foi instalado num ambiente coberto com boa circulação de ar a 6 metros do gaseificador, buscando-se, assim, diminuir a perda de carga do gás, mesmo passando pelo gasômetro.

O gás proveniente do gaseificador passou por um sistema de filtragem de três etapas, sendo primeiro um ciclone, a segunda pelo filtro de mangas e a terceira por um sistema de filtragem com elemento filtrante de papel (exceto no primeiro teste), mais o *trap* para se retirar o condensado, além de dois trocadores de calor com água e um com ar de entrada. Desta maneira, obteve-se uma redução na temperatura do gás que entra no motor, sendo admitido na média em 30°C . A temperatura máxima do gás de saída do gaseificador foi 550°C .

Para ter um maior controle sobre a mistura e estabilização do motor, ficou mais fácil a operação quando se funcionava o motor com o combustível originalmente convertido (GNV), assim se torna mais eficiente a transferência para o combustível vindo do gaseificador. Verificou-se que houve dificuldade na partida do motor com o gás do gaseificador, estando o motor ainda frio, porém quando quente tal dificuldade foi resolvida.

Para obtenção dos dados, o motor foi instrumentado com os seguintes equipamentos e os pontos de medição:

- Medida da temperatura dos gases de escapamento, no tubo de escapamento.
- Lambda.
- Potência (kW).
- Rotação do motor. Controlador de rotação do motor da fábrica Woodward, para manter a rotação fixa de 1800 min^{-1} para garantir a frequência de 60 Hz.
- Tensão.

- Temperatura da admissão.
- Temperatura do óleo.
- Temperatura da água do sistema de arrefecimento.
- Frequência.
- Corrente.
- Pressão do óleo.

Foram realizados 4 ensaios dos quais 1 com gás natural. Esta metodologia foi necessária para fazer a comparação de desempenho do grupo com GNV e gás de síntese. Todos os ensaios foram efetuados na rotação de 1800 min^{-1} , ideal para operação com o grupo gerador, em que obtivemos 60 HZ.

As medidas foram realizadas em 5 diferentes níveis de carga, sendo eles: 0 (0%), 7 kW, 13 kW, 20,1 kW e 26,4 kW (100%). Além da carga máxima suprida pelo grupo, verificou-se para cada intervalo a tensão (V), a corrente (A), a temperatura da água do sistema de arrefecimento ($^{\circ}\text{C}$), a temperatura do óleo lubrificante ($^{\circ}\text{C}$), a pressão do óleo (bar), a temperatura do escapamento ($^{\circ}\text{C}$) e rotação do motor (rpm).

- Primeiro teste:

A Tabela 17 apresenta os resultados do ensaio do grupo gerador abastecido com gás de síntese referentes ao primeiro teste.

Tabela 17 – Resultados do monitoramento do grupo gerador abastecido com gás de síntese

Carga (kW)	0	7	13	20,1	26,4
Tensão (V)	222	223	223	223	223
Corrente (A)	0	18,5	33	51,84	67
Temperatura água ($^{\circ}\text{C}$)	82	82	82	83	84
Temperatura óleo ($^{\circ}\text{C}$)	89	91	93	94	95
Pressão de óleo (bar)	5,3	6,5	6,4	6,5	6,9
Temperatura escape ($^{\circ}\text{C}$)	560	590	602	611	625
Rotação (rpm)	1800	1762,22	1710	1657,8	1636,2

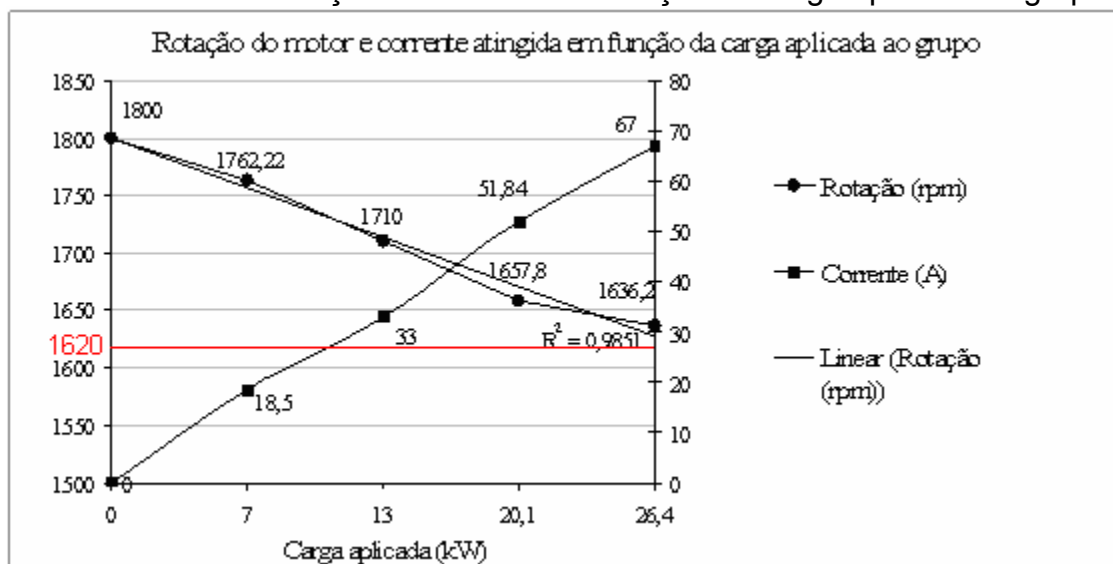
Fonte: O autor.

Observa-se também, pela Tabela 17, que a corrente aumenta linearmente à medida que a carga é aplicada, sem distorções e sem aumento brusco, mesmo com a carga máxima suportada de 26,4 kW, de potência ativa. Se a

carga aplicada fosse maior, aí, sim, ocorreriam distorções, com aumento desproporcional da corrente e diminuição da tensão, além de alterar outras condições de funcionamento, como a diminuição da rotação, por exemplo, causando distorções na qualidade de energia e danos ao grupo. O nível de tensão se manteve entre 222 e 223 V.

Pelo Gráfico 18, observa-se também que, quanto mais carga se aplica, menor é a rotação grupo, permanecendo inversamente proporcional a relação carga aplicada/rotação, dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante de 10%.

Gráfico 18 – Variação da corrente em função da carga aplicada ao grupo



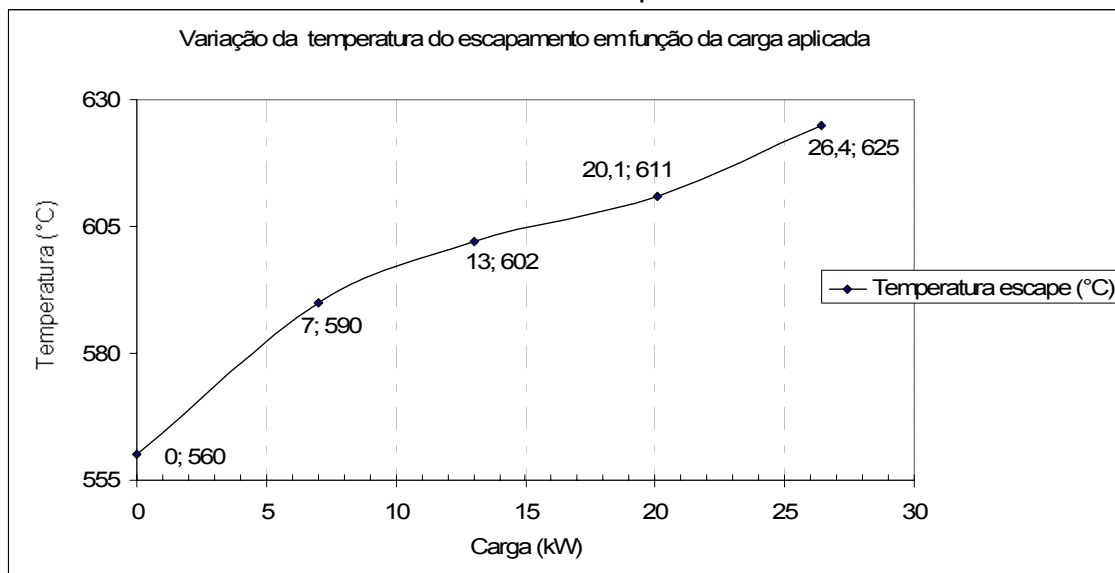
Fonte: O autor.

