



**ESTUDO DA GASEIFICAÇÃO DA TORTA DO COCO
MACAÚBA, LENHA DE EUCALIPTO, LENHA DE CAFÉ E
DO CARVÃO VEGETAL E SEU POTENCIAL
ENERGÉTICO PARA DESIDRATAÇÃO DE FRUTAS**

JAIME DOS SANTOS FILHO

2009

JAIME DOS SANTOS FILHO

**ESTUDO DA GASEIFICAÇÃO DA TORTA DO COCO MACAÚBA, LENHA
DE EUCALIPTO, LENHA DE CAFÉ E DO CARVÃO VEGETAL E SEU
POTENCIAL ENERGÉTICO PARA DESIDRATAÇÃO DE FRUTAS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia-UESB, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Área de Concentração em Fenômenos de Transferência na Agroindústria, para obtenção do título de “Mestre”.

Orientador: Prof. Ph.D. Jadir Nogueira da Silva

Co-Orientador: Prof. D.Sc. Modesto Antonio Chaves

**ITAPETINGA – BAHIA - BRASIL
MARÇO- 2009**

664.804 S235e	<p>Santos Filho, Jaime dos.</p> <p>Estudo da gaseificação da torta do coco macaúba, lenha de eucalipto, lenha de café e do carvão vegetal e seu potencial energético para desidratação de frutas. / Jaime dos Santos Filho. – Itapetinga: Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, 2009.</p> <p>97p.</p> <p>Dissertação do Programa de Pós-Graduação “<i>Strictu Senso</i>” do Curso de Especialização em Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia. Sob a orientação do Prof. DSc. Jadir Nogueira da Silva e co-orientação do Prof. DSc Modesto Antonio Chaves.</p> <p>1. Frutas – Desidratação – Pesquisas. 2. Carvão vegetal – Usos – Desidratação de frutas. 3. Gaseificador – Usos – Secagem de produtos agrícolas. I. Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos. II. Silva, Jadir Nogueira da. III. Chaves, Modesto Antonio. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD(21): 664.804</p>
------------------	---

Catalogação na Fonte:

Cláudia Aparecida de Souza – CRB 1014-5ª Região
Bibliotecária – UESB – Campus de Itapetinga-BA

Índice Sistemático para desdobramentos por assunto:

1. Frutas – Desidratação
2. Carvão vegetal – Usos
3. Produtos agrícolas – Secagem
4. Gaseificador – Usos

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA – UESB
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE ALIMENTOS

Área de Concentração em Fenômenos de Transferência na Agroindústria

Campus de Itapetinga – BA

TERMO DE APROVAÇÃO

Título: “Estudo da gaseificação da torta do coco macaúba, lenha de eucalipto, lenha de café e do carvão vegetal e seu potencial energético para desidratação de frutas”.

Autor: Jaime dos Santos Filho

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de **Mestre em Engenharia de Alimentos**, área de concentração em **Fenômenos de Transferência na Agroindústria**, pela Banca Examinadora:

Prof. Ph.D. Jadir Nogueira da Silva – UFV
Presidente

Prof^a. D.Sc Ronielli Cardoso Reis– UESB

Prof. D.Sc. Evandro Sena Freire - UESC

Data da defesa: 18/03/2009

DEDICATÓRIA

A minha mãe, *Edil Borges* e a minha filha *Ana Livia*.

*“Nunca perca a fé na humanidade,
pois ela é como um oceano.
Só porque existem algumas gotas de
água suja nele, não quer dizer que ele
esteja sujo por completo.”
Mahatma Gandhi*

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal da Bahia, Campus de Vitória da Conquista, por ter efetivado minha liberação para a realização deste curso;

Às Universidade do Sudoeste da Bahia, Departamento de Engenharia de Alimentos e Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade;

Ao professor Jadir Nogueira da Silva, pela orientação e ensinamentos;

Aos professores do curso de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, em especial ao prof. Modesto, meu co-orientador;

Aos colegas de curso: Alexandra, Calila, Elisa, Ellen, Eron, Gutto, Ivan, Jaqueline, Normane e Regina pela ajuda e principalmente pelo convívio amigo;

Aos amigos da área do Armazenamento da UFV: Carlos (laranja), Hamilton, Samuel, Svetlana, Zanatta e William pela colaboração na montagem do experimento;

À Bárbara e Viviane secretárias do mestrado que sempre nos ajudam e nos dão forças;

A minha esposa, pais e irmãos; e

À todos que de alguma forma contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho. Á todos muito obrigado.

RESUMO

SANTOS FILHO, J. dos. Estudo da gaseificação da torta do coco macaúba, lenha de eucalipto, lenha de café e do carvão vegetal e seu potencial energético para desidratação de frutas. Itapetinga – BA: UESB, 2009. (Dissertação – Mestrado em Engenharia de Alimentos – Fenômenos de Transferência na Agroindústria)⁽¹⁾.

A gaseificação apresenta-se como uma promissora forma de conversão da biomassa em energia térmica, podendo ser definida como a conversão da biomassa em gás energético por meio da combustão incompleta devido à restrição no fornecimento do ar a temperaturas elevadas, obtendo-se como consequência a produção de um gás combustível. Este trabalho de pesquisa teve por objetivo realizar um estudo da gaseificação da torta do coco macaúba, da lenha de eucalipto, da lenha de café e do carvão vegetal e seu potencial energético como fonte calorífica para um sistema de desidratação de frutas. Desenvolveu-se, portanto, um gaseificador de biomassa de fluxo concorrente de pequena escala, ao qual foi acoplado uma câmara para combustão do gás produzido visando à geração de ar quente limpo. Foram medidas as temperaturas de quatro pontos distintos do gaseificador a fim de verificarmos o comportamento de diferentes zonas em função da temperatura, assim como o fluxo de ar de entrada (reator e combustor) e de saída (misturador), temperatura e umidade do ar, consumo de energia elétrica e a qualidade do ar de secagem. Antes da realização do experimento, foram calculadas algumas das principais características dos combustíveis, como umidade, Poder Calorífico Superior e massa específica. A biomassa foi utilizada em pedaços com diâmetro médio de 5 ± 1 cm e comprimento médio de 5 ± 2 cm, com exceção da torta de macaúba. A torta do coco macaúba foi utilizada pura (100%) e misturada ao carvão vegetal em três combinações (75%+25%, 50%+50% e 25%+75%) para a gaseificação com o sistema em regime permanente, porém não obteve resultado satisfatório em nenhum dos testes. Depois de testado o equipamento, foi dado início ao experimento usando a lenha de eucalipto como fonte de energia, variando a velocidade do motor em intervalo de medições de quinze minutos. Os testes apresentaram duração média de 2:15h, sendo que são necessários cerca de dois a três minutos para gerar gás combustível e 20 minutos para atingir as condições ideais de funcionamento. O sistema operou para as biomassas torta do coco macaúba, da lenha de eucalipto, da lenha de café e do carvão vegetal com a temperatura média e umidade relativa média do ar ambiente, respectivamente, de 23,44°C e 68,15 %, 20,46°C e 72,53 %, 19,60°C e 72,84 % e 20,70°C e 67,11 %. As temperaturas indicadas pelos termopares foram às esperadas. A temperatura do ar de secagem foi mantida em aproximadamente 70°C, por meio do controle do ar de entrada no misturador. O reabastecimento do reator, feito com o sistema em pleno funcionamento, permitiu estabilidade e continuidade operacional do sistema. Observa-se, assim, que o sistema composto por um reator para gasificação de biomassa de fluxo concorrente acoplado a uma câmara para combustão do gás produzido pode ser considerado como uma alternativa na geração de calor para a secagem de produtos agrícolas, competindo com os métodos tradicionais de geração de calor. Neste sentido, os resultados analíticos da pesquisa nos levam a inferir que a lenha de eucalipto, a lenha de café e o carvão vegetal possuem potencial como combustível na gaseificação para a desidratação de frutas, sendo que se recomenda o carvão vegetal dentre os combustíveis como fonte energética para o fornecimento de ar quente e limpo para a desidratação de frutas.

Palavras-chave: Gaseificador, secagem, biomassa, energia renovável.

¹ Orientador: Jadir Nogueira da Silva, Ph. D., UFV e Co-orientador: Modesto Antonio Chaves, D.Sc, UESB.

ABSTRACT

SANTOS FILHO, J. dos. Comparative study of gasification of cake of coconut macaúba, of wood of eucalyptus, of wood of coffee and coal plant fruit for dehydration. Itapetinga – BA: UESB, 2009. (Dissertation – Master Degree in Food Engineering – Transfer Phenomena in Agribusiness)⁽¹⁾.

The gasification is presented as a promising way of converting biomass into thermal energy. Can be defined as the conversion of biomass into energy gas, through the incomplete combustion due to the restriction in the supply of the air, resulting in high temperatures as a consequence, the production of a fuel gas. This study aimed to research, conduct a comparative study of the gasification of "macaúba's" coconut cake, eucalyptus firewood, coffee's firewood and vegetable coal on the system for dehydration of fruit, using hot air. Was developed a concurrent flow biomass gasified of small-scale, which was coupled to a combustion chamber of the gas produced to generate hot air and clean. Was measure the temperature to four different points of gasified to verify the behavior of different areas depending on the temperature and the flow of air entry (reactor and combustor) and output (mixer), temperature and air humidity, consumption electric power and quality of the drying air. Before the experiment, were calculated some of the main characteristics of fuels, such as moisture, calorific value and density. The fuel was used in pieces with an average diameter of 5 ± 1 cm and the average length of 5 ± 2 cm, with exception of the "macaúba" cake. The "macaúba" coconut cake was used in pure (100%) and mixed with the charcoal in three combinations (75% +25%, 50% + 50% and 25% + 75%) for the gasification with the system on a permanent basis, but did not obtain satisfactory results in any of the tests. After testing the equipment, was beginning to experiment using eucalyptus firewood as an energy source, varying the motor's speed, in a 3X3 factorial design, in triplicate, with three replicates and range measurements of fifteen minutes. The tests showed the average duration of 2:15h, about two to three minutes are needed to generate fuel gas and 20 minutes to reach the ideal conditions of operation. The system operated for biomass: "macaúba" coconut cake, the firewood of eucalyptus, coffee firewood and the vegetable coal with average temperature and average relative humidity of ambient air, respectively (23.44 °C and 68.15%), (20.46 °C and 72.53%), (19.60 °C and 72.84%) and (20.70 °C and 67.11%). The temperatures indicated by thermocouples (thermopar) was expected. The temperature of the drying air was maintained at approximately 70 °C through the control of air entering the mixer. The refueling of the reactor, made with the system in full operation, has stability and continuity of the system. Observe that the system consists of a reactor for gasification of biomass, concurrent flow, coupled to a chamber for combustion of the gas produced can be considered as an alternative to generate heat for drying of agricultural products, competing with the methods traditional generation of heat. In this case the analytical results of research lead us to infer that the eucalyptus firewood, coffee firewood and the vegetable coal have potential as a fuel for the gasification, for dehydration of fruit, which is recommended from the vegetable coal as the fuel source energy to supply hot air and clean for the dehydration of fruits.

Keywords: Gasifier, drying, biomass and renewable energy.

*Adviser Jadir Nogueira da Silva, Ph. D., UFV e Co-adviser: Modesto Antonio Chaves, DSc., UESB

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 – Energia consumida em função da velocidade e da biomassa	71
Gráfico 4.2 – Tensão trifásica da gaseificação da lenha de eucalipto	72
Gráfico 4.3 – Corrente trifásica da gaseificação da lenha de eucalipto	72
Gráfico 4.4 – Potência elétrica trifásica da gaseificação da lenha de eucalipto	73
Gráfico 4.5 – Tensão trifásica da gaseificação da lenha de café.....	73
Gráfico 4.6 – Corrente trifásica da gaseificação da lenha de café	74
Gráfico 4.7 – Potência elétrica trifásica da gaseificação da lenha de café	74
Gráfico 4.8 – Tensão trifásica da gaseificação do carvão vegetal	75
Gráfico 4.9 – Corrente trifásica da gaseificação do carvão vegetal	75
Gráfico 4.10 – Potência elétrica trifásica da gaseificação do carvão vegetal	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Preço do Kg em R\$, de algumas frutas	16
Tabela 1.2 – Valorização do preço do Kg, em %, de algumas frutas	16
Tabela 2.1 – Métodos de conservação de alimentos pelo controle de umidade	19
Tabela 2.2 – Poder calorífico de biomassas diversas, em KJ.Kg^{-1}	31
Tabela 2.3 – Produtividade média de óleo por hectare, de algumas oleaginosas	39
Tabela 2.4 – Classificação científica do eucalipto	40
Tabela 2.5 – Classificação científica do café	42
Tabela 4.1 – Tensão térmica, taxa de consumo de combustível e de combustão das biomassas utilizadas	64
Tabela 4.2 – Análise das biomassas utilizadas	64
Tabela 4.3 – PCS de algumas oleaginosas	65
Tabela 4.4 – Propriedades físicas das biomassas utilizadas	66
Tabela 4.5 – Valores médios das temperaturas lidos pelos termopares, durante a gaseificação da lenha de eucalipto	67
Tabela 4.6 – Valores médios das temperaturas lidos pelos termopares, durante a gaseificação da lenha de café	68
Tabela 4.7 – Valores médios das temperaturas lidos pelos termopares, durante a gaseificação do carvão vegetal	68
Tabela 4.8 – Média da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) do ar atmosférico durante o experimento	69
Tabela 4.9 – Média da umidade relativa (%) do ar atmosférico durante o experimento	70
Tabela 4.10 – Consumo médio da energia durante o experimento, para cada biomassa	76
Tabela 4.11 – Média dos valores obtidos da qualidade do ar de saída durante o experimento, para cada biomassa	77
Tabela 4.12 – Valores médios do desempenho do sistema, durante a gaseificação da lenha de eucalipto	78
Tabela 4.13 – Valores médios do desempenho do sistema, durante a gaseificação da lenha de café	78
Tabela 4.14 – Valores médios do desempenho do sistema, durante a gaseificação do carvão vegetal	78
Tabela B.1 – Determinação da velocidade do motor	88
Tabela C.1 á C.30 – Tabelas estatísticas	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Frutas desidratadas	14
Figura 2.1 – Esquema da influência do agente gaseificante no gás produzido	27
Figura 2.2 – Reator de gaseificadores: a) gaseificador concorrente, (b) gaseificador contracorrente, (c) gaseificador de fluxo cruzado e (d) gaseificador de leito fluidizado	29
Figura 2.3 – a) Cacho do coco macaúba e b) coco macaúba em detalhe	38
Figura 2.4 – Sabão da amêndoa do coco macaúba	38
Figura 2.5 – Subprodutos do coco macaúba: sabão, óleo e torta	39
Figura 3.1 – Início da construção do gaseificador	43
Figura 3.2 – Detalhe do reator	44
Figura 3.3 – Gaseificador em construção	45
Figura 3.4 – Finalização da construção do gaseificador	46
Figura 3.5 – Acoplamento do ventilador ao misturador	46
Figura 3.6 – Esquema do gaseificador usado	47
Figura 3.7 – Grelha em detalhe	48
Figura 3.8 – Detalhe da grelha com tela fina	48
Figura 3.9 – Detalhe da tela grossa	48
Figura 3.10 – Torta do coco macaúba ensacada	50
Figura 3.11 – Torta do coco macaúba em detalhe	50
Figura 3.12 – Torta do coco macaúba misturada ao carvão vegetal	50
Figura 3.13 – Lenha eucalipto	51
Figura 3.14 – Detalhe da lenha eucalipto	51
Figura 3.15 – Lenha de café	52
Figura 3.16 – Detalhe da lenha de café	52
Figura 3.17 – Carvão vegetal utilizado no experimento	52
Figura 3.18 – Equipamentos utilizados nas medições: a) Termo-higrógrafo, b) Anemômetro, c) Inversor de frequência, d) Analisador de gás e e) MUG	55
Figura 3.19 – Gaseificador e sistema de aquisição de temperatura	57
Figura 4.1 – Amostras para determinação das propriedades físicas	66