Para cada intervalo de carga aplicada foi registrada também a diminuição da rotação do motor. O Gráfico 18 também apresenta a variação de rotação do motor conforme a carga aplicada. Observa-se que, com a carga máxima, a rotação é de 1636,2 rpm, dentro dos patamares recomendados pelo fabricante, que é de 10%, ou seja, 1620 rpm. Com aplicação de uma carga superior, a rotação tende a cair mais, ultrapassando os limites impostos pelo fabricante, fazendo-o não suprir a carga e aumentando muito a corrente, a ponto de causar distorções na energia e queda na tensão.

É possível observar, pelo Gráfico 19, que, conforme a carga aplicada ao grupo, instantaneamente, a temperatura do gás do escapamento aumenta, sendo

que, sem carga, a temperatura já é de 560°C, chegando a 625°C com a carga máxima.

Gráfico 19 – Variação da temperatura do escapamento em função da carga aplicada



Fonte: O autor.

Uma produção combinada permite produzir energia elétrica e energia térmica, esta sob a forma de vapor de água quente, que vem dos gases de escape ou ainda:

- produção de água quente, a partir dos sistemas de arrefecimento do motor;
- produção de vapor, gerado por aproveitamento dos gases de escape;
- recuperação direta dos gases de escape para processos como secagem, por exemplo.

5.4.1 Composição dos Gases do Escapamento do Motor.

A Tabela 18 apresenta a composição dos gases do escapamento do motor, alimentado com gás de síntese.

Tabela 18 – Composição do gás de escape, com o motor alimentado com gás de síntese

Ponto:		Escapamento						Observações
Hora	Tempo (min)	Concentração (%)						
		H ₂	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	CH ₄	
15:20	298	0,1	0,2	79,0	1,8	18,9	<0,1	motor em funcionamento

Fonte: White Martins (2011).

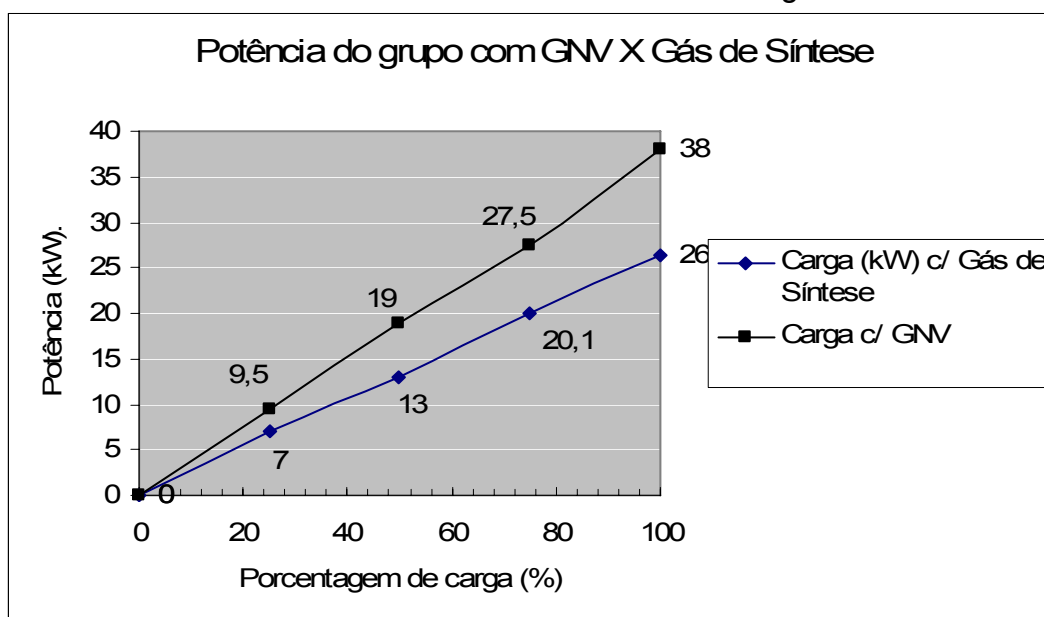
Foi encontrado 0,1% de H₂ e 1,8% de CO no gás do escapamento do motor, e 0,2% de O₂, quantidade ideal para arrastar resíduos do seu interior.

5.4.2 Potência Desenvolvida Alimentando o Grupo com GNV e Gás de Síntese

Os mesmos ensaios com o grupo gerador foram efetuados anteriormente tendo como combustível o GNV.

Alimentando o grupo com os dois diferentes tipos de combustíveis, foi possível verificar a variação da carga suportada com o GNV e gás de síntese. Através do Gráfico 20, pode-se observar a variação máxima de 11,6 kW entre os dois combustíveis. Esta redução se dá devido ao fato de o poder calorífico do GNV ser maior que o gás de síntese.

Gráfico 20 – Comparação de potências desenvolvidas pelo grupo gerador alimentado com GNV e gás de síntese



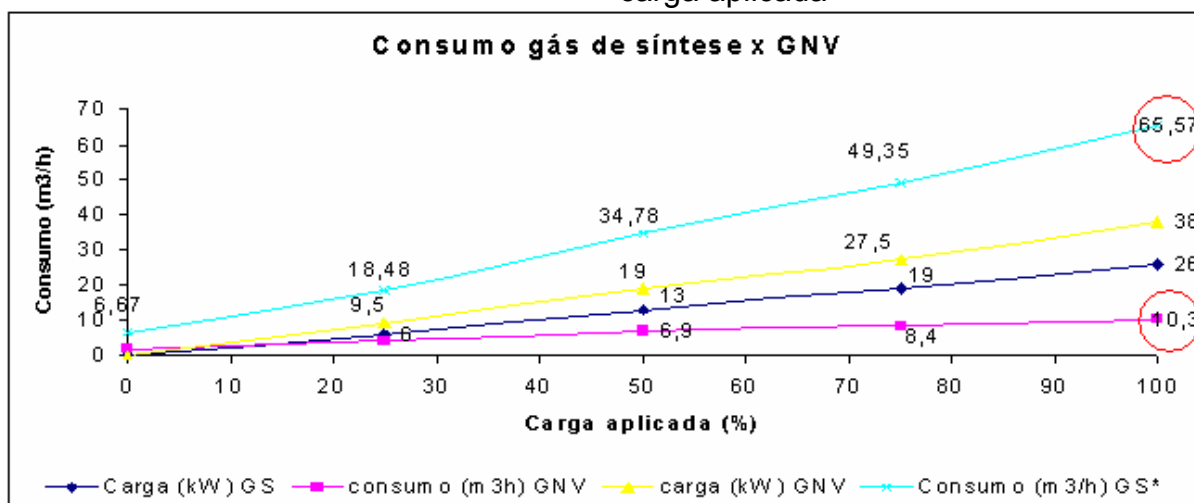
Fonte: O autor.

O poder calorífico do GNV, de acordo com o laudo técnico (Anexo 1) fornecido pela Empresa White Martins, é de $9,577 \text{ MJ/Nm}^3$, enquanto que do gás de síntese produzido foi de aproximadamente $5,48 \text{ MJ/Nm}^3$ (PCI).

5.5 RELAÇÃO DO CONSUMO ENTRE GNV D GÁS DE SÍNTESE DM FUNÇÃO DA CARGA APLICADA

Dado o poder calorífico do gás de síntese ser inferior ao GNV, para suprir uma carga equivalente, o volume consumido é maior, como pode ser observado no Gráfico 21.

Gráfico 21 – Relação do consumo do gás de síntese com GNV em função da carga aplicada



*Gás de síntese.

Fonte: O autor.

Para suprir uma demanda de 19 kW, foram necessários $6,9 \text{ m}^3/\text{h}$ de GNV, enquanto que, para o gás de síntese, para a mesma potência, foram necessários $49,35 \text{ m}^3/\text{h}$. Outra equiparação relevante é em relação à porcentagem da carga aplicada: com somente 50% da carga, atingiu-se os 19 kW, com GNV; já com o GS, o percentual de carga aplicada é de 73%, considerando 100% de carga máxima.

- Segundo teste:

No segundo teste, o grupo gerador alcançou 26 kW de carga. A tensão se manteve nos níveis padrões variando apenas entre 220 e 222 V. A corrente aumenta na mesma proporção da elevação da carga, porém não alcançando valores a ponto de causar diminuição da tensão.

O consumo de gás de síntese para a carga máxima (26 kW) foi de 65,57 m³/h. A temperatura do escapamento, da água do radiador e do óleo lubrificante elevam-se proporcionalmente com o aumento da carga, não comprometendo o desempenho do sistema. O escorregamento, bem como a abertura do corpo borboleta, ficaram no limite, com 1595 rpm e 61%, respectivamente. Ultrapassando esses valores, distorções poderiam ocorrer na qualidade da energia, vindo a baixar a tensão, devido à baixa rotação do motor, e a impossibilidade de se elevar mais a vazão de combustível para o interior do motor, elevando-se a rotação, devido à limitação da abertura do corpo borboleta e do sistema de admissão de ar, como observado na Tabela 19.

Tabela 19 – Elevação da carga do grupo gerador de 0 a 100 % alimentado com gás de síntese

Elevação da carga de 0 a 100 % com gás de síntese					
Percentual de Carga (%)	0	25	50	75	100
Carga (kW)	0	6	13	19	26
Tensão (V)	220	220	221	221	222
Corrente (A)	0	16	34	50	68
Temperatura ambiente (°C)	28	28	27,5	28	27
Temperatura água (°C)	65	70	73	78	84
Temperatura óleo (°C)	83	92	93	98	99
Pressão de óleo (bar)	5,3	6,5	6,4	6,2	6,6
Temperatura Escape (°C)	650	675	689	698	702
Consumo (m ³ /h)	6,67	18,48	34,78	49,35	65,57
Droop (%) - Calculado	3	4,2	5	9	11,4
Sonda	Travada	OK	OK	OK	OK
Rotação (rpm)	1746	1724	1710	1638	1595
% Borboleta	21	26	35	43	61
Avanço (graus)	29	17	17	17	17

Fonte: ER-BR (2012).

- Terceiro teste:

Para o terceiro teste, as grandezas não foram significativamente diferentes das do primeiro teste, observando-se também uma carga máxima atingida de 26 kW, com um consumo de 67 m³/h de gás de síntese. Observa-se que a temperatura do óleo, do escape e da água elevou-se em média 2 graus, que pode ser justificado pelo maior desprendimento de energia térmica, uma vez que o consumo de gás foi minimamente superior em 1,5 m³/h, como observado na Tabela 20.

Tabela 20 – Elevação da carga do grupo gerador de 0 a 100 % alimentado com gás de síntese

Elevação da carga de 0 a 100 % com gás de síntese					
Percentual de Carga (%)	0	25	50	75	100
Carga (kW)	0	6	13	19	26
Tensão (V)	220	220	221	221	222
Corrente (A)	0	16	34	50	68
Temperatura ambiente (°C)	27	28	27	27	28
Temperatura água (°C)	68	70	75	80	85
Temperatura óleo (°C)	96	98	104	102	102
Pressão de óleo (bar)	5,8	6,5	6,4	6,5	6,9
Temperatura Escape (°C)	645	680	690	700	705
Consumo (m ³ /h)	6,4	18,2	35	50,7	67
Droop (%) - Calculado	3,3	4,5	5,5	9,2	12,1
Sonda	OK	OK	OK	OK	OK
Rotação (rpm)	1741	1719	1701	1634	1582
% Borboleta	20	24	34	43	60
Avanço (graus)	29	17	17	17	17

Fonte: ER-BR (2012).

Teste com GNV:

Tendo o objetivo de se trabalhar com a potência máxima, a fim de se comparar com teste utilizando gás de síntese, observa-se que a potência máxima atingida com GNV foi 38 kW com um consumo de 10,3 m³/h com rotação de 1634 rpm, ou seja, um escorregamento de até 2,9% menor em relação ao gás de síntese, como pode ser observado na Tabela 21.

Tabela 21 – Resultados do teste com o grupo gerador alimentado com GNV

Elevação da potência 0 – 100 % com GNV					
Percentual de Carga (%)	0	25	50	75	100
Carga (kW)	0	9,5	19	27,5	38
Tensão (V)	220	220	221	221	222
Corrente (A)	0	25	50	75	100
Temperatura ambiente (°C)	25	26,2	25,5	24	23,9
Temperatura água (°C)	65	70	75	75	85
Temperatura óleo (°C)	83	91	94	100	102
Pressão de óleo (bar)	5,3	6,5	6,4	6,5	6,9
Temperatura Escape (°C)	735	735	735	735	735
Consumo (m ³ /h)	2	4,3	6,9	8,4	10,3
Droop (%) - Calculado	1,8	3,3	4,2	7,5	9,2
Sonda	Travada	OK	OK	OK	OK
Rotação (rpm)	1768	1741	1724	1665	1634
% Borboleta	18	-	35	43	57
Avanço (graus)	17	8	8	8	8

Fonte: ER-BR (2011).