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 – Fórmula química de um processo típico de gaseificação	24
Equação 2.2 – Reação de oxidação do carbono	24
Equação 2.3 – Reação de oxidação do carbono	24
Equação 2.4 – Reação de Boudouard	24
Equação 2.5 – Reação de gás-d'água	24
Equação 2.6 – Reação de formação do metano	24
Equação 2.7 – Reação homogênea da combustão.....	24
Equação 2.8 – Reação homogênea da combustão	24
Equação 2.9 – Poder Calorífico Superior	31
Equação 2.10 – Poder Calorífico Superior Úmido	31
Equação 2.11 – Poder Calorífico Inferior	31
Equação 2.12 – Poder Calorífico Inferior	32
Equação 2.13 – Balanço de massa	32
Equação 2.14 – Balanço de massa em regime permanente	33
Equação 2.15 – Balanço de energia	33
Equação 2.16 – Balanço de energia em regime permanente	34
Equação 2.17 – Eficiência térmica	34
Equação 2.18 – Eficiência global	35
Equação 2.19 – Taxa de combustão	35
Equação 2.20 – Tensão térmica	36
Equação 3.1 – Massa específica aparente	53
Equação 3.2 – Volume específico	53
Equação 3.3 – Peso específico	53
Equação 3.4 – Massa específica real	53
Equação 3.5 – Volume unitário	53
Equação 3.6 – Porosidade	54
Equação 3.7 – Densidade relativa	54
Equação B.1 – Potência	87
Equação B.2 – Velocidade síncrona	87
Equação B.3 – Escorregamento	88

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CENBIO	Centro Nacional de Referência em Biomassa.
CEFET	Centro Federal de Educação Tecnológica.
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente.
DIC	Delineamento Inteiramente Casualizado.
DEA	Departamento de Engenharia Agrícola.
DEF	Departamento de Engenharia Florestal.
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo.
MME	Ministério da Minas e Energia.
MUG	Medidor Universal de Grandezas Elétricas.
PCS	Poder Calorífico Superior.
PCI	Poder Calorífico Inferior.
SAEG	Sistema de Análises Estatísticas e Genéticas.
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial.
TEP	Toneladas Equivalentes de Petróleo.
UBCM	Unidade de Beneficiamento do coco macaúba.
UESB	Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia.
UFV	Universidade Federal de Viçosa.

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$9 H_2$	= parcela de vapor d'água formado pela combustão do hidrogênio;
$\sum \dot{m}_e$	= a soma das vazões mássicas na entrada;
$\sum \dot{m}_s$	= a soma das vazões mássicas na saída;
$\frac{dm_{v.c.}}{dt}$	= à variação da quantidade de massa no volume de controle;
$\frac{dE_{vc}}{dt}$	= taxa de variação de energia por unidade de tempo dentro do volume de controle, [kW];
\dot{m}_b	= vazão mássica de lenha, [Kg.h ⁻¹];
\dot{Q}_{vc}	= taxa de transferência de calor entre o sistema e o meio, trabalho através do volume de controle, [kW];
\dot{Q}_d	= energia recebida pelo ar de secagem;
\dot{Q}_f	= energia térmica liberada pelo combustível;
\dot{W}_{vc}	= trabalho líquido realizado no sistema, [kW];
\dot{m}_t	= vazão em massa, [Kg.s ⁻¹];
%W	= umidade da biomassa [% base úmida];
γ	= peso específico, [N.m ⁻³];
Δt	= tempo total, [h];
η	= eficiência térmica;
ρ	= densidade, [Kg.m ⁻³];
Φ	= fator de ar;
ϕ	= umidade referida à massa seca do combustível [%];
a/c	= relação ar/combustível estequiométrica;
A_t	= área total da grelha, [m ²];
c	= teor de carbono [Kg carbono/Kg comb];
FA	= fator de ar, decimal;
g	= aceleração da gravidade local, [m.s ⁻²];
h	= teor de hidrogênio [Kg hidrogênio/Kg comb];
h_e	= entalpia específica do ar no volume de controle, [KJ.Kg ⁻¹];
h_s	= entalpia específica do ar no volume de controle, [KJ.Kg ⁻¹];
h_v	= entalpia de vaporização da água, KJ.Kg ⁻¹ de água na temperatura de referência de 25°C, equivalente a 2.440;

k	= teor molar de enxofre;
m_{ar}	= massa de ar;
M_b	= massa total de biomassa utilizada, [Kg];
m_c	= massa de combustível;
N_c	= taxa de carregamento ou de combustão, [Kg.h ⁻¹ .m ⁻²];
o	= teor de oxigênio [Kg oxigênio/Kg comb];
PCI_u	= poder Calorífico Inferior úmido, [KJ.Kg ⁻¹];
Q_a	= tensão térmica da superfície da grelha, [kW.m ⁻²];
s	= teor de enxofre [Kg de enxofre/Kg comb];
T_x	= valores da temperatura lido pelo termopar x;
T_0	= valores da temperatura lido pelo termopar 0;
T_1	= valores da temperatura lido pelo termopar 1;
T_2	= valores da temperatura lido pelo termopar 2;
T_3	= valores da temperatura lido pelo termopar 3;
T_4	= valores da temperatura lido pelo termopar 4;
v	= velocidade do fluxo de ar no volume de controle, [m.s ⁻¹];
w	= teor de umidade [Kg umidade/Kg comb];
x	= teor molar de carbono;
y	= teor molar de hidrogênio;
z	= teor molar de oxigênio;
Z	= altura a partir de um ponto de referência, [m].

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE GRÁFICOS	v
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE EQUAÇÕES	viii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	ix
LISTA DE SÍMBOLOS	x
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	14
1.1 Importância da desidratação de frutas	14
1.2 Aspectos energéticos relativos à desidratação de frutas	16
1.3 Objetivos	18
2. REVISÃO DE LITERATURA	19
2.1 O processo de desidratação	19
2.2 Aquecimento do ar.....	20
2.3 Gaseificadores	21
2.3.1 Fundamentos da gaseificação	21
2.3.2 Cinética da gaseificação	23
2.3.3 Aplicações do processo de gaseificação	25
2.3.4 Vantagens e desvantagens da gaseificação	26
2.3.5 Tipos de gaseificadores.....	26
2.3.6 Poder calorífico	30
2.4 Balanço de massa	32
2.5 Balanço de energia	33
2.6 Eficiência térmica e global	34
2.7 Taxa de combustão e tensão térmica	35
2.8 Biomassa como fonte energética	36
2.8.1 Macaúba	37
2.8.2 Lenha de Eucalipto	39
2.8.3 Lenha de café	41
2.8.4 Carvão vegetal	42
3. MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1 Gaseificador.....	43
3.1.1 Características do gaseificador proposto	43
3.1.2 Grelha	47
3.2 Combustíveis	49
3.2.1 Preparo dos Combustíveis	49
3.2.2 Caracterização da biomassa	49
3.2.3 Propriedades físicas	53
3.3 Instrumentação e medições	54
3.3.1 Medição de temperatura	56
3.3.2 Medição de vazão	58
3.3.3 Outros equipamentos.....	58
3.4 Comburente utilizado	58
3.4.1 Qualidade do ar de saída	59
3.5 Energia elétrica	59
3.6 Funcionamento e operação do sistema	60
3.6.1 Abastecimento	60
3.6.2 Regulagens e ignição	60
3.6.3 Gaseificação	60

SUMÁRIO (Continuação....)

3.6.4 Cálculo da eficiência térmica e global	61
3.7 Análise dos resultados	61
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1 A grelha	63
4.2 Caracterização dos combustíveis	64
4.2.1 Análise das biomassas	64
4.2.2 Propriedades físicas	65
4.3 Temperatura	67
4.4 Energia	70
4.5 Qualidade do ar	77
4.6 Eficiência térmica e global	77
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
6. CONCLUSÕES	80
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
8. ANEXOS	85
8.1 Anexo A – Certificados de calibração do analisador de gás	85
8.2 Anexo B – Determinação da velocidade do motor	87
8.3 Anexo C – Tabelas estatísticas	89

1. INTRODUÇÃO

1.1 Importância da desidratação de frutas

A secagem de produtos alimentícios é praticada há muito tempo, inicialmente pela exposição direta ao sol, sendo uma das técnicas mais antigas de preservação de alimentos utilizada pelo homem.

Apesar de não possuir custo energético, a secagem solar, possui alguns inconvenientes, entre os quais podemos citar: a dependência com as condições climáticas, o elevado custo de mão de obra e a necessidade de um grande espaço para a secagem. É importante ressaltar que esses produtos nem sempre são seguros em relação à higiene, uma vez que os alimentos ficam expostos à poeira e insetos, o que compromete a qualidade.

As frutas por serem perecíveis possuem menor vida de prateleira, para aumentar o *shelf-life* das frutas, diminuir os custos de produção e os riscos de contaminação por microorganismos é necessária a remoção da água livre, que pode ser feita por meio da desidratação. A Figura 1.1 abaixo mostra diferentes frutas desidratadas (banana passa, pistache, tâmara, ameixa, uva passa, nozes, amêndoa e damasco) que são vendidas em Vitória da Conquista - Bahia. O termo desidratação refere-se, geralmente, à retirada de água de um alimento por vaporização. Quando diminui a pressão dentro do equipamento, a temperatura de ebulição da água diminui e como consequência do processo de desidratação ocorre diminuição de peso, pela eliminação de água e aumento da vida de prateleira de um produto alimentício em relação ao material fresco. Em decorrência da redução da água livre e do aumento da pressão osmótica, o crescimento microbiano pode ser controlado. A umidade final do produto desidratado é em geral inferior a 5%.



Figura 1.1 – Frutas desidratadas.

Os métodos de desidratação empregam meios de transmissão de calor, que podem ser elencados em:

- por convecção: o produto é posto em contato em uma corrente de ar aquecida;
- por condução: desidratação por contato direto com a superfície aquecida;
- por irradiação: fornecida pelo próprio calor, por microondas, por fonte dielétrica, por infravermelho.

O calor elimina as células dos microrganismos quando estas são submetidas a uma temperatura letal (varia de acordo com a espécie do microrganismos e com a forma em que se encontra), sendo utilizado em vários métodos de conservação e preparo dos alimentos, tais como: pasteurização, esterilização, secagem e concentração. Nestes métodos, ocorre a eliminação total ou parcial dos microrganismos, de acordo com o grau de aquecimento (tratamento térmico) dado ao alimento.

A valorização das frutas devido ao processo de desidratação pode ser comprovada pelas tabelas 1.1 e 1.2, abaixo, obtidas em supermercados e feiras livres das cidades de Itapetinga, Salvador e Vitória da Conquista no estado da Bahia, na cidade de São Paulo no estado de São Paulo, na cidade de Natal no estado do Rio Grande do Norte e na cidade de Santa Rita do Sapucaí no estado de Minas Gerais, no mês de janeiro de 2009. Na tabela 1.1 podemos observar o preço (R\$) do quilograma de algumas frutas *in natura* e processadas (desidratadas/secas), enquanto na tabela 1.2 observamos a valorização no preço dessas frutas, nessas cidades, após o processamento, o preço da ameixa, em Itapetinga – BA, varia de 117,35% e o preço do tomate, em Santa Rita do Sapucaí-MG, varia em 3128,34%.

Tabela 1.1: Preço do Kg, em R\$, de algumas frutas.