5.6 EFICIÊNCIA DO GASEIFICADOR E DO SISTEMA PILOTO

5.6.1 Eficiência do Gaseificador

O desempenho de um gaseificador é, muitas vezes, expresso em termos da sua eficiência, que pode ser definida de duas formas diferentes: eficiência do gás a frio e eficiência do gás a quente. A eficiência a frio é usada se o gás é utilizado num motor de combustão interna, caso em que o gás é resfriado próximo à temperatura ambiente, e os vapores de alcatrão deveriam ser removidos. Esta eficiência é definida na Equação 5.7. O cálculo tem o objetivo de se alcançar um valor de referência, visto a a tratativa dos erros e incertezas não foram considerados.

$$\eta_{frio} = \frac{\dot{V}_g q_g}{\dot{m}_{comb} C_{comb}} \times 100 \quad (\%) \quad (5.7)$$

Sendo:

\dot{V}_g : a vazão média volumétrica de gás gerado (m³/s);

q_g : o poder calorífico do gás gerado (kJ/m³);

\dot{m}_{comb} : a vazão mássica de combustível injetado (kg/s); e

C_{comb} : o poder calorífico do combustível (kJ/kg).

A eficiência a quente, η_{quente} , é usada em aplicações térmicas, o gás não é resfriado antes da combustão e o calor sensível do gás também é útil. Equação 5.8.

$$\eta_{quente} = \frac{\dot{V}_g q_g + H_{sensível}}{\dot{m}_{comb} C_{comb}} \times 100 \quad (\%) \quad (5.8)$$

$$H_{sensível} = C_p V_g (T_g - T_a) \quad (5.9)$$

Sendo:

T_g : temperatura do gás; e

T_a : temperatura ambiente.

Em se tratando de eficiência no uso do gás em motores de combustão interna, utiliza-se o gás frio, devido a sua dispersão ser menor. Com o consumo de 49,6 kg/h de biomassa pelo gaseificador e vazão de 67 m³/h de gás de síntese, calculada com anemômetro de turbina para determinação da velocidade do gás, a área da seção transversal da tubulação por onde o gás flui para o motor (entrada do motor) e sua temperatura (aproximadamente 30 °C).

$$V_g \cong 67 \text{ m}^3/\text{h} = 0,0186 \text{ m}^3/\text{s};$$

$$q_g \cong 5,48 \text{ MJ}/\text{m}^3 = 5.480 \text{ kJ}/\text{m}^3;$$

$$m_{comb} \cong 49,6 \text{ kg}/\text{h} = 0,01377 \text{ kg}/\text{s};$$

$$C_{comb} \cong 17,82 \text{ MJ}/\text{m}^3 = 17.820 \text{ kJ}/\text{m}^3.$$

$\eta \cong 41,53\%$. (tomando-se por base somente o gás consumido pelo MCI, desconsiderando o queimado no “flare”).

Nos três testes, o consumo de combustível foi parecido, convergindo para que a eficiência fosse semelhante.

Para efeitos de comparação, num estudo de gaseificação feito pela UNICAMP, chegou-se a uma eficiência de 53,9% utilizando bagaço da cana-de-açúcar como combustível.

5.6.2 Eficiência do Sistema Piloto

A eficiência do sistema pode ser calculada pela taxa de consumo de biomassa pela quantidade de energia elétrica produzida. Considerando os dados do primeiro teste, a quantidade de biomassa consumida é de 49,6 kg/h. Considerando que o sistema esteja produzindo energia suficiente para suprir uma carga de 26 kW por hora, significa que a quantidade de biomassa necessária para se produzir um kW de energia elétrica é 1,9 kg de biomassa por kWh produzido.

$$\eta = Q_b / P, \text{ em que}$$

η = eficiência;

Q_b = quantidade de biomassa consumida pelo sistema;

P = quantidade de energia produzida.

5.6.3 Considerações Sobre a Possível Implantação do Sistema em uma Escala Real

Dimensionamento de um gaseificador concorrente para suprir a demanda de 100 residências populares equivalente a 635 kW de carga instalada e 0,14 kW (140 W) de potência real instantânea consumida (média do dia e entre as residências).

Nova Zelândia – Fluidyne Gasification (2004 apud Sánchez, 2010):

$$2 \text{ MWe} \iff 2 \text{ ton/h} \iff 1 \text{ kWe} \iff 1 \text{ kg/h de biomassa.}$$

UEL (180 kW_t)

$$26,4 \text{ kWe}; 49,6 \text{ Kg/h biomassa} \iff 1 \text{ kWe} \iff 1,88 \text{ kg/h biomassa.}$$

Observa-se que, para um gaseificador projetado por uma empresa que trabalha há 36 anos no setor em comparação com o projeto piloto, a diferença de consumo não é muita. Com base nestas referências, calcula-se o gaseificador necessário para suprir a demanda de 100 casas populares.

Consumo médio de uma residência: Média 139,97 W \approx 140 W instantânea por residência (considerando todo o período do dia)

Exemplo de 100 residências de uma vila popular de Ibiporã:

140 W (média de cada residência) x 100 residências x 720 horas (30 dias x 24 horas) = 10,80 MWh.

Total de residências 14.000 W, ou 14 kW instantâneos (o consumo nos horários de pico entra nesta média).

As 100 residências consomem juntas 14 kW instantâneos.

Pela carga instalada, de 100 unidades consumidoras (UC) de 50 A, tem-se a corrente total de 5.000 A.

Determinada a potência total instalada das 100 UC, que é de 635 kW (0,635 MW), foram efetuadas duas simulações:

- **Dimensionando com relação ao gaseificador de Nova Zelândia:** 635 kg/h de biomassa.

- Dimensionando com relação ao da UEL:

- 1.193,8 kg/h de biomassa para a carga instalada;
- para a carga consumida média das 100 residências de 14 kW, o sistema supre a necessidade, pois o máximo alcançado foi de 26,4 kW com 49,8 kg/h de biomassa. O máximo de potência extraída de um motor de combustão interna, utilizando gás de síntese é de 2 MW elétricos (HUGUES, 2003 apud SÁNCHEZ, 2010).

6 CONCLUSÕES

- Os resultados obtidos mostram que o motor pode funcionar com gás de síntese proveniente do gaseificador, utilizando madeira de Eucalipto.
- Nos 4 testes realizados, o consumo médio de eucalipto foi aproximadamente 46,49 kg/h, proporcionando uma relação A/C aproximada de 5,23 kg.ar/kg.biomassa para o primeiro teste, o qual utilizou somente um estágio de gaseificação e média aproximada de 10,18 kg.ar/kg.biomassa para os outros três testes. A relação F/A foi de 0,12 para o primeiro teste e média de 0,236 para os outros três testes.
- Com os dois estágios em operação, a quantidade de agente oxidante praticamente dobrou, porém a quantidade de biomassa consumida não aumentou proporcionalmente, ficando na mesma faixa.
- A composição média do gás de síntese produzido foi de 16,9% de H₂, 0,1% de O₂, 50,1% de N₂, 20% de CO, 10,9% de CO₂ e 2% CH₄.
- O gaseificador produziu a quantidade de gás suficiente e com qualidade para suprir a demanda do grupo gerador em potência máxima de 26,4 kW.
- Comparando o desempenho do grupo gerador alimentado com gás de síntese e GNV, observou-se que: a perda de potência utilizando gás de síntese foi de 11,6 kW (30,53%), e o consumo do gás de síntese foi superior em 7,15 vezes maior para a mesma carga (19 kW).
- Quando alimentado com gás de síntese, a tensão se manteve estável, dentro dos padrões estabelecidos pela Companhia Paranaense de Energia (COPEL, 2008), variando somente entre 222 e 223 V, quando é permitida a variação entre 221 a 229 V, enquanto que com GNV variou entre 220 e 225,3 V, não apresentando variações consideráveis quando abastecido com esses gases, e a frequência esteve sempre dentro do recomendado em 60 Hz.
- Para produzir um kW de energia elétrica foi necessário 1,9 kg de biomassa de eucalipto.
- A eficiência do gaseificador foi de 41,53%, referente a uma produção do gás de síntese de 67 m³/h.

– A operação do gaseificador se estabiliza na faixa de fatores de ar de 0,12 utilizando somente um estágio de gaseificação, em que se determinou o poder calorífico do gás em 5,48 MJ, considerado pela literatura um gás de médio poder calorífico e entre 0,21 e 0,28, utilizando os dois estágios de gaseificação.

REFERÊNCIAS

ACKERMANN, T.; ANDERSSON, G.; SÖDER, L. Distributed generation: a definition. **Electric Power Systems Research**, Oxford, UK: Elsevier Science, v. 57, n. 3, p. 195-204, 2001.

AIE – **Agência Internacional de Energia**. IEA Energy Statistics. 2006. Disponível em: <<http://www.iea.org/Textbase/stats/index.asp>>. Acesso em: 12 fev. 2011.

ALVES, O. L. **Técnicas de Síntese em Atmosfera Inerte**. Nota técnica. Instituto de Química. Campinas, SP: UNICAMP, 1986.

ANDRADE, R. V. **Gaseificação de biomassa: uma análise teórica e experimental**. Dezembro, 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, MG: UNIFEI, 2007.

ANDRÉ, R. **Desenvolvimento de processos de co-gaseificação de carvão com resíduos**. Tese (Doutorado em Ciências Aplicadas ao Ambiente) – Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal: UA, 2007.

ÂNGULO, M. B. B. **Experimentos de Gaseificação de Casca de Arroz em Leito Fluidizado**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Campinas. Campinas, SP: UNICAMP, 2002.

ANRE – Agency for Natural Resources and Energy. **Biomass Power Energy**. Disponível: <http://www.enecho.meti.go.jp/english/energy/new_energy/biomass.html> Acesso em: 12 fev. 2011.

BASU, P. **Combustion and gasification in fluidized beds**. Boca Raton: CRC Taylor & Francis, Feb. 2006.

BEN – **Balanco Energético Nacional 2011**: ano base 2010. Rio de Janeiro: EPE, 2011. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2011.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2011.

BHATTACHARYA, S. C; DUTT, A. Two-stage gasification of wood with preheated air supply: a promising technique for producing gas of low tar content. **ISES 99 Solar Wold Congress**, Israel, 1999.

BRIDGWATER, A. V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. **Chemical Engineering Journal**, Elsevier, v. 91, n. 2-3, p. 87-102, 15 Mar. 2003.

_____. The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. **Fuel**, v. 74, p. 631-653, May 1995.

_____; GRASSI, G. (Eds.). **Biomass pyrolysis liquids: upgrading and utilization**. Elsevier Applied Science, London, 1991.

BRISTOTI, A.; SILVA, J. L. dos S. **Diagnóstico da utilização e da oferta da biomassa vegetal no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Núcleo de Energia, PROMEC, UFRGS, 1993.

CASADO, M. L. **Desenvolvimento de um sistema de alimentação de combustível para motores diesel-gás**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: PUC-RJ, 2005.

CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Comparação Entre Tecnologias de Gaseificação de Biomassa Existentes no Brasil e no Exterior e Formação de Recursos Humanos na Região Norte**. Estado da Arte da Gaseificação. São Paulo: USP, set. 2002.

CHAUREY, A.; LATA, K.; MOHANTY, P.; KUMAR, A. **Renewable energy in South East Asia for improving access to energy (With focus on India and Nepal)**. Prepared for Global Network on Energy for Sustainable Development. New Delhi: TERI – The Energy and Resources Institute, 2005.

CIENTEC – Fundação de Ciência e Tecnologia. Governo do Estado do Rio Grande do Sul. Disponível em: <www.cientec.rs.gov.br>. Acesso em: 12 jan. 2012.

CLESCERI, L. S.; EATON, A.D.; GREENBERG, A. E.; RICE, E. W. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 21. ed. ASTM, 1983.

CNI – Confederação Nacional da Indústria. **Matriz Energética: Cenários, Oportunidades e Desafios**. Brasília: CNI, 2007.

COPEL. NTC 901100. **Fornecimento em tensão secundária de distribuição**. Normas Técnicas COPEL; Coordenação de Comercialização de Energia - CCD, Coordenadoria de Procedimentos e Tecnologia de Medição – CNMD, 2008. Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcArquivos.nsf/159BA3974D2CFCBE032575CF00456FD6/\\$FILE/revisao_06042009-bt.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcArquivos.nsf/159BA3974D2CFCBE032575CF00456FD6/$FILE/revisao_06042009-bt.pdf)>. Acesso em: 12 jan. 2012.

CORONADO, C. R.; SILVEIRA, J. L.; ARAUZO, J. P. Metodologia de dimensionamento, análise energética e seleção de equipamentos de um gaseificador de biomassa para o acionamento de um motor de combustão interna. In: **Encontro de Energia no Meio Rural**, Campinas, SP, v. 6, 2006.

CORTEZ, L. A. B. et al. (Orgs.). **Biomassa para energia**. Campinas, SP: UNICAMP, 2008.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S. (Coords.). **Tecnologia de Conversão Energética da Biomassa**. Manaus: EDUA/EFEI, 1997.

DI BLASI, C. Modelling for fast pyrolysis of cellulosic particles in fluid-bed reactors. **Chemical Engineering Science**, v. 55, n. 24, p. 5999-6013, Dec. 2000.

DUARTE, M. M. L. **Estudos sobre a gaseificação da madeira com ar em gaseificador co-corrente**. Dissertação de Mestrado, departamento de Engenharia Química. UNICAMP. Campinas, SP, 1983.

EFUNDA. **Orifice Flowmeter Calculator**. Disponível em: <http://www.efunda.com/formulae/fluids/calc_orifice_flowmeter.cfm>. Acesso em 02 fev. 2012.

ER-BR – Energias Renováveis. Informações fornecidas pessoalmente. 2010, 2011, 2012.

FEO, G. de; BELGIORNO, V.; ROCCA, C. D.; NAPOLI, R. M. A. Energy from gasification of solid wastes. **Science Direct**, Fisciano (SA), Italy: Elsevier, v. 23, n. 1, p. 1-15, 2002.

FONSECA, A. D. **Biomass To Liquids**: Uma contribuição ao estudo da obtenção de biocombustíveis sintéticos através da síntese fisher-tropsch. 2009. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo: USP, 2009.

GODINHO, M. **Gaseificação e combustão de resíduo sólidos da indústria calçadista**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre: UFRS, 2006.

HASSLER, P.; NUSSBAUMER, T. Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification. **Biomass & Bioenergy**, v. 16, p. 385-395, 1999.

GUARDABASSI, P.M. **Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia: perspectivas para países em desenvolvimento**. 2006. Dissertação (Mestrado em Energia) – Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo: USP, 2006.

IEA – **ENERGY INTERNATIONAL AGENCY**. Paris, França, 2010. Disponível em: <<http://www.iea.org/>>. Acesso em: 29 maio 2011.

IPCC – Intergovernmental panel on climate change. 2007. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch>>. Acesso em: 12 jan. 2012.

JANSEN, J. P.; KOPPEJAN, J.; MEULMAN, P. D. M. Perspectives for Reduction of NO_x and Dust Emissions in Small-scale energy Production from Clean World. In: **12th European conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection**, Amsterdam, The Netherlands. June, 2002.