Local	Preço da fruta em R\$/Kg							
	"in natura"				Processada			
	Ameixa	Banana	Uva	Tomate	Ameixa	Banana	Uva	Tomate
Itapetinga	12,74	2,20	6,99	3,49	14,95	18,50	17,50	105,27
Natal	5,11	1,50	2,50	3,00	18,59	39,00	13,00	59,66
Salvador	6,98	1,66	2,78	2,98	24,90	16,40	16,90	61,41
Santa Rita do Sapucaí	5,99	1,35	2,99	1,70	13,99	25,40	10,99	53,18
São Paulo	6,73	4,52	5,93	4,36	27,00	28,05	13,63	120,50
Vitória da Conquista	8,98	1,69	4,97	2,99	24,90	15,00	19,90	52,00

Tabela 1.2: Valorização do preço do Kg, em %, de algumas frutas.

Local	Valorização do preço em %			
	Ameixa	Banana	Uva	Tomate
Itapetinga	117,35	840,91	250,36	3016,41
Natal	363,72	2600,00	520,00	1988,54
Salvador	356,73	987,95	607,91	2060,74
Santa Rita do Sapucaí	233,56	1881,48	367,56	3128,34
São Paulo	401,49	620,58	229,96	2763,76
Vitória da Conquista	277,28	887,57	400,40	1739,13

1.2 Aspectos energéticos relativos à desidratação de frutas

A secagem artificial, feita em secadores mecânicos, permite contornar os problemas encontrados na secagem solar. Porém a necessidade do aquecimento e movimentação do ar possui custo energético elevado. O custo da energia utilizada na secagem depende das temperaturas do alimento, do ar de secagem e do ar de exaustão, do fluxo de ar, do teor das umidades inicial e final do alimento, da umidade relativa e da temperatura do ar ambiente, do preço do combustível, do consumo total de combustível, do consumo de energia elétrica e do tempo total de secagem.

As fontes de calor para a secagem artificial são fornecidas pela queima de lenha, de combustíveis fósseis ou por resistências elétricas. Para obter uma redução do custo final da

secagem é necessário que o secador seja manuseado corretamente, buscando-se sempre a otimização de seu uso e a maximização da eficiência.

Na secagem de produtos alimentícios, o custo da energia está diretamente ligado à eficiência que o sistema aproveita dos insumos energéticos, seja para o aquecimento do ar ou a movimentação dos alimentos.

De acordo com SILVA (1983), citado por REINATO *et al* (2002), a operação de secagem é, sem dúvida, a que mais consome energia no processo de produção agrícola, podendo representar até 50% do seu consumo. As operações de secagem e armazenamento, quando conduzidas corretamente e com equipamentos eficientes, contribuem significativamente para a redução dos custos operacionais, pela economia de energia que propiciam.

A dificuldade econômica na aquisição de derivados de petróleo para fins energéticos, fez com que muitos países voltassem a concentrar esforços para o uso mais intensivo de fontes renováveis de energia, tais como a lenha, os resíduos agrícolas e a energia solar. No processo de secagem de grãos, o método mais utilizado é a secagem em altas temperaturas, sendo que o consumo de energia neste método pode ser em certos casos superior a 60% do total de energia consumida na produção e processamento do produto. As exigências são, portanto, de aperfeiçoar-se o uso de fontes energéticas convencionais, e ao mesmo tempo, fomentar-se o desenvolvimento de estudos e usos de fontes renováveis de energia.

Segundo LASSERAN (1979), citado por REINATO *et al* (2002), até 1979 o óleo diesel, pelo seu preço vantajoso e pela facilidade de utilização, monopolizou a área de combustível de secagem, mas com a proibição da utilização de quaisquer derivados de petróleo na secagem de produtos agrícolas pelo Conselho Nacional do Petróleo (CNP), em janeiro de 1980, optou-se pela substituição dos queimadores de óleo, por fornalhas a lenha, como combustível. Nos últimos 20 anos, o combustível mais usado na secagem do café foi, sem dúvida, a lenha.

O uso de outras formas de aquecimento do ar que permitam a queima direta do combustível sem a produção de resíduos indesejáveis apresenta grande aplicação na secagem de alimentos.

A gaseificação da biomassa por atender a esse “anseio”, por ter uma baixa emissão de poluentes e ainda permitir o equilíbrio entre consumo e produção de gás carbônico (crescimento e queima dos vegetais), vem se apresentando como uma alternativa sustentável para geração de energia, podendo inclusive contribuir com o desenvolvimento rural e o aumento do emprego de mão-de-obra em países sub-desenvolvidos.

Tendo em vista o exposto, o projeto se justifica pelo uso de um sistema de secagem que utiliza energia de fontes renováveis (biomassa), que está em grande crescimento no Brasil e tem como vantagem o fato de possuir baixa emissão de gases poluentes, o que contribui para a estabilidade climática do planeta. Além de não agredir ao meio ambiente contribui para o

desenvolvimento sustentável da região, onde adaptamos a tecnologia e os conhecimentos existentes à realidade da região.

1.3 Objetivos

O objetivo geral no desenvolvimento deste trabalho é realizar um estudo da gaseificação da torta do coco macaúba, da lenha de eucalipto, da lenha de café e do carvão vegetal como fonte calorífica para um sistema de desidratação de frutas.

Objetivos específicos deste trabalho são:

- (i) Realizar estudos da gaseificação da torta do coco macaúba, a fim de avaliar sua viabilidade energética no aquecimento de ar para secagem de alimentos;
- (ii) Realizar estudos da gaseificação da lenha de café, a fim de avaliar sua viabilidade energética no aquecimento de ar para secagem de alimentos;
- (iii) Realizar estudos da gaseificação da lenha de eucalipto, a fim de avaliar sua viabilidade energética no aquecimento de ar para secagem de alimentos;
- (iv) Realizar estudos da gaseificação do carvão vegetal, a fim de avaliar sua viabilidade energética no aquecimento de ar para secagem de alimentos;
- (v) Analisar a qualidade do ar de saída na gaseificação de cada biomassa (torta do coco macaúba, lenha de eucalipto, lenha de café e carvão vegetal).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O processo de desidratação

A desidratação é uma das operações utilizadas pelo homem para conservar os alimentos, sendo usada desde a mais remota antiguidade. A conservação nesse caso é obtida pelo controle do nível de umidade nos alimentos, como ocorre também no processo de secagem e de concentração. Segundo BARUFFALDI (1998), a diferença entre estes processos está no teor final de umidade do produto, conforme pode ser observado pela Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Métodos de conservação de alimentos pelo controle de umidade.

Processo	Teor final de umidade
Concentração	30 a 60%
Secagem	10 a 25%
Desidratação	3 a 5%

A desidratação é feita pelo uso de equipamentos, que eliminam quase por completo a umidade do alimento, isto é, não é apenas a secagem pura e simples dos alimentos.

As frutas por serem perecíveis, deterioram em poucos dias, tem sua comercialização “in natura” dificultada a grandes distâncias. Além disso, estima-se que perdas pós-colheita variem de 15 a 50% (CHITARRA, 2005). As perdas dos alimentos normalmente são causadas pelo manuseio inadequado durante a colheita e em todas as etapas da pós-colheita, que pode deixar o produto sujeito às infecções causadas por microrganismos oportunistas e pelas mudanças metabólicas.

De acordo com GUERREIRO (2002), a fruticultura baiana vem se desenvolvendo e elevando a sua produção de ano após ano. Tal processo teve início a partir da década de 80, quando a produção de frutas se espalhou por quase todas as regiões econômicas do Estado de uma forma moderna, cujos resultados já começaram a serem sentidos no início da década seguinte, quando as principais frutas cultivadas na Bahia contribuíram com uma participação média no período 1990-1994 de aproximadamente R\$ 400 milhões, superando a contribuição de produtos tradicionais a exemplo do cacau, cana-de-açúcar e café.

GUERREIRO (2002), cita ainda que o setor de fruticultura no Estado da Bahia possui grande potencial de geração de emprego/renda, podendo o nível de rentabilidade de determinadas espécies frutíferas chegar a R\$ 25.000,00/ha e a capacidade de ocupação da mão de obra registra até 6 trabalhadores/ha. É também, reconhecido como um dos segmentos mais importantes na alavancagem das exportações do País. O valor da produção agrícola oriundo das

áreas irrigadas representa 26 % do PIB agrícola do Estado, ocupando apenas 7,1% de toda superfície cultivada com lavouras na Bahia.

Segundo BUENO (2008), o Brasil é importador tradicional de frutas desidratadas temperadas e por muitos anos apresentou uma sazonalidade em suas importações que mais recentemente foi atenuada em função da utilização mais intensa de maior variedade de produtos ao longo do ano. Sendo que a importação, em 2007, da uva passa atingiu um volume de 18,9 mil toneladas, seguida pela ameixa seca com volume de 11,5 mil toneladas e em terceiro os cocos secos sem casca, mesmo ralados, com volume de 2,6 mil toneladas.

O preparo para secagem de frutas difere para cada tipo, devendo a mesma passar uma ou mais operações, tais como lavagem, descascamento, branqueamento. Porém é muito importante que a desidratação dos alimentos, se inicie com uma matéria-prima de boa qualidade e que esta qualidade seja mantida em todas as etapas do processamento. Se os produtos apresentam uma boa uniformidade, com um mínimo de rejeição, não só o processamento será mais lucrativo, como também a reputação da indústria.

2.2 Aquecimento do ar

A utilização de calor a temperaturas relativamente baixas em diversos setores industriais é essencial nos principais processos de fabricação, como secagem, desidratação, concentração, cozimento, produção de reações químicas e esterilização microbiológica. Este é o caso de indústrias de alimentos e bebidas, papel e celulose, têxtil, química, farmacêutica e de quase todas as agroindústrias. De fato, sem o calor, sem o aporte de energia térmica em quantidades generosas e com alta qualidade não existiria a sociedade moderna, com seu padrão de vida e seus altos níveis de consumo de bens e serviços. De um modo quase absoluto, estes fluxos de calor são conseguidos a partir de sistemas de vapor (ELETROBRÁS, 2005).

Entre os diversos equipamentos usados para o aquecimento do ar podemos citar:

- **Fornalhas**

Segundo BAZZO (1995) e PÊRA (1996), citados por KLAUTAU (2008), fornalha é a unidade onde se queima o combustível, convertendo a energia química do mesmo em energia térmica. Sendo composta de duas partes principais: a grelha, onde ocorre a pirólise (ou volatilização), com a liberação dos voláteis e a combustão do coque; e câmara de combustão, onde ocorrem as reações do ar de combustão com os voláteis emitidos na pirólise.

- **Queimadores**

Conforme o tipo de combustível empregado, os queimadores podem ser:

1. Queimadores para combustíveis líquidos;
2. Queimadores de combustíveis gasosos;
3. Queimadores de combustíveis sólidos.

- Caldeiras

A caldeira é um dispositivo para geração de vapor. Constitui-se, basicamente, de um trocador de calor que trabalha com pressão superior à pressão atmosférica, produzindo vapor a partir da energia térmica fornecida por uma fonte qualquer. Quando aproveitamos o calor residual de um processo, chamamos a caldeira de recuperação.

- Secadores

Os secadores, equipamentos que expõem o alimento à determinada vazão de ar (aquecido ou a temperatura ambiente), propiciando a retirada de vapor de água dos alimentos e conseqüente redução do teor de água, podem ser acoplados aos geradores de ar quente. Estes secadores podem ser dos mais variados tipos e modelos, conforme a necessidade de secagem e as características do produto.

- Gaseificadores

Reatores para gaseificação de biomassa, associados a combustores do gás produzido, também são utilizados na geração de ar quente bem como para diversos fins, porém no Brasil ainda são pouco difundidos. Este equipamento será descrito mais detalhadamente na próxima seção.

2.3 Gaseificadores

2.3.1 Fundamentos da gaseificação

A tecnologia da conversão de material orgânico em gás combustível teve origem nas últimas décadas do século XVIII, sendo a forma mais antiga chamada de destilação seca, ou seja, o aquecimento do combustível em uma retorta com atmosfera isenta de oxigênio. Outro método de gaseificação, desenvolvido nessa época, foi o chamado gaseificador a contracorrente, projetado por Bishoff em 1839. Este desenho foi modificado por Siemens em 1857 e utilizado por toda Europa pelos 100 anos seguintes.

No final do século passado muito esforços foram direcionados ao desenvolvimento de gaseificadores, o que levou ao aprimoramento da gaseificação e ao rápido crescimento da indústria de manufatura de gás nos países em processo de industrialização, conseqüentemente a larga utilização do carvão na área industrial. Porém com o surgimento das linhas de distribuição de gás natural e a substituição em larga escala por combustíveis derivados do petróleo, os sistemas de gaseificação foram esquecidos. Renascendo na 2ª Guerra Mundial, devido á escassez de combustíveis líquidos na Europa, nessa época foram desenvolvidas técnicas de conversão de motores de ignição para operarem com gás combustível e pequenos gaseificadores, chamados de gasogênios. Com o fim da 2ª Guerra Mundial, os gasogênios deixaram de ser usados, com exceção de alguns países em desenvolvimento. Como pode-se

notar, a gaseificação do carvão é uma tecnologia já desenvolvida comercialmente, principalmente em países europeus com boa oferta de carvão e escassez de petróleo.

A gaseificação é definida como a conversão da biomassa, ou de qualquer combustível sólido, em gás energético, por meio da oxidação parcial a temperaturas elevadas. Esta conversão pode ser realizada em vários tipos de reatores, tais como de leito fixo e de leito fluidizado (LORA *et al.*, 1997). Segundo CARIOCA (1985), este termo é usado para caracterizar os processos térmicos que convertem matérias-primas carbonáceas como carvão mineral, carvão vegetal, biomassa e outros materiais em uma mistura de gases.

Diversos são os tipos de biomassa que podem ser utilizadas no processo de gaseificação. A exemplo, podemos citar a lenha, o carvão vegetal, resíduos florestais, resíduos agrícolas, bagaço de cana e casca de arroz (CEMIG, 1986). Convém salientar que, segundo MENDES *et al.* (1998), em gaseificadores de fluxo concorrente só é possível gaseificar materiais com até 30% de umidade, uma vez que o excesso de água prejudica a qualidade do gás, tornando instável a zona de combustão.

De acordo com GLUGNIAC (1944), citado por MORAES (1983), o tempo estimado de passagem do gás pelas zonas de reação nos gaseificadores industriais e fixos é de três décimos de segundo, e nos gaseificadores automotivos é de três centésimos de segundo.

Segundo LORA *et al.* (1997), citado por SANTOS (2003), a quantidade de oxigênio fornecida ao sistema para que ocorra a gaseificação deve ser na ordem de 20 a 40% da necessidade estequiométrica. Este valor é conhecido como fator de ar, coeficiente estequiométrico, razão de equivalência ou taxa de equivalência. Assim pode-se afirmar que a gaseificação difere-se basicamente da combustão pelo fato de não utilizar a massa de ar teórica necessária para a oxidação completa do combustível, ou seja, restringe-se a entrada de ar a certos valores de tal modo que ocorram reações de oxidação (completa e parcial) e de redução, promovendo a formação do gás combustível, de amplo uso.

A combustão pode ser definida como uma reação química exotérmica rápida entre duas substâncias, um combustível e um comburente. O combustível é a substância que queima, que se oxida, contendo em sua composição, principalmente, carbono e hidrogênio, e, eventualmente e em menores teores, outros elementos reagentes, como oxigênio e enxofre, ou ainda outros elementos ou compostos que não participa da reação de combustão, como a água. Comburente é o componente da reação de combustão que fornece o oxigênio, normalmente, o ar atmosférico.

A gaseificação da biomassa se apresenta como uma alternativa sustentável para geração de energia, com baixa emissão de poluentes e permitindo, no ciclo global de crescimento e consumo (queima) dos vegetais, um equilíbrio entre consumo e produção de gás carbônico.

O termo biomassa é utilizado para representar a matéria-prima (matéria vegetal, óleos vegetais, resíduos agroindustriais, agrícolas e urbanos) usada para produzir energia via combustão, gaseificação, fermentação ou transformação em combustíveis líquidos.

Segundo MARTINS (2000), a biomassa é a quarta fonte de energia do planeta, representando o principal combustível utilizado por três quartos da população mundial. Esta energia contribui substancialmente para o provimento energético de vários países do mundo, sendo a principal fonte em alguns países em desenvolvimento.

A biomassa utilizável pode dividir-se em três tipos, de acordo com a sua origem:

- Biomassa florestal: restos de madeira da indústria, lenha, resíduos florestais;
- Biomassa agrícola: palha, estrume, casca de arroz, bagaço de cana de açúcar, restos de culturas (como por exemplo: trigo, milho, cana de açúcar);
- Resíduos urbanos: lixos domésticos e os efluentes industriais (setor agro-alimentar).

Podemos citar como principais vantagens da biomassa em relação aos combustíveis fósseis, na produção de energia:

- Ser fonte de energia limpa e renovável;
- Causar menor corrosão nos equipamentos;
- Os resíduos emitidos pela sua queima não interferem no efeito estufa;
- É uma fonte de energia descentralizadora de renda – qualquer pessoa dona de um pouco de terra pode plantar vegetais que servem como fonte de biomassa;
- Reduz a dependência de petróleo por parte de países subdesenvolvidos, servindo também, dessa forma, como descentralizadora de poder;
- Diminui o lixo industrial. “Pois pequenos produtores poderiam utilizar restos de produção como fonte de biomassa para gerar sua própria de energia”;
- Tem baixo custo de implantação e manutenção.

Algumas características são fundamentais para a escolha do combustível, dentre elas podemos citar: disponibilidade, homogeneidade, custo, peso, volume, inflamabilidade, combustibilidade (afinidade do combustível com o O₂), reatividade (propriedade que possibilita ao combustível, em baixas temperaturas, reduzir o CO₂ em CO), porosidade e densidade.

2.3.2 Cinética da gaseificação

Durante a conversão de combustíveis sólidos em gás combustível, várias reações acontecem. O processo da gaseificação pode ser dividido em quatro etapas físico-químicas distintas, com temperaturas de reação diferentes: secagem do combustível, pirólise (volatilização), oxidação (combustão) e redução, a ordem dessas fases depende do tipo de gaseificador.

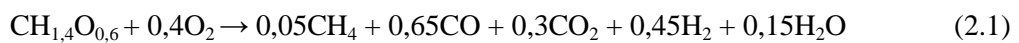
1. Secagem: nessa etapa a temperatura é suficientemente alta para garantir a eliminação da umidade em forma de vapor d’água, porém suficientemente baixa para evitar a decomposição da biomassa;

2. Pirólise: processo de termoconversão realizado sob atmosfera isenta de oxigênio, ocorrendo liberação dos produtos orgânicos e inorgânicos. As reações de pirólise começam a ocorrer a temperaturas em torno de 400° C, quando a estrutura dos materiais ligno-celulósicos começa a se decompor por ação térmica. As reações de pirólise são exotérmicas, formando-se vapor d'água, metanol, ácido acético e uma grande quantidade de alcatrão;

3. Oxidação: combustão (processo de termoconversão realizado sob excesso de oxigênio) de parte do combustível, que fornece a energia necessária ao sistema para que ocorra a redução ou gaseificação propriamente dita;

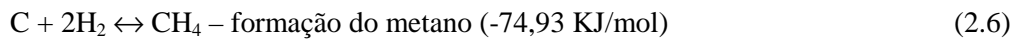
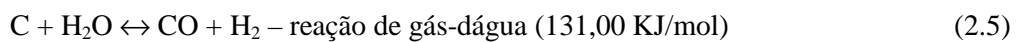
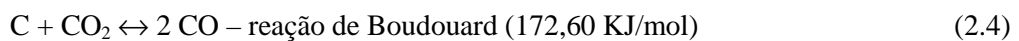
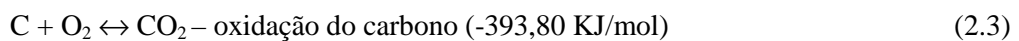
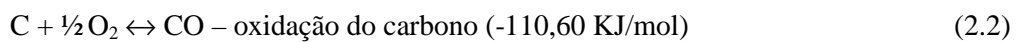
4. Redução: conversão do combustível sólido em gás energético, por meio de um conjunto de reações endotérmicas.

A fórmula da reação química de um processo típico de gaseificação é a seguinte:

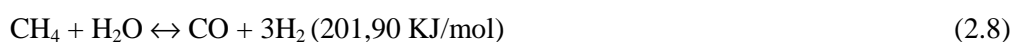


Em decorrência desses processos os combustíveis sofrem várias reações, químicas e físicas, sendo que as principais reações químicas são:

Reações heterogêneas (Gás-Sólido)



Reações homogêneas (Gás-Gás)



Para que a combustão seja completa é necessário que exista O₂ suficiente e que o combustível atinja a temperatura de ignição, nesse caso, haverá liberação de energia calorífica (entalpia de reação ou de combustão) ou calor e luz em forma de chama.

De acordo com MATA (1981), temperatura igual ou superior a 1000°C, favorece a conversão do CO₂ em CO, bem como a dissociação da água em H₂ e O.

Segundo COELHO (1982), o gás produzido pelos gaseificadores é uma mistura de: monóxido de carbono (CO) (5 a 15%), hidrogênio (H₂) (10 a 13%), hidrocarbonetos leves (C_mH_n) (1 a 4%), alcatrão (0 a 5%), dióxido de carbono (CO₂) (9 a 11%), nitrogênio (N₂) (42 a 45%) e H₂O (vapor de água) (11 a 22%), sendo que apenas os quatro primeiros são energeticamente ativos, os demais são inertes diluindo o gás e abaixando seu poder calorífico ou são indesejáveis. Os percentuais de cada componente no gás variam com o tipo de gaseificador,

com as condições de operação e com a umidade da matéria-prima. Estes parâmetros são fatores que determinam também o grau de contaminação do gás com alcatrões e partículas de fuligem. Segundo CORRÊA (2001), não se verifica grandes variações na composição do gás quando utilizados diferentes tipos de gaseificadores, mesmo trabalhando com diferentes tipos de biomassa.

De acordo com FERNANDES (2000), o conteúdo de cinzas da biomassa é bem menor do que o de combustíveis fósseis, como o carvão mineral, e a percentagem de enxofre é irrisória, além do que estas cinzas são livres de metais tóxicos e possuem valor como fertilizante, podendo ser despejadas na área de cultivo da biomassa para ajudar a repor os nutrientes do solo

2.3.3 Aplicações do processo de gaseificação

O gás produzido por meio da gaseificação possui diversas aplicações práticas, desde a geração direta de calor (secagem de alimentos ou aquecimento de ambientes), geração de energia elétrica, combustão em motores ou turbina, bombas de irrigação ou até como matéria prima para síntese química da amônia e do metano.

Dentre as pesquisas recentes sobre a utilização da gaseificação de biomassa, pode-se citar SANTOS (2003) e MARTIN (2005) que testaram gaseificadores de biomassa de fluxo contracorrente e concorrente, respectivamente, acoplados a combustores do gás produzido a fim de disponibilizar ar quente e limpo para a secagem de produtos agrícolas, utilizando-se lenha de eucalipto como combustível.

VIEIRA (2005) avaliou a viabilidade técnica do uso de briquetes de casca de eucalipto para aquecimento de ar, em um reator de gaseificação de fluxo concorrente acoplado a uma câmara para combustão dos gases produzidos, concluindo que o processo de gaseificação/combustão usando apenas briquetes de cascas de eucalipto ou a mistura destes com lenha, com um fator de ar médio de 43% é capaz de gerar ar quente, limpo, isento de fumaças e impurezas, com uma eficiência global maior que 70%.

ZANATTA (2007) avaliou o efeito de dois diferentes sistemas de aquecimento de galpões avícolas, sendo um convencional com fornalha a lenha e outro com um gaseificador/combustor de biomassa, quanto ao conforto térmico, qualidade do ar e desempenho produtivo de frangos de corte. Observou-se que o sistema de aquecimento com gaseificador de biomassa atingiu seu propósito e apresentou melhores resultados comparado a fornalha à lenha tradicional.

Entre os estudos que visam o desenvolvimento de sistemas de co-geração com gaseificação pode-se citar WANDER (2001) que estudou duas alternativas à gaseificação do resíduo das pequenas serrarias, com a utilização do gás produzido num motor de combustão

interna e um equipamento auxiliar que pode ser usado em conjunto com o fogão a lenha para aquecer água nas residências, liberando energia elétrica para outras cargas mais nobres e diminuindo os níveis de queda de tensão principalmente no horário de ponta.

2.3.4 Vantagens e desvantagens da gaseificação

A gaseificação apresenta uma série de vantagens, em comparação com a combustão direta (LORA, 2006), dentre elas podemos citar:

- Alta eficiência térmica;
- A queima dos gases produzidos gera energia limpa, relativamente livre de odores e fumaças, que não requer equipamentos controladores de poluição nem trocadores de calor;
- A geração de eletricidade em pequena escala pode ser realizada sem a necessidade de um ciclo a vapor, utilizando o gás produzido na gaseificação num motor de combustão interna;
- É possível a combustão do gás em fornos e fornalhas de geradores de vapor, projetados originalmente para combustíveis líquidos e gasosos derivados de petróleo, sem grandes modificações no equipamento;
- Diminuição da dependência de regiões e países às flutuações nos preços de combustíveis importados.

Porém, a gaseificação possui algumas desvantagens técnicas que devem ser levadas em consideração:

- A tecnologia é mais complicada do que a queima direta e deve-se ter uma especial atenção com aspectos de segurança, uma vez que o gás produzido é tóxico;
- A instalação dos gaseificadores deve ser feita de forma a evitar vazamentos e em locais bem ventilados;
- Redução de eficiência do sistema de gaseificação, que ocorre devido à perda de calor e ao consumo de energia nos ventiladores.

2.3.5 Tipos de gaseificadores

Os gaseificadores podem ser classificados segundo LORA (1997) citado por CUNHA (2001), de acordo com os seguintes fatores:

1. Pressão de trabalho: baixa pressão (atmosférica) e pressurizados (até 3 Mpa);
2. Poder calorífico do gás produzido: gás de baixo poder calorífico (até 5 MJ/Nm³), gás de médio poder calorífico (de 5 a 10 MJ/Nm³) e gás de alto poder calorífico (de 10 a 40 MJ/Nm³);
3. Tipo de agente de gaseificação: ar, vapor de água, oxigênio e hidrogênio;

A Figura 2.1 ilustra a influência do tipo de agente gaseificante no poder calorífico do gás produzido e suas principais aplicações.

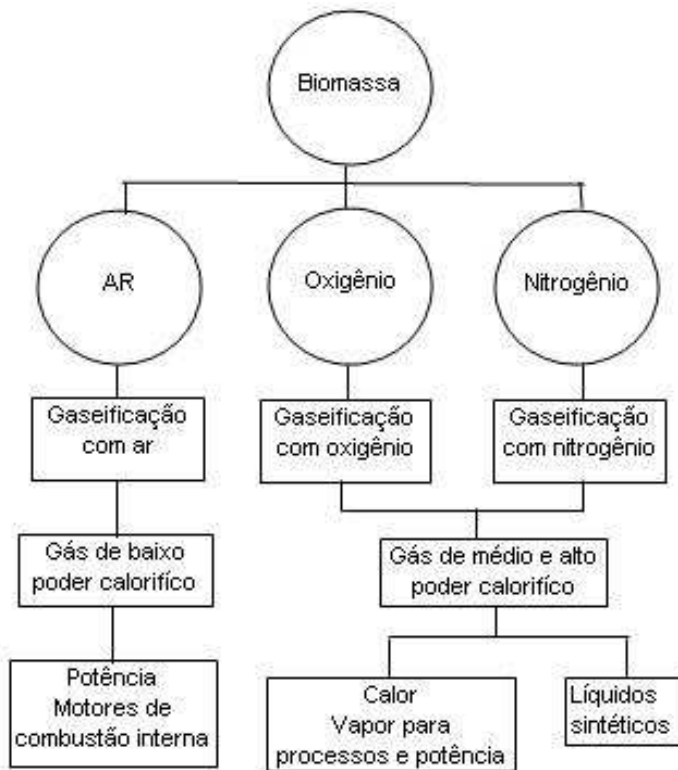


Figura 2.1: Esquema da influência do agente gaseificante no gás produzido.