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.; TURNS, S. Q.; OVEREND, R. P.; BAIN, R. L. Power Generation potential of Biomass Gasification Systems. **Journal of Energy Engineering**, v. 123, n. 3, p. 88-99, 1997.

- KINTO, O. T.; UDAETA, M. E. M. **Produção local de energia através da gaseificação da biomassa para geração de energia elétrica no médio Paranapanema**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2001.
- LORA, E. S.; HADDAD, J. **Geração Distribuída Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais**. Rio de Janeiro: Interciência, 2006.
- MAKRAY, Z. T.; Gaseificação de Madeira em Gaseificador Co-corrente Para Produção de Gás de Médio Poder Calorífico e Gás de Síntese. Dissertação de mestrado. UNICAMP, Campinas – SP, 1984.
- MARTINS, Lydimilla Santos. **Geração de Energia através de Biomassa**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES: UFES, 2006.
- MENDIS, M. S; STASSEN, H. E. M.; STILES, H. N. **Biomass gasification: field monitoring results**. Biomass, Elsevier, v. 19, p. 1-18, 1989.
- MIGLIORINI, Antonio José. Densificação de Biomassa Florestal. **Série Técnica IPEF**, Piracicaba, v. 1, n. 2, p. C.1-C.9, jul.1980.
- MILNE, T. et al. **Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems**. Golden, Colorado: U. S. Department of Energy. 1988.
- MUKUNDA, H. S., DASAPPA, S., SHRINIVASA, U. **Open-top Wood Gasifiers**. Renewable Energy – Sources for Fuels and Electricity. London: Earthscan, 1993.
- MURARO, Wilson. **Avaliação do Funcionamento de Motor Ice com Gás de Baixo Poder Calorífico Proveniente da Gaseificação da Casca de Arroz**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo: USP, 2006.
- MWM. **Catálogo motor**. Disponível em: <<http://www.nav-international.com.br/default.asp?su=3&pa=subSeries&idSubSerie=9>>. Acesso em: nov. 2011.
- NARUC. **Review of utility interconnection, tariff and contract provisions for distributed generation**. A Report to NARUC Committee on Energy Resources and the Environment. Washington: R. W. Beck & Distributed Utilities Associates, Jan. 1999.
- NARVÁEZ, I.; ORÍO, A.; AZNAR, M. P.; CORELLA, J. Gasification with air in an atmospheric bubbling fluidized bed: effect of six operational variables on the quality of the produced raw gas. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 35, p. 2110-2120, 1996.
- OGADA, T.; WERTHER, J. Combustion characteristics of wet sludge in a fluidized bed – Release and combustion of the volatiles. **Fuel**, v. 75, p. 617-626, 1995.
- OLOFSSON, I.; NORDIN, A.; SÖDERLIND, U. Initial review and valuation of process technologies and systems suitable for cost - efficient medium - scale gasification for

biomass to liquid fuels. **Umea University and Mid Swedish University**, Umea, Suécia, março, 2005.

PEREIRA, M. R. C. **Projecto de um gaseificador de biomassa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) – Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal: UA, 2009.

PROBSTEIN, R. F.; HICKS, R. E. **Synthetic Fuels**. 1. ed. New York: McGraw Hill Book Company, 1982.

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.

SALES, C. A. V. B; ANDRADE, R. V.; LORA, E. E. S. Geração de eletricidade a partir da gaseificação de biomassa. **Biomassa & Energia**, Campinas, SP, v. 2, n. 3, p. 145-204, 2005.

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

SILVEIRA, L. B. R. S. **Energia Elétrica para o Desenvolvimento Sustentável**. São Paulo: Edusp, 2000.

SORDI, A. et al. Gaseificação de biomassa e célula a combustível: sistema com célula tipo PEMFC. In: **Encontro de Energia no Meio Rural**, Campinas, SP, v. 6, 2006.

SPEIGHT, J. **Synthetic fuels handbook: properties, process and performance**. McGraw Hill, 2008.

TERMOQUIP – Energia alternativa LTDA. Campinas, 2009. Disponível em: <<http://www.termoquip.com.br>>. Acesso em: 21 mar. 2011.

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: 05 nov. 2011.

WHITE MARTINS. Informações fornecidas pessoalmente. 2011.

RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se, em trabalhos futuros da pesquisa na área da gaseificação envolvendo o projeto piloto, o aprimoramento das técnicas de operação, maior quantidade de análises dos pontos considerados neste trabalho, utilização da energia gerada e ainda:

1. Monitoramento da composição do gás de síntese com maior frequência e com a alteração das variáveis de gaseificação.
2. Determinação e desenvolvimento, ou aplicação de técnica de remoção do alcatrão presente no gás de síntese.
3. Autossuficiência na utilização do sistema piloto.
4. Utilização de outros tipos de biomassa.
5. Conexão do sistema à rede elétrica.

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



Fonte: Marigonda (2011).

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

Figura 2 – Quadro de comando do gaseificador



Fonte: Marigonda (2011).

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

Figura 3 – Quadro de comando do gaseificador



Fonte: Marigonda (2011).

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



Fonte: Marigonda (2011).

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



Fonte: Marigonda (2011).

c) As válvulas, de regulagem 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



Fonte: Marigonda (2011).

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



Fonte: Marigonda (2011).

- 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



Fonte: Marigonda (2011).

- 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”



Fonte: Marigonda (2011).

- 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.

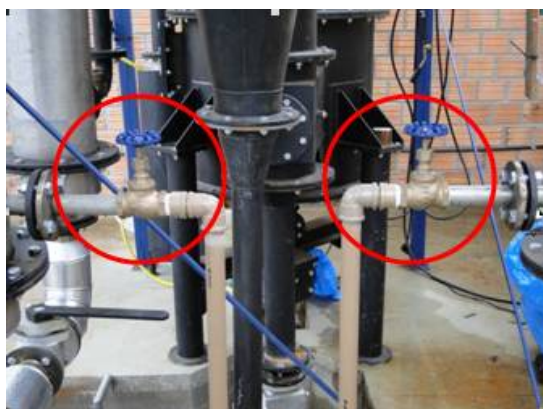
Figura 11 – Registro (detalhe) de liberação da água para trocadores de calor, grelha e torre de resfriamento e registro de abastecimento do tanque de armazenamento



Fonte: Marigonda (2011).

- 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



Fonte: Marigonda (2011).

- 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



Fonte: Marigonda (2011).

- 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



Fonte: Marigonda (2011).

- 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



Fonte: Marigonda (2011).

- 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



Fonte: Marigonda (2011).

- 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



Fonte: Marigonda (2011).

- 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



Fonte: Marigonda (2011).

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



Fonte: Marigonda (2011).

- 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



Fonte: Marigonda (2011).

- 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”



Fonte: Marigonda (2011).

- 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



Fonte: Marigonda (2011).

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

Figura 25 – Maçarico



Fonte: Marigonda (2011).

- 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”



Fonte: Marigonda (2011).

- 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).

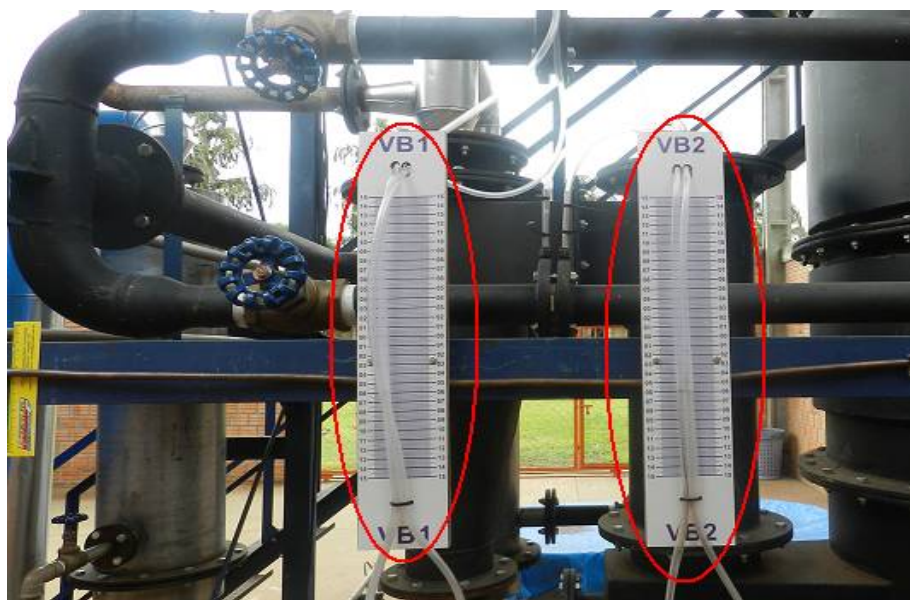
Figura 27 – Acionamento e ajuste de rotação da grelha



Fonte: Marigonda (2011).

- 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



Fonte: Figueiredo (2012).

- 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 2° estágio, 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.
- g) 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).

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 sobre pressão)

- 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.

ANEXOS

ANEXO 1 – ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO DO GÁS DE SÍNTESE



Método de Análise: SV O 01.07

Pag 1 de 2

Emissão: 16/03/2011

Elaboração: Alessandro Quirino

Métodos agregados:

MÉTODO DE ANÁLISE

PRODUTO: Corrente Gasosa

COMPONENTE ANALISADO: Oxigênio (O₂) – 0,1 a 100%

CONDIÇÕES DE ANÁLISE

Equipamento: Servomex 570A

Detetor: Paramagnético

Princípio de Operação

O analisador mede a susceptibilidade paramagnética do gás de amostra por meio de uma célula de medição tipo magneto-dinâmica.

A susceptibilidade paramagnética do oxigênio é significativamente maior do que a de outros gases comuns. Simplificando, isso significa que as moléculas de oxigênio são atraídas muito mais fortemente por um campo magnético que as moléculas de outros gases, a maioria dos quais são ligeiramente diamagnético (repelidos por um campo magnético). Analisadores de magneto-dinâmica de oxigênio são baseados em método de Faraday para determinar a força magnética desenvolvida por um campo não-uniforme em um corpo de prova (sino) diamagnético suspensas no gás de amostra.

Quando uma amostra de gás contendo oxigênio envolve o sino, as moléculas de oxigênio são atraídas para a parte mais forte do campo magnético, alterando assim as forças que atuam sobre o sino, causando um deslocamento do feixe de luz nas fotocélulas, que resulta em uma diferença de sinal, que é sentida pelo amplificador. A saída do amplificador é uma corrente, proporcional ao teor de oxigênio da amostra, que é alimentado para a bobina de realimentação da célula de medição. Isso produz um campo magnético, que se opõe as forças fazendo com que o sino gire. Assim, o sino é retido na sua posição original.

Revisão: 00

Data:16/03/11

Aprovação:



Método de Análise: SV O 01.07

Pag 2 de 2

Emissão: 16/03/2011

Elaboração: Alessandro Quirino

Métodos agregados:

Análise

Zero

Introduzir o gás zero (nitrogênio de pureza normalmente alta) em uma pressão entre 1,3 e 10 psig (2,3 a 70 kPa). Use uma chave de fenda para girar o parafuso e ajustar Zero no lado do analisador para obter uma indicação de 0,00 no visor. No entanto, se o gás zero não é de nitrogênio, um zero equivalente pode ser obtido girando o parafuso para ajustar Zero e obter uma indicação alternativa, determinada pela susceptibilidade paramagnética do gás de zero escolhido.

Span

Introduzir o gás de calibração (normalmente ar limpo e seco), a uma pressão entre 1,3 e 10psig (2,3 a 70 kPa). Ajuste o controle de span para obter a indicação correspondente (21,0% para ar seco). O analisador está agora calibrado e pronto para uso.

Fazer uma leitura de oxigênio

Após a calibração, o analisador está pronto para uso, ligando a amostra de gás em uma pressão de 1,3 a 10 psig (2,3 a 70 kPa) para a entrada de gás. O teor de Oxigênio % é exibido no painel frontal. Um aspirador de mão pode ser usado para alimentar o equipamento.



Método de Análise: SV D 01.12

Pag 1 de 2

Emissão: 15/06/2011

Elaboração: Alessandro Quirino

Métodos agregados: SV M 01.07, SV M 03.04

MÉTODO DE ANÁLISE

PRODUTO: Corrente Gasosa, Biogás, Ar atmosférico

COMPONENTE ANALISADO: Monóxido de Carbono (CO), Metano (CH₄) e Dióxido de Carbono (CO₂)

CONDIÇÕES DE ANÁLISE

Equipamento: Cromatógrafo Gasoso SRI 8610C

Detetor: TCD (canal 4)

Corrente no detetor: low

Temperatura no detetor: 150°C

Coluna: Shincarbon – 2m

Gás de arraste: He , pressão no manômetro 80 psi

Pressão na coluna: 75 psi (canal 2)

Vazão na coluna: 7,0 a 15,0 ml/min

Arquivo para condicionamento: shincarbon

Temperatura inicial: 40°C por 2 min

Temperatura final : 200°C (50°C/min)

Volume de amostragem: 0,25 ml

Tempo de análise: 6,0 min

Tempos de Retenção (aprox.)

CO = 1,6 min, Metano = 3 min e |CO₂ = 5 min

Revisão: 00

Data: 15/06/11

Aprovação:



Método de Análise: SV D 01.12

Pag 2 de 2

Emissão: 15/06/2011

Elaboração: Alessandro Quirino

Métodos agregados: SV M 01.07, SV M 03.04

Comentários:

1. Para condicionar o cromatógrafo nas condições de análise deste método ,selecionar no diretório a pasta com os arquivos de nome *shincarbon*. Consultar item 5 (Seleção de Métodos) do Procedimento NGE 700.300.

3. Variando-se o Loop, pode-se analisar outra faixa de concentração.



Método de Análise: SV H 01.03

Pag 1 de 1

Emissão: 15/06/2011

Elaboração: Alessandro Quirino

Métodos agregados: N/A

MÉTODO DE ANÁLISE

PRODUTO: Corrente Gasosa, Gás de Coqueria, Gás de Alto Forno

COMPONENTE ANALISADO: Hidrogênio (H₂) %

CONDIÇÕES DE ANÁLISE

Equipamento: Cromatógrafo Gasoso Varian CG 3400

Detetor: TCD – Condutividade Térmica

Corrente no detetor: low

Temperatura no detetor: 150°C

Coluna: MS 5A – 80-100 mesh (empacotada)

Gás de arraste: N₂, pressão no manômetro 10 psi

Pressão na coluna: 10 psi

Vazão na coluna: 15 ml/min

Arquivo para condicionamento: Method 1

Temperatura inicial: 100°C

Temperatura final : 100°C

Volume de amostragem: 0,25 ml

Tempo de análise: 2,0 min

Tempo de Retenção (aprox.)