4.Quanto ao tipo e forma da biomassa: resíduos agrícolas, resíduos industriais, resíduos sólidos urbanos (lixo), biomassa *in natura*, biomassa peletizada e biomassa pulverizada;

5.Direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gaseificação: leito movente a contrafluxo (contracorrente), leito movente em fluxo direto (concorrente), fluxo cruzado e leito fluidizado.

Descreveremos os tipos de gaseificadores, em função da direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gaseificação. Dessa forma temos:

1.Gaseificador de leito fluidizado

Os gaseificadores de leito fluidizado caracterizam-se por manter as partículas do combustível suspensas em um leito de partículas inertes (areia, cinzas ou alumina) fluidizadas pelo fluxo de ar, fato esse que facilita a transferência de calor e homogeneidade da temperatura na câmara de reação. Fazendo com que a maioria dos voláteis entre em contato com as partículas do leito aquecido, favorecendo uma gaseificação completa e limpa.

Este gaseificador pode operar a temperaturas mais baixas, devido à alta reatividade das biomassas. Porém, o craqueamento dos alcatrões pode não ocorrer completamente, durante a pirólise, e assim aparecerem em maior quantidade no gás produzido.

A possibilidade do uso de combustíveis com baixa densidade, alta umidade e granulometria, como bagaço-de-cana e casca de arroz, faz com que esta gaseificação seja promissora, pois tais tipos de biomassas são vantajosos pelo baixo preço e alta disponibilidade.

2. Gaseificador contracorrente

Caracteriza-se por possuir a entrada de ar na parte inferior do gaseificador, com o fluxo ascendente de gases, contrário ao fluxo do combustível que é introduzido pela parte superior e desce pela ação da força gravitacional. Este tipo é o mais simples, possui alta eficiência térmica, porém possui como desvantagem o fato de produzir um gás extremamente impuro, com grandes quantidades de alcatrões e voláteis, que pode causar incrustações nas tubulações, restringindo seu uso.

Suas principais vantagens são:

- Simplicidade operacional e habilidade de gaseificar materiais com alto teor de umidade e material orgânico;
- Potencial de operar com temperaturas muito elevadas na região da grelha.

As principais desvantagens são:

- O gás gerado normalmente contém de 10 a 20% do alcatrão gerado na pirólise;
- Em motores de combustão interna, turbinas ou para geração de gás de síntese, deve-se remover o alcatrão;
- A granulometria do combustível alimentado tem de ser uniforme para evitar perda de carga elevada no leito ou formação de canais preferenciais.

3. Gaseificador concorrente

É o tipo mais difundido de gaseificador, a alimentação do combustível é feita pela parte superior, o fluxo da biomassa e do agente gaseificante se dá no mesmo sentido (de cima para baixo). Nele as zonas de combustão e redução estão posicionadas de forma oposta aos gaseificadores contracorrente, essa característica faz com que o gás produzido possua elevada temperatura (700°C) e baixo teor de alcatrão e voláteis, que são craqueados ao atravessarem as zonas ativas. Segundo MORAES (1983), este tipo de gaseificador é adequado a combustíveis de baixa reatividade e impróprio para os combustíveis que possuem alto conteúdo de cinzas, pois altas temperaturas formam escórias que prejudicam a passagem do ar.

As principais vantagens dos gaseificadores concorrente são:

- Consomem entre 99 a 99,9% do alcatrão, desta forma o gás gerado pode ser transportado em tubulações e utilizados em motores com um mínimo de limpeza;
- Os materiais inorgânicos ficam retidos na matriz de carvão e cinza retirada pelo fundo dos gaseificadores, reduzindo de forma acentuada a necessidade de ciclones de elevada eficiência e filtros a quente;
- Geração de gás limpo;

- O gaseificador concorrente é sistema comprovado, com mais de um milhão de veículos utilizando este sistema durante a 2ª Guerra Mundial.

As principais desvantagens são:

- O combustível tem de apresentar baixa umidade e granulometria uniforme;
- O gás sai do gaseificador a temperaturas elevadas (em geral 700°C), desta forma parte da energia é perdida;

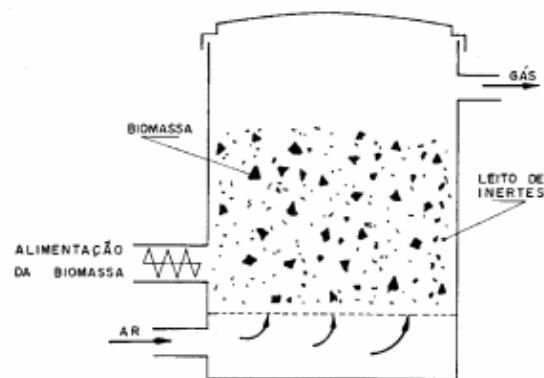
- De 4 a 7 % do carbono do combustível não é convertido, sendo eliminado nas cinzas.

4. Gaseificado de fluxo cruzado

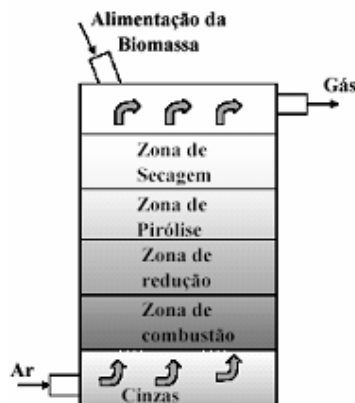
Neste tipo de gaseificador a entrada de ar e a saída do gás ocorrem lateralmente, na mesma altura. A injeção do ar, normalmente, é feita no centro da zona de combustão. O gás combustível produzido possui características intermediárias entre os gases produzidos pelos gaseificadores contracorrente e concorrente.

Suas principais vantagens são a rápida resposta á variações de carga, a simplicidade de construção e o peso reduzido de sua estrutura. Porém, é muito sensível ás variações no teor de umidade e na composição do combustível.

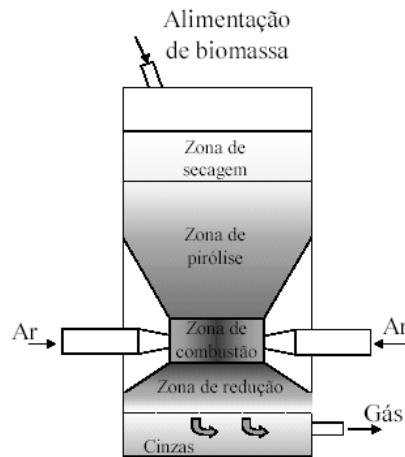
Na Figura 2.2, vemos o reator dos gaseificadores descritos acima.



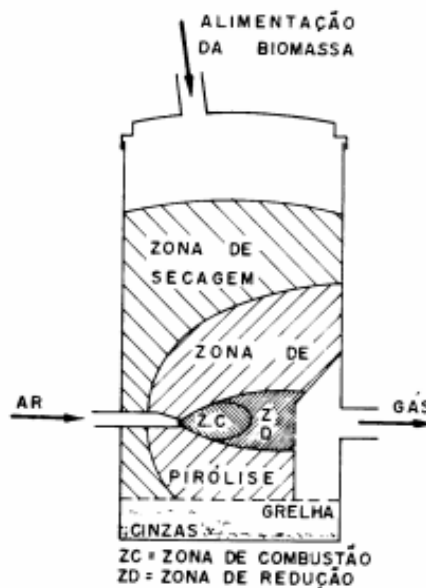
(a) gaseificador de leito fluidizado.



(b) gaseificador contra-corrente.



(c) gaseificador concorrente.



(d) gaseificador de fluxo cruzado.

Figura 2.2: Reator de gaseificadores: (a) gaseificador de leito fluidizado, (b) gaseificador contra-corrente, (c) gaseificador concorrente e (d) gaseificador de fluxo cruzado.

2.3.6 Poder calorífico

O valor do poder calorífico refere-se à determinada quantidade de energia liberada durante a combustão completa de uma unidade de massa ou de volume de um combustível. Esta energia é normalmente expressa em KJ.Kg^{-1} .

O Poder Calorífico Superior (PCS) de combustíveis sólidos e líquidos, é determinado pelo uso de uma bomba calorimétrica. A norma ASTM D 2015-77, descreve detalhadamente a metodologia usada nesse processo.

Define-se PCS, quando a água proveniente da combustão é considerada na forma líquida e Poder Calorífico Inferior (PCI) quando a água proveniente da combustão é considerada

na forma de vapor. O PCI é obtido a partir do PCS a volume constante, por meio de métodos analíticos, e utilizado nos cálculos de combustão, onde é subtraído o custo energético para a evaporação da água (o que ocorre com a queima direta da madeira ao ar livre).

O PCS e o PCI podem ser determinados, a partir dos percentuais dos componentes, conforme as equações 2.9, 2.10 e 2.11:

$$PCS = 33900*c + 141800*(h - o/8) + 9200*s \quad (2.9)$$

$$PCS_{\text{úmido}} = PCS * (1 - \%W) \quad (2.10)$$

$$PCI = PCS_{\text{úmido}} - 2440*(9 * h + w) \quad (2.11)$$

em que:

PCS = Poder Calorífico Superior da biomassa seca [KJ.Kg⁻¹];

PCS_{úmido} = Poder Calorífico Superior da biomassa úmida [KJ.Kg⁻¹];

PCI = Poder Calorífico Inferior [KJ.Kg⁻¹];

c = Teor de carbono [Kg carbono/Kg biomassa];

h = Teor de hidrogênio [Kg hidrogênio/Kg biomassa];

s = Teor de enxofre [Kg de enxofre/Kg biomassa];

o = Teor de oxigênio [Kg oxigênio/Kg biomassa];

w = Teor de umidade [Kg umidade/Kg biomassa];

%W = Umidade da biomassa [% base úmida].

Na tabela 2.2, encontra-se o PCS de alguns combustíveis sólidos.

Tabela 2.2: Poder calorífico de biomassas diversas, em [KJ.Kg⁻¹].

Biomassa	PCS (KJ.Kg ⁻¹)
Bagaço de cana ¹	8903,40
Lenha ¹	12958,00
Casca de arroz ³	16775,60
Restos de algodão ³	16775,60
Eucalipto ²	18420,00
Sabugo de milho ³	18972,60
Cascas de castanhas ³	20470,30
Madeira picada ³	20470,30
Carvão ²	30900,00

Fonte: ¹ELETRORÁS (2005); ²LOPES (2002); ³MATA (1981).

Como exemplo dos combustíveis gasosos, WANDER (2001) cita que o PCI do GLP, de um modo geral, é de aproximadamente 45.000 KJ.Kg⁻¹.

De acordo BAZZO (1995) e CHANDRA e PAYNE, (1986), citados por MARTIN (2005), o PCI do combustível seco, pode ainda ser determinado analiticamente a partir da equação 2.12, subtraindo-se do PCS a entalpia de vaporização da água devido ao vapor d'água formado na reação do hidrogênio com o oxigênio.

$$PCI = PCS - h_v (9 * H_2) \quad (2.12)$$

em que:

PCS = Poder Calorífico Superior, [KJ.Kg⁻¹];

PCI = poder calorífico inferior, [KJ.Kg⁻¹ combustível seco];

h_v = entalpia de vaporização da água, [KJ.Kg⁻¹] de água na temperatura de referência de 25 °C, equivalente a 2.440; e

9*H₂ = parcela de vapor d'água formado pela combustão do hidrogênio.

Segundo SICILIANO (1945), citado por MATA (1981) para combustíveis com alto teor de voláteis e aconselhável trabalhar com temperaturas moderadas, durante a destilação, já para combustíveis com baixo teor de voláteis altas temperaturas aumentam o poder calorífico do gás.

O poder calorífico superior ou inferior de um determinado combustível é, sem dúvida, a propriedade físico-química mais importante quando se decide usar um processo termoquímico. De uma maneira geral, essa propriedade depende da composição da biomassa e do seu grau de umidade (CARIOCA, 1985).

2.4 Balanço de massa

O princípio de conservação de massa para um volume de controle assegura que a diferença entre as massas que entram e saem deste volume devem corresponder exatamente à variação de massa no interior do volume de controle, porque massa não se cria nem se destrói.

A expressão 2.13 é uma contabilidade dos fluxos de massa. Indica que a variação de massa dentro do volume de controle durante o intervalo de tempo Δt é igual à quantidade de massa que entra menos a quantidade de massa que sai do volume de controle.

$$\frac{dm_{v.c.}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (2.13)$$

Nesta expressão, $\sum \dot{m}_e$ e $\sum \dot{m}_s$ correspondem a soma das vazões mássicas na entrada e saída, respectivamente, e $\frac{dm_{v.c.}}{dt}$ corresponde à variação da quantidade de massa no volume de controle.

Para volumes de controle em regime permanente, isto é, quando existe escoamento, mas sem qualquer variação no tempo, não ocorrem variações de massa no interior do volume de controle. Nestas condições, a soma das massas que entram é igual à soma das massas que saem. Portanto, vale a equação 2.14.

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (2.14)$$

2.5 Balanço de energia

A primeira lei da termodinâmica, ou princípio da conservação da energia, estabelece que energia não pode ser criada nem destruída, mas simplesmente transformada de uma forma em outra. Ela é usualmente aplicada de duas formas: em sistemas fechados sem escoamento e em sistemas abertos com escoamento em regime permanente. O gaseificador pode ser considerado um exemplo da segunda situação, quando não existem variações de propriedades com o tempo.

Para um volume de controle em regime permanente, as condições da massa dentro do volume de controle não variam com o tempo. A vazão em massa e a taxa de transferência de energia na forma de calor e de trabalho (potência) também são constantes com o tempo. Como não há acumulação de massa dentro do volume de controle, o princípio da conservação de energia pode ser representado pela expressão 2.15, que é a equação geral da primeira lei da termodinâmica para regime permanente.

$$\frac{dE_{vc}}{dt} = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e \right) - \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gZ_s \right) \quad (2.15)$$

(taxa de energia de entrada) = (taxa de energia de saída)

em que:

$\frac{dE_{vc}}{dt}$ = Taxa de variação de energia por unidade de tempo dentro do volume de controle, [kW];

\dot{Q}_{vc} = Taxa de transferência de calor entre o sistema e o meio, trabalho por meio do volume de controle, [kW];

\dot{W}_{vc} = Trabalho líquido realizado no sistema, [kW];

\dot{m}_e = Vazão de entrada em massa, [Kg.s⁻¹];

\dot{m}_s = Vazão de saída em massa, [Kg.s⁻¹];

h_e = Entalpia específica do ar de entrada no volume de controle, [KJ.Kg⁻¹];

h_s = Entalpia específica do ar de saída no volume de controle, [KJ.Kg⁻¹];

v = Velocidade do fluxo de ar no volume de controle, [m.s⁻¹];

g = Aceleração da gravidade local, [m.s⁻²]; e

Z = Altura a partir de um ponto de referência, [m].

Pode-se considerar o sistema em regime permanente, desprezando a variação das energias cinética e potencial no volume de controle. Assim, o balanço de energia neste caso especial se reduz à equação 2.16, a seguir.

$$\dot{Q}_{vc} = \sum \dot{m}_s h_s - \sum \dot{m}_e h_e + \dot{W}_{vc} \quad (2.16)$$

Segundo Sukup *et al.* (1982), citado por MARTIN (2005), a quantidade dos gases de combustão, representados na sua maior parte por CO₂, não altera significativamente a entalpia específica do ar ao se misturarem, podemos utilizar as propriedades termodinâmicas do ar quando se comporta como gás perfeito, ou seja, quando sua massa específica é suficientemente baixa.

2.6 Eficiência térmica e global

A definição de eficiência em equipamentos térmicos é muito importante para as empresas avaliarem o desempenho dos equipamentos instalados e, mesmo, para a seleção de novos. Porém, faltam normas nacionais, e na ausência dela todos usam as normas DIN (alemã) ou ASME (americana), que adotam parâmetros diferentes. Um mesmo equipamento poderia alcançar eficiência de 93% pelo sistema DIN e apenas 84% no ASME (ELETROBRÁS, 2005).

A eficiência térmica constitui o parâmetro de maior interesse, com relação aos equipamentos de conversão de energia térmica, por estar diretamente associado à redução de custos, o que pode proporcionar economia de combustível.

A eficiência térmica pode ser definida como a razão entre a energia recebida pelo ar de secagem e a energia térmica liberada pelo combustível. Sendo expressa pela equação 2.17:

$$\eta_t = \frac{\dot{Q}_d}{\dot{Q}_f} * 100 \quad (2.17)$$

em que:

η_t = eficiência térmica;

\dot{Q}_d = energia recebida pelo ar de secagem;

\dot{Q}_f = energia térmica liberada pelo combustível.

O uso de inversores de frequência nos motores dos ventiladores, aumenta a precisão nos movimentos e contribui para economia de energia elétrica, além de melhorar a eficiência e dotar o sistema de um certo nível de controle.

Quanto à eficiência global pode-se afirmar que a mesma é resultante do balanço de energia de todo o sistema, ou seja, expressa a eficiência no todo, por meio do volume de controle. Por meio desta pode-se quantificar as perdas de energia do volume de controle, conforme equação 2.18.

$$\eta_g = \frac{\dot{Q}_{sTotal}}{\dot{Q}_{eTotal}} * 100 \quad (2.18)$$

η_g = eficiência global;

\dot{Q}_{sTotal} = energia de saída recebida pelo ar de secagem;

\dot{Q}_{eTotal} = energia térmica liberada pelo combustível.

O uso inteligente da energia além de trazer vantagens econômicas, sociais e ambientais em vários níveis, reduzir as perdas e desperdícios e pode retardar futuros investimentos em expansão do sistema.

2.7 Taxa de combustão e tensão térmica

A taxa de combustão (N_c) é um índice que representa a massa de combustível queimado por unidade de área de grelha e por unidade de tempo, ou seja, é o fluxo de combustível (Kg.h^{-1}) por unidade de área da grelha (m^2). Sendo muito utilizado para o dimensionamento de grelhas.

A taxa de combustão pode ser calculada pela equação 2.19.

$$N_c = \frac{\dot{m}_b}{A_t} \quad (2.19)$$

em que:

N_c = taxa de carregamento ou de combustão, [$\text{Kg.h}^{-1}\text{m}^{-2}$];

\dot{m}_b = vazão mássica da biomassa, [Kg.h^{-1}]; e

A_t = área total da grelha, [m^2].

A tensão térmica da superfície da grelha (Q_a) é definida como sendo a quantidade de calor liberada pelo combustível por unidade de área da grelha, ou seja, ela expressa a energia

térmica liberada pelo combustível sobre a grelha. Segundo LORA (2006), conforme a construção da fornalha e as características da biomassa utilizada, estes valores situam-se entre 400 e 2.100 kW.m⁻². Segundo LORA e HAPP (1997b), a determinação da tensão térmica da superfície da grelha se faz de acordo com a equação 2.20.

$$Q_a = \frac{m_b PCI_u}{3600 A_t} \quad (2.20)$$

em que:

Q_a = tensão térmica da superfície da grelha, [kW.m⁻²];

m_b = vazão mássica da biomassa, [Kg.h⁻¹];

PCI_u = Poder Calorífico Inferior úmido, [KJ.Kg⁻¹]; e

A_t = superfície total da grelha, [m²].

2.8 Biomassa como fonte energética

Segundo GAY *et al* (1998), citado por WANDER (2001), o mundo pode se beneficiar muito das energias renováveis, começando pela eletrificação rural em larga escala (estima-se que dois bilhões de pessoas não possuam energia confiável no mundo), a criação de empregos e, obviamente, a preservação do meio ambiente. Portanto, o objetivo de longo prazo daqueles que trabalham com energias renováveis deve ser a inserção dessas energias na rede e os combustíveis para transporte.

A energia da biomassa contribui substancialmente para o provimento energético de vários países do mundo, sendo a principal fonte em alguns países em desenvolvimento.

O uso de fontes alternativas de energia proporciona vantagens como:

- Diminuição de impactos locais, regionais e globais;
- Surgimento de oportunidades de emprego com a possibilidade de produção local;
- Maior diversidade dos mercados fornecedores de energia e segurança no fornecimento, já que não depende da importação dos combustíveis não renováveis.

Além disso, propicia também, menor emissão dos gases que provocam o efeito estufa quando comparado com os combustíveis fósseis, o que é imprescindível para sua permanência na matriz energética mundial, uma vez, que a preocupação ambiental é um dos pilares da sustentabilidade tão almejada a nível mundial.

O Brasil é um país líder na utilização de insumos energéticos, que contribuíram em seu conjunto com cerca de 40% do suprimento energético primário do país em 1999. Mais do que 90% da energia elétrica consumida é gerada em hidrelétricas, o que contribuiu em 1999 com cerca de 15% do suprimento primário. A biomassa contribuiu naquele ano com cerca de 27% do suprimento energético primário, sendo 13,4% provenientes dos produtos da cana de açúcar

(álcool e bagaço), 11,6% provenientes da madeira (lenha e carvão vegetal) e aproximadamente 2% de outras biomassa, principalmente resíduos agrícolas e licor negro (MME, 2000).

No país, atualmente, a contribuição da biomassa aumentou em relação ao ano de 1999. Contribuindo com 31,6% do suprimento de energia do país, sendo 15,6% provenientes da madeira (lenha e carvão vegetal), 16% provenientes dos produtos da cana de açúcar (álcool e bagaço), segundo o Balanço Energético Nacional (MME, 2007).

Inserido nesse contexto de busca por fontes alternativas, o Brasil possui destaque no cenário mundial na utilização e no desenvolvimento de tecnologias de produção dos biocombustíveis. Graças ao seu clima, à sua geografia, a vastas terras disponíveis para o cultivo de grãos e cana de açúcar e, ainda, à alta tecnologia desenvolvida pela Petrobrás, o país se transformou nos últimos anos num dos maiores produtores de biocombustíveis em termos globais, com um potencial de crescimento singular e invejável (PETROBRAS, 2007).

2.8.1 Macaúba

A palmeira da macaúba (*Acrocomia aculeata (lacq) Lood. ex Mart*) é uma planta da família Palmae, também conhecida por macaiuba ou coco-de-espinho, pode atingir cerca de 20 metros de altura, e possui espinhos nas reminiscências das bainhas. Os frutos são esféricos ou ligeiramente achatados, em forma de drupa globosa com diâmetro variando de 2,5 a 5,0 cm. O mesocarpo é fibroso, mucilaginoso, de sabor adocicado, rico em glicerídeos, de coloração amarelo ou esbranquiçado, comestível. O endocarpo é fortemente aderido à polpa (mesocarpo), com parede óssea enegrecida e a amêndoa oleaginosa, comestível e revestida de uma fina camada de tegumento. Cada fruto contém, geralmente, uma semente envolvida por endocarpo duro e escuro com aproximadamente 3 mm de espessura (GRAY, 2005; FRUITS, 2007; SILVA, 1994).

O fruto da macaúba é o produto economicamente de maior importância da palmeira. Os óleos da polpa e da amêndoa podem ser usados pela indústria farmacêutica, de cosméticos, pelo setor energético ou ainda para consumo humano, desde que haja seleção de frutos. O endocarpo duro tem sido empregado, *in natura*, como insumo energético nas regiões de maior ocorrência da macaúba, para uso doméstico ou em escala industrial para produção de carvão. O farelo da amêndoa, subproduto da extração do óleo, tem considerável valor nutritivo pelo seu alto teor de proteína, o que leva ao seu emprego como componente de rações animais balanceadas (BRASIL, 1985).

Nas Figuras 2.3, 2.4 e 2.5 vemos o coco macaúba e alguns de seus sub-produtos, que são produzidos na fábrica da UBCM (Unidade de Beneficiamento do coco Macaúba) em Riachão, Montes Claros - M. G.



a) Cacho do coco macaúba.



b) Coco macaúba em detalhe.

Figura 2.3 – a) Cacho do coco macaúba e b) Coco macaúba em detalhe.



Figura 2.4 – Sabão da amêndoa do coco macaúba.



Figura 2.5 – Subprodutos do coco macaúba: sabão, óleo e torta.

O coco macaúba, além de ser nativa do cerrado, proporciona benefícios em relação às outras oleaginosas no que diz respeito à produção e rentabilidade agrícola, tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Produtividade média de óleo por hectare, de algumas oleaginosas.

Oleaginosa	Litros de óleo por hectare
Dendê	5.500 – 8000
Macaúba	3.500 – 4.000
Pinhão manso	3.000 – 3.600
Pequi	2.600 – 3.200
Babaçu	1.500 – 2.000
Amendoim	800 – 1.200
Girassol	800 – 1.000

Fonte: Furigo Júnior, 2006.

De acordo com MOTTA (2002), a ocorrência de macaúba acompanha áreas de solos com maior fertilidade natural e vegetação primitiva de fisionomia florestal, mostrando que a espécie avança como pioneira evitando extremos de deficiência de nutrientes e de água.

Inserida nesse contexto, a macaúba vem ganhando espaço, uma vez que diversos estudos convergem para a potencialidade de produção de óleo dessa planta.

2.8.2 Lenha de Eucalipto

Eucalipto (do grego, eu + καλύπτω = "verdadeira cobertura") é a designação vulgar das várias espécies vegetais do gênero Eucalyptus, ainda que o nome se aplique ainda a outros gêneros de mirtáceas, nomeadamente dos gêneros Corymbia e Angophora. São, em termos

gerais, árvores e, em alguns raros casos, arbustos, nativas da Oceania, onde constituem, de longe o gênero dominante da flora. O gênero inclui mais de 700 espécies, quase todas originárias da Austrália, existindo apenas um pequeno número de espécies próprias dos territórios vizinhos da Nova Guiné e Indonésia, mais uma espécie no norte das Filipinas, sendo que a espécie utilizada foi a *Pellita*. Adaptados a praticamente a todas as condições climáticas, os eucaliptos caracterizam a paisagem da Oceania de uma forma que não é comparável a qualquer outra espécie, noutro continente. Segundo Andrade, citado por LORA (2006), no Brasil, o eucalipto foi introduzido pela Companhia Paulista Estradas de Ferro por volta de 1905, com a finalidade de produção de dormentes de madeiras para estradas de ferro no Estado de São Paulo.

Sua classificação científica pode ser vista na tabela 2.4, abaixo.

Tabela 2.4: Classificação científica do eucalipto.

Reino	Plantae
Divisão	Magnoliophyta
Ordem	Myrtales
Família	Myrtaceae
Subfamília	Leptospermoidae
Gênero	Eucalyptus
Espécie	Pellita

Fonte: EMBRAPA, 2008.