H₂ = 1,3 min

Revisão: 00

Data:15/06/11

Aprovação:



Certificado N° 029/11

Pág.: 1/2

Certificado de Análise

Cliente: UEL – Universidade Estadual de Londrina

Ref.: Proposta PTC 11068

Produto: Corrente Gasosa proveniente de Gás de Síntese de um Sistema de Degaseificação.

Ponto A: Antes do Filtro

Hora	Resultados de Análise					
	Hidrogênio (%)	Oxigênio (%)	Nitrogênio (%)	Monóxido de Carbono (%)	Dióxido de Carbono (%)	Metano (%)
14:05	12,1	5,8	54,3	15,9	10,4	1,5

Ponto B: Antes do Gasômetro

Hora	Resultados de Análise					
	Hidrogênio (%)	Oxigênio (%)	Nitrogênio (%)	Monóxido de Carbono (%)	Dióxido de Carbono (%)	Metano (%)
10:15	> 0,1	20,9	78,7	< 0,1	0,4	< 0,1
14:15	7,5	10,7	67,1	8,4	5,3	0,9
14:55	16,9	0,2	50,9	19,5	10,5	2,0

Ponto C: Depois do Gasômetro

Hora	Resultados de Análise					
	Hidrogênio (%)	Oxigênio (%)	Nitrogênio (%)	Monóxido de Carbono (%)	Dióxido de Carbono (%)	Metano (%)
14:25	17,7	0,4	47,3	20,6	11,7	2,3
14:35	16,3	< 0,1	51,0	20,0	10,7	2,0
14:45	16,6	< 0,1	50,6	20,0	10,8	2,0
15:05	17,0	< 0,1	51,1	19,4	10,7	1,8
15:50	16,9	< 0,1	50,6	19,8	10,6	2,1

Ponto D: Chama Piloto

Hora	Resultados de Análise					
	Hidrogênio (%)	Oxigênio (%)	Nitrogênio (%)	Monóxido de Carbono (%)	Dióxido de Carbono (%)	Metano (%)
10:55	14,2	0,2	50,3	20,8	11,6	2,9
11:10	14,6	0,2	51,4	20,4	11,1	2,3
11:27	14,6	0,2	50,0	21,9	11,0	2,3

Ponto E: Escapamento

Hora	Resultados de Análise					
	Hidrogênio (%)	Oxigênio (%)	Nitrogênio (%)	Monóxido de Carbono (%)	Dióxido de Carbono (%)	Metano (%)
15:20	0,1	0,2	79,0	1,8	18,9	< 0,1



Certificado Nº 029/11

Pág.: 2/2

Observações:

Data da análise: 28/06/2011

Resultados expressos em relação mol/mol (%).

Método de análise para H₂, N₂, CO, CO₂ e CH₄: Cromatografia Gasosa com Detetor de Condutividade Térmica.

Método de análise para O₂: Processo paramagnético.

Rastreabilidade: Rastreável a massas padrões conforme certificado de calibração da RBC-INMETRO Nº: M 25944/08.

Proibida a reprodução total ou parcial sem autorização por escrito.


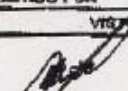
Data Emissão: 30/06/2011

Certificado No.: 029/11

Toshiyuki Yamashita

Gerente de Serviços – Gases Especiais
CRQ IV Região No. 04204107

ANEXO 2 - LAUDO TÉCNICO DO GNV

 <p>White Martins Gases Industriais Ltda - Brasil Rua Antonio Faria, 42000 - Paulista - São Paulo - CEP 13140009 Telefone: (19) 3528-0000 - FAX: (19) 3528-8029 - e-mail: jar_martin@white.com</p>			Telefone de Emergência 0800 7089000	
CERTIFICADO DE GARANTIA DA QUALIDADE				
PRODUTO GNL - Gas Natural Liquefeito			Nº CERTIFICADO 18452	Nº páginas 1 / 1
USINA Paulinia				
CLIENTE				
NOME GNL Gastech				
ENDEREÇO AVENIDA BRASILIA, 2267 Nossa Senhora do - Da Ilerra CEP : 86025180 - LONDRINA - LONDRINA				
CARACTERÍSTICA			VALORES	
DESCRIÇÃO	MÉTODO DE ANÁLISE	UNIDADE	ANÁLISE	ESPECIFICAÇÃO
Poder Calorífico Superior (2)	ISO 6978	kcal / M3	9.577,86	8819,9 a 10835,8
	ISO 6978	kJ / M3	40.100,57	36927 a 45387,4
Índice de Wobbe (3)	ISO 6978	KJ / M3	51380	48880 a 53600
Metano, Mín.	ISO 6974	% Mol / Mol	91,8105	85,0000 a 100,0000
Etano, Máx.	ISO 6974	% Mol / Mol	6,0325	0 a 12,0000
Propano, Máx.	ISO 6974	% Mol / Mol	1,5722	0 a 6,0000
Butano e mais pesados, Máx.	ISO 6974	% Mol / Mol	,5824	0 a 3,0000
Oxigênio, Máx.	ISO 6974	% Mol / Mol	0	0 a 1,5000
Inertes (N2 + CO2), Máx.	ISO 6974	% Mol / Mol	,2222	0 a 1,0000
Enxofre Total, Máx.	ISO 6326-2	Miligramas / M3	0	<10
Gás Sulfídrico (H2S), Máx.	ISO 6326-2	Miligramas / M3	0	<10
Ponto de orvalho a 1 atm, Máx.	ISO 6327	° C	-82	-100 a -15
Numero de metano, mín.	ISO 15403		78,8965	> 86
CO2, máx.	ISO 6974	% Mol / Mol	0	0 a 3,0000
P O de Hidrocarbonetos 4,5 MPa	ISO 15403	° C	PASSA	0 a 5,0000
Taxa de Vaporização			609	550 a 650
Densidade Absoluta do Gás		Kg / m3	,7380	,50000 a ,80000
OBSERVAÇÕES (1) Limites especificados são valores referidos a 203,16K (20°C) e 101,325kPa (1atm) em base seca, exceto ponto de orvalho. (2) O poder calorífico de referência de substância pura encontra-se sob condições de temperatura e pressão equivalentes a 293,15K, 101,325kPa, respectivamente em base seca. (3) O índice de Wobbe é calculado empregando o Poder Calorífico Superior em base seca. (4) Pode-se dispensar a determinação do ponto de orvalho de hidrocarbonetos - POH quando os testes de propano e de butano e mais pesados forem ambos inferiores a 3 e 1,5 por cento molares respectivamente de acordo com o método NBR 14803 ou equivalente. Anotar neste caso 'passa' no referido campo. Em conformidade com a resolução ANP nº 16, de 17.06.2008 - DOU 1 de 18.06.2008				
FORNECIMENTO				
CARRO - TANQUE	Nº	DATA / HORA		
	1	18/03/10 17:28:0		
CERTIFICADO EMITIDO POR				
NOME	VISTO	DATA EMISSÃO		
Martins, Aparecido Donisete		18/03/10		