O plantio de eucalipto pode ser feito para diversificar o cultivo agrícola. O carvão vegetal, fabricado a partir de florestas plantadas de eucalipto, é apontado como uma alternativa sustentável ao meio ambiente, já que seus níveis de emissão de dióxido de carbono (CO₂) são bem inferiores aos resultantes da queima do carvão mineral. Além disso, as florestas de eucalipto em crescimento “seqüestram” gás carbônico da atmosfera, colaborando para reduzir o aquecimento global.

O gênero tem sido apontado como uma das melhores opções para a produção de energia, devido, principalmente, ao grande número de espécies, o que possibilita uma ampla distribuição ecológica, favorecendo a sua introdução em várias regiões com diferentes condições edafoclimáticas. Por outro lado, essa grande dimensão do gênero possibilita o seu uso para os mais variados fins, como madeira serrada, postes, laminação, fabricação de chapas de compensado, aglomerados, moirões de cerca, lenha, carvão vegetal, celulose e óleos vegetais. Do mesmo modo, a sua produtividade e as características de sua madeira tornam o gênero *Eucalyptus* umas das melhores alternativas para a produção de biomassa que será destinada á geração de energia (LORA, 2006).

O Brasil possui 5 milhões de hectares de florestas plantadas dos quais 3 milhões são de eucalipto, fato que coloca o país em lugar de destaque na produção mundial. Sendo que os estados da Bahia, Paraná, Espírito Santo, Minas Gerais, Pará, Rio Grande do Sul e São Paulo são responsáveis por 86% da produção de eucalipto. Essa dispersão geográfica das plantações implica o efeito de diferentes condições fisiográficas, edáficas e climáticas.

2.8.3 Lenha de café

O cafeeiro (*Coffea sp.*) é um arbusto da família Rubiaceae e do gênero *Coffea* L., da qual se conhecem 103 espécies e se colhem sementes, o café, para a preparação de uma bebida estimulante, conhecida também como café. O café é largamente cultivado em países tropicais, tanto para consumo próprio como para exportação para países de clima temperado.

O Brasil possui uma área plantada de 2,7 milhões de hectares, com aproximadamente seis bilhões de pés - pouco mais da metade só no Estado de Minas Gerais. Com uma exportação média de 28 milhões de sacas, é o principal exportador e responde por mais de um terço de toda a produção mundial - três vezes mais do que a Colômbia, o segundo maior exportador. O setor é responsável pela geração de sete milhões de empregos diretos e indiretos no país e por uma riqueza anual de 10 bilhões de reais (EMBRAPA, 2008).

Os resíduos agrícolas são aqueles produzidos no campo, resultantes das atividades de colheita dos produtos agrícolas. Grande parte desses resíduos é deixada no próprio terreno de cultivo, servindo de proteção ao solo ou como adubo fornecedor de nutriente ao solo, ou ainda sendo usado como de fonte energética. O Brasil é um grande produtor agrícola, nos últimos anos a área plantada e a produção agrícola tiveram um crescimento importante.

O uso de resíduos agro-florestais para fins energéticos, por meio da briquetagem é, do ponto de vista ambiental, uma forma de se gerar energia limpa e renovável, levando-se em conta a não emissão de agentes poluentes e a redução dos desmatamentos indesejáveis. Vislumbra-se uma série de vantagens sócio-econômicas e ambientais para os países que investem na produção e comercialização de combustíveis a partir de resíduos agro-florestais (VIERIA, 2005).

No meio rural a queima direta da biomassa ainda continua sendo uma importante fonte de energia, apesar de sua baixa eficiência. Com isso os avanços tecnológicos são retardados e a manutenção de uma sociedade agrária arcaica persiste.

O estudo de alternativas energéticas para redução dos custos com a secagem bem como do desperdício de resíduos agrícolas provenientes de lavouras comerciais, que poderiam ser aproveitados como fontes de energia para a secagem poderá contribuir para a economia de combustível e para a redução dos impactos, pela sua deposição de forma inadequada no meio ambiente, além de permitir melhor gerenciamento dos recursos naturais finitos do planeta.

Sua classificação científica pode ser vista na tabela 2.5, abaixo.

Tabela 2.5: Classificação científica do café.

Reino	Plantae
Divisão	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsida
Ordem	Gentianales
Família	Rubiaceae
Gênero	Coffea
Espécie	Arabica
Cultivar	Catuaí

Fonte: EMBRAPA, 2008.

2.8.4 Carvão vegetal

O carvão vegetal é um combustível que possui boa combustibilidade e porosidade, e apresenta pequena porcentagem de cinza, não superior a 5%.

Sua qualidade depende muito do tipo de madeira, do sistema empregado na carbonização da madeira, da temperatura utilizada e do grau de cosimento. De acordo com MORAES (1983) o melhor carvão, para gaseificação, é obtido quando levamos a destilação até 400°C, de maneira que o carvão obtido contenha de 7 a 8% de produtos voláteis. E, segundo MATA (1981), o carvão mineral ideal deve ter umidade em torno de 5%, densidade de carga entre 180 e 220 Kg.m⁻³.

Segundo LUENGO (1980), citado por MATA (1981), as madeiras mais duras dão carvões mais densos e que a carbonização lenta e regular resulta em carvões com densidade elevada, o que aumenta a inflamabilidade.

Os combustíveis minerais apesar de seu elevado poder calorífico não são muito convenientes para serem utilizados em gaseificadores, devido, a sua baixa reatividade, alguns possuem enxofre, produzem cinzas fusíveis a menos de 1300°C. As desvantagens apresentadas para o carvão mineral são compensadas pela sua densidade de carga, que é três vezes maior que o carvão vegetal e também pela sua riqueza em hidrogênio.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho se deu no Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa, na área experimental de processamento de produtos agrícolas.

3.1 Gaseificador

O gaseificador construído foi de fluxo concorrente acoplado a um combustor do gás produzido, sendo composto por três seções: reator, combustor e misturador.

3.1.1 Características do gaseificador proposto

O gaseificador foi composto de chapas metálicas e revestido internamente, na seção inferior do reator, com tijolos refratários. A sua construção foi iniciada pela base de suporte do reator e do cinzeiro (por onde foram retiradas as cinzas). A base do reator foi construída de tijolos refratários (que tem como funções proteger as partes metálicas e diminuir as perdas térmicas por convecção e radiação) e revestida externamente de tijolos de barro.

A Figura 3.1, abaixo, mostra a etapa inicial da construção do sistema, onde podemos observar o cinzeiro acoplado ao reator (tubo de ferro com diâmetro de 0,39 m e 0,72 m de altura), o local onde foi instalada a célula de queima, o corpo do combustor (tubo de ferro com diâmetro de 0,39 m e 1,38 m de comprimento) e o misturador.

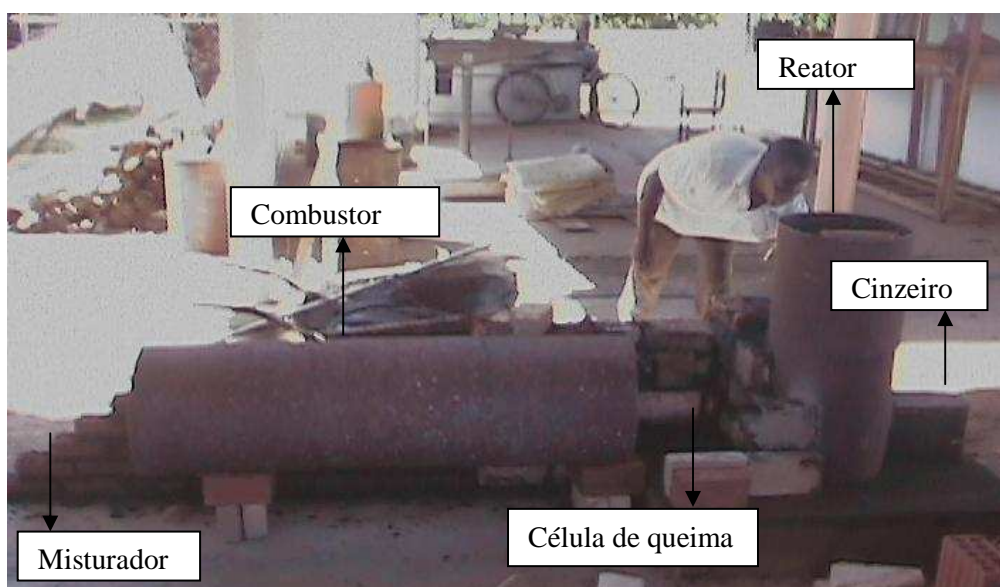


Figura 3.1: Início da construção do gaseificador.

No corpo do reator, acima da zona de redução, foram feitas quatro aberturas de diâmetro médio de 0,05 m, distribuídas uniformemente, para entrada do ar primário no reator. A Figura 3.2 mostra a entrada de ar primária do combustor e uma das entradas de ar do reator.



Figura 3.2: Detalhe do reator.

A câmara de combustão do gás produzido (combustor), que pode ser vista na Figura 3.3, tem início logo após a saída do gás do reator. Nesta saída foi instalada a célula de queima, espécie de câmara que abrigou o carvão em brasa, que servia de chama piloto para garantir a queima do gás proveniente do reator, a fim de evitar a interrupção da combustão do gás que era gerado durante a combustão parcial no reator, para a desidratação das frutas. Essa câmara foi ser revestida externamente por uma estrutura de alvenaria com três aberturas, uma superior e duas laterais, que permitiam a entrada de ar secundário no combustor, e que tem a função de trocador de calor. As aberturas para a entrada do ar possuem a função de permitir a regulação da temperatura do ar de secagem.

Nesta câmara ainda foi instalada a entrada (com três divisões) de ar primário para o combustor e uma janela de vidro temperado, que permitia a visualização do gás em combustão. O ar (frio, temperatura ambiente) proveniente da entrada primária possibilitava a combustão do gás produzido e a redução da temperatura do mesmo.



Figura 3.3: Gaseificador em construção.

Na saída do combustor foi construído o misturador (câmara que é usada para misturar o ar proveniente do combustor com o ar atmosférico, que entra pelas aberturas secundárias), que serve como trocador de calor. Esta câmara de mistura foi construída em alvenaria e possui um registro superior para entrada de ar, que também possuem a função de permitir a regulação da temperatura do ar de secagem. Além disto, o misturador também serve para reter fuligens e como quebra-fagulhas. Ao sair do misturador, o ar de secagem é conduzido ao secador que deverá ser instalado após a câmara de mistura. Como a finalidade é utilizar esse ar para secagem de produtos alimentícios, sua temperatura deverá ser controlada (em torno de 70°C), para tanto é necessário introduzir ar frio (temperatura ambiente) por meio da janela existente na câmara de mistura.

Em condições de trabalho a tampa do reator, que foi feita em chapa metálica e que serve para permitir a entrada da biomassa, permaneceu fechada para evitar a entrada de ar pela parte superior do reator.

A Figura 3.4, ilustra a etapa final de construção do sistema.

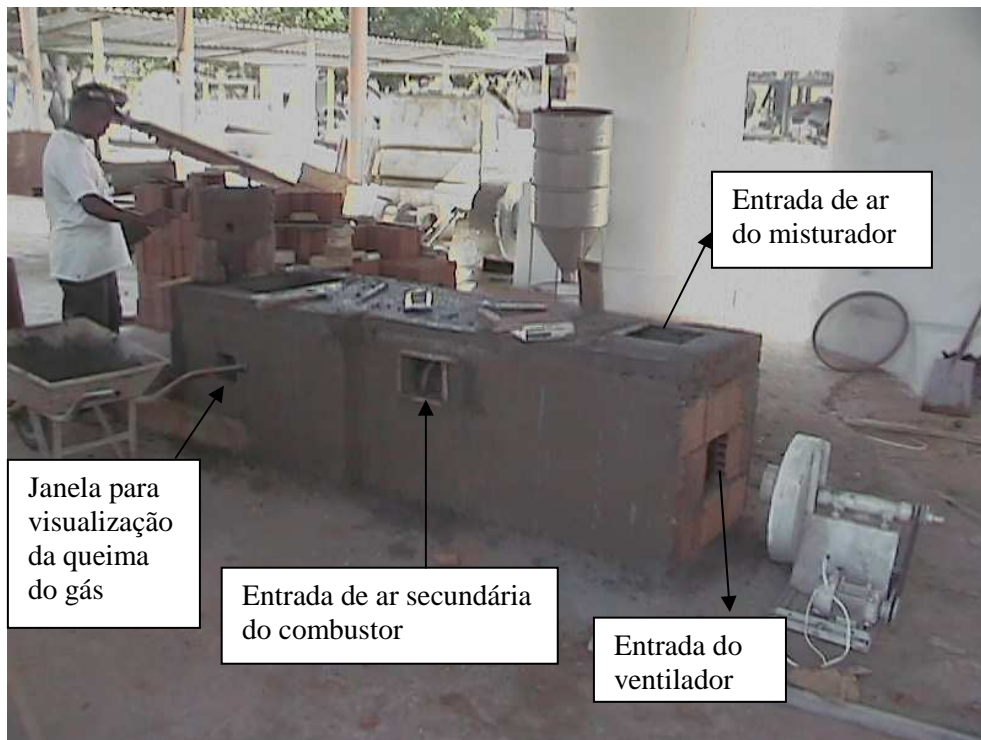


Figura 3.4: Finalização da construção do gaseificador.

Foi instalado na câmara de mistura um ventilador centrífugo de pás radiais, acoplado ao eixo de um motor assíncrono trifásico, marca WEG, modelo ANV71B4, 220/380V, 3,16/1,83A, 1685 rpm, 0,75 CV, 60Hz, 4 pólos, que pode ser visto na Figura 3.5 a seguir. Usado para criar uma pressão negativa suficiente para vencer as perdas de carga impostas, e assim succionar o gás, produzido no reator, que passará por toda a extensão do sistema (célula de queima, combustor e misturador).



Figura 3.5: Acoplamento do ventilador ao misturador.

O formato do gaseificador e suas características podem ser vistos na Figura 3.6.

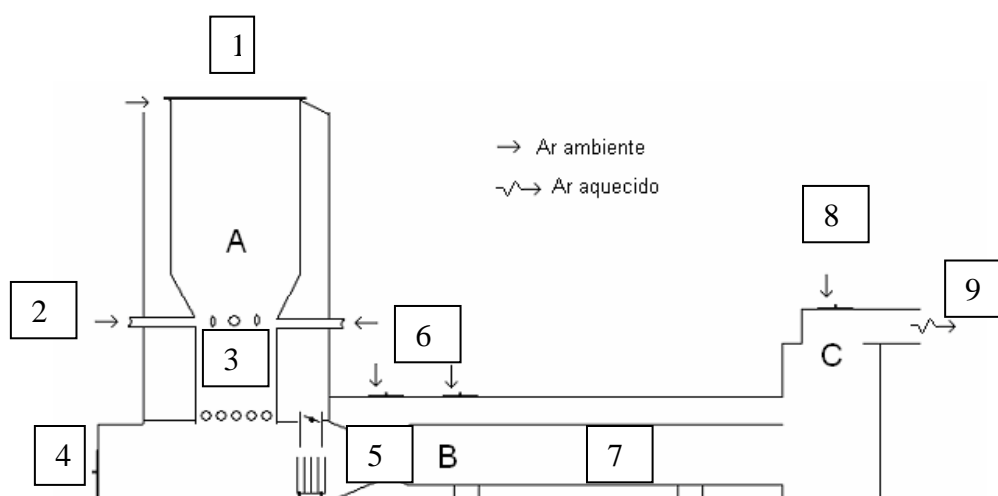


Figura 3.6: Esquema do gaseificador usado: disposição do sistema A = reator para gaseificação da biomassa; B = combustor; C = misturador. Fonte: Martin (2005).

Para um melhor entendimento do gaseificador identificaremos algumas regiões indicadas pelos pontos que estão numerados de 1 a 9, e que indicam respectivamente, (1) a alimentação do gaseificador (entrada de biomassa), (2) a entrada primária de ar no reator, (3) a zona de redução, (4) a saída do depósito de cinzas, (5) local onde foi instalada a chama piloto, (6) a entrada de ar primária no combustor, (7) a entrada de ar secundária no combustor, (8) a entrada de ar no misturador e (9) a saída do ar de secagem.

A seguir, vemos as dimensões principais do gaseificador:

Altura total = 1,57 m;

Grelha: diâmetro = 0,18 m e 0,40 m de altura;

Grelha da chama piloto: altura e largura = 0,20 m e comprimento = 0,30 m;

Lajotas refratárias: 0,23x 0,11x 0,02 m;

Tijolo refratário: 0,23x 0,11x 0,06 m;

Tampa do reator: altura = 0,12 m e diâmetro = 0,43 m;

Cinzeiro: altura = 0,20 m, largura = 0,12 m e comprimento = 0,25 m;

Diâmetro do tubo do combustor = 0,39 m;

Câmara de combustão: 1,60 m;

3.1.2 Grelha

O projeto da grelha é um ponto muito importante. Ela deverá suportar elevadas temperaturas (zona de redução: 1200 – 700°C) e permitir a passagem das cinzas sem uma perda excessiva de combustível.

A Figura 3.7 ilustra a grelha utilizada durante a gaseificação das biomassas: lenha de eucalipto, lenha de café e carvão vegetal. Já para a gaseificação da torta do coco macaúba foi preciso utilizar uma tela sobre a grelha, uma vez que essa biomassa possui baixa porosidade. As Figuras 3.8 e 3.9 ilustram os modelos de telas usadas.



Figura 3.7: Grelha em detalhe.

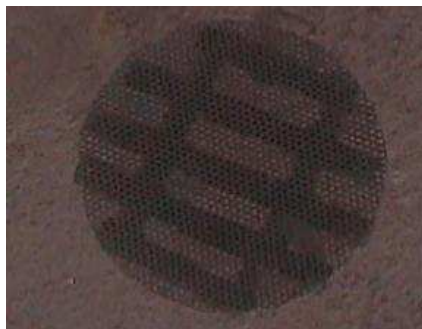


Figura 3.8: Detalhe da grelha com tela fina.

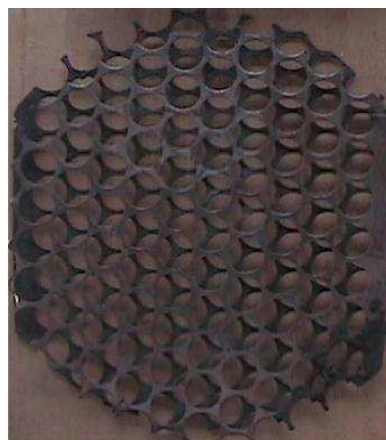


Figura 3.9: Detalhe da tela grossa.

3.2 Combustíveis

A alimentação de biomassa foi feita de forma manual e semi-contínua, colocando-se quantidades fixas que mantêm o nível de combustível dentro do gaseificador entre limites previamente estabelecidos e demarcados.

Os combustíveis testados para verificação do funcionamento do sistema foram: torta do coco macaúba, lenha de eucalipto, lenha de café e carvão vegetal, e o comburente foi o ar atmosférico. A lenha usada foi cortada em pedaços com comprimento de 5 ± 2 cm e diâmetro de 3 ± 2 cm.

3.2.1 Preparo dos combustíveis

Para o uso da biomassa no processo da gaseificação é necessário, na maioria das vezes, preparar esse material de forma a adequar suas propriedades e/ou características ao processo. Este preparo é feito por meio de operações unitárias, como: redução de tamanho, secagem, densificação e classificação.

As lenhas de eucalipto e de café, após estarem na área experimental, tiveram seu comprimento reduzido, com o auxílio de uma moto-serra, conforme as necessidades do projeto. Logo após, os pedaços de lenha foram misturados, em montes separados, e amontoados em um único local, a fim de tornar o material mais homogêneo possível. As demais biomassas (torta de macaúba e o carvão vegetal) não precisaram ter seu tamanho reduzido.

Depois de uniformizadas as biomassas tiveram suas umidades reduzidas pelo uso da energia solar.

Além das biomassas, foram utilizadas pequenas quantidades de GLP, necessário para dar partida no sistema gaseificador/combustor, e de carvão vegetal, para manter a combustão do gás produzido.

3.2.2 Caracterização da biomassa

A matéria-prima utilizada para verificação do funcionamento do sistema foi: torta do coco macaúba, lenha de eucalipto, lenha de café e carvão vegetal.

Antes de ser feita à gaseificação foram retiradas amostras de cada biomassa para a determinação do teor de umidade, do peso específico aparente e do poder calorífico. Sendo que o teor de umidade foi determinado com o uso de uma estufa (105°C) com circulação de ar e uma balança de precisão, para o peso específico foi usado o método determinação a granel e para o poder calorífico uma bomba calorimétrica.

A torta do coco macaúba foi utilizada pura e misturada ao carvão vegetal nas seguintes proporções: 75% de torta e 25% de carvão, 50% de torta e 50% de carvão, e 25% de torta e 75% de carvão, as Figuras 3.10, 3.11 e 3.12 ilustram a torta do coco macaúba e a mistura utilizada.



Figura 3.10: Torta do coco macaúba ensacada.



Figura 3.11: Torta do coco macaúba em detalhe.



Figura 3.12: Torta do coco macaúba misturada ao carvão vegetal.

A lenha de eucalipto, que pode ser vista nas Figuras 3.13 e 3.14, foi usada em pedaços de comprimento de 5 ± 2 cm e com diâmetro de 6 ± 1 cm.



Figura 3.13: Lenha eucalipto.



Figura 3.14: Detalhe da lenha eucalipto.

A lenha de café utilizada é do cafeeiro Catuaí, que é resultante do cruzamento artificial de cafeeiros selecionados de Caturra Amarelo e Mundo Novo.

A lenha de café foi usada em pedaços de comprimento de 5 ± 2 cm e com diâmetro de 4 ± 1 cm, as Figuras 3.15 e 3.16 ilustram a lenha de eucalipto utilizada.



Figura 3.15: Lenha de café.



Figura 3.16: Detalhe da lenha de café.

A Figura 3.17, mostra em detalhes o carvão vegetal utilizado no experimento.



Figura 3.17: Carvão vegetal utilizado no experimento.

3.2.4 Propriedades físicas

A determinação das propriedades físicas da biomassa é importante para o dimensionamento do alimentador e da velocidade superficial do gás.

As propriedades físicas: massa específica aparente, volume específico, peso específico e densidade relativa.

- Massa específica aparente (ρ) - Quantidade de massa que ocupa uma unidade de volume, sendo dada por:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (3.1)$$

O método mais simples de se determinar a massa específica aparente de um combustível sólido qualquer é, mediante o conhecimento da relação massa/volume, colocando-se uma quantidade determinada deste material num volume conhecido.

- Volume específico (v) - Volume ocupado pela unidade de massa. Pode ser dado pelo inverso da massa específica.

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} = \frac{m}{V} \quad (3.2)$$

- Peso específico (γ) - Relação entre o peso e o volume de uma substância. Pode ser dado pelo produto da densidade e pela aceleração da gravidade (g).

$$\gamma = \frac{Fp}{V} = \rho * g \quad (3.3)$$

- Massa específica real (m_r) - É a relação entre a massa do produto e seu volume real. Sendo dada pela equação:

$$m_r = (\text{massa unitária}) / (\text{volume unitário}) \quad (3.4)$$

No caso das lenhas de lenha de café e de eucalipto, que foram aproximados como cilindros de revolução, o volume unitário (V_u) é definido como:

$$V_u = \pi * r^2 * h \quad (3.5)$$

em que:

r = raio da base da lenha, em [cm]; e

h = altura da lenha, em [cm].

- Porosidade é a característica da matéria, que é descontínua, em poder armazenar fluidos em seus espaços interiores, chamados poros. Esses poros podem ser maiores ou menores, tornando a matéria mais ou menos densa. Sendo determinada pela equação:

$$\text{Porosidade (\%)} = 1 - (\rho / m_r) \quad (3.6)$$

De acordo com MORAES (1983), a porosidade do combustível também tem influência muito grande para a ativação do poder redutor, pois quanto maior for a superfície de contato entre o combustível e o gás maior será a redução de CO₂ em CO.

- Densidade relativa (d) - Relação entre o peso da substância e o peso de um igual volume de água nas condições normais. Pode também ser expressa como a relação entre a massa específica ou o peso específico desta substância e a massa específica ou peso específico de uma substância de referência em condições padrão, respectivamente.

$$d = \frac{\rho_{subst}}{\rho_{\text{água}}} = \frac{\rho_{subst}}{1000} \quad (3.7)$$

3.3 Instrumentação e medições

Atualmente, todos os processos industriais precisam de algum tipo de instrumentação e controle automático capaz de possibilitar que suas variáveis de processo se mantenham dentro de determinados limites pré-programados para atender à demanda e operar com garantia de segurança.

O sensor é um tipo de dispositivo (transdutor) que recebe um sinal de entrada em forma de uma grandeza física e fornece uma resposta de saída, da mesma espécie ou diferente, que reproduz certas características do sinal de entrada, a partir de uma relação definida. Ele é capaz de monitorar a variação de uma grandeza física e transmitir esta informação a um sistema de indicação que seja inteligível para o elemento de controle do sistema.

A maior parte dos sensores são transdutores elétricos, pois converte a grandeza de entrada para uma grandeza elétrica (corrente elétrica, tensão elétrica e resistência elétrica) que pode ser medida e indicada por um circuito eletroeletrônico denominado medidor. Essas grandezas são utilizadas normalmente já que apresentam variações proporcionais às grandezas que estão sendo “sentidas” e indicadas pelos sensores, pois os medidores e os elementos de controle que utilizam estas informações são capazes de ler as grandezas elétricas sem dificuldade.

Foram feitas leituras da temperatura em vários pontos do gaseificador (zona de secagem, zona de oxidação, chama piloto, combustor e saída de ar) e do meio ambiente, além da

leitura da velocidade do ar de entrada e de saída por meio das aberturas do sistema, da umidade relativa do ar ambiente, do consumo de energia elétrica e da qualidade do ar de saída, em função de diferentes velocidades do motor.

Para as leituras de temperatura nos diferentes pontos do gaseificador utilizou-se termopares do tipo K, conectados a um sistema de aquisição de dados ligado a um computador.

Mediu-se a temperatura e da umidade relativa do ar ambiente por meio do psicômetro medidor de bulbo seco e úmido, da empresa Instrutemp, modelo HT-270, cuja faixa de leitura é: temperatura: -30°C até 100°C e da umidade: 0% até 100% RH.

Durante o experimento, com o uso do equipamento MUG (Medidor Universal de Grandezas Elétricas), foi medido: a tensão média em cada fase, a tensão mínima em cada fase, a tensão máxima em cada fase, a corrente média em cada fase, a corrente mínima em cada fase, a corrente máxima em cada fase, a potência ativa trifásica, a potência aparente em cada fase, a potência aparente trifásica, a potência reativa trifásica, o fator de potência trifásico, a energia ativa trifásica e a energia reativa trifásica.

Foi analisada a qualidade do ar utilizando o analisador de gás da empresa Testo do Brasil, modelo Testo 330-1, que foi calibrado em agosto de 2008, conforme certificado no anexo A.

A Figura 3.18 ilustra os equipamentos usados nas medições descritas acima.





c)



d)



e)

Figura 3.18: Equipamentos utilizados nas medições: a) Termo-higrógrafo, b) Anemômetro, c) Inversor de frequência, d) Analisador de gás e e) MUG.

3.3.1 Medição de temperatura

A leitura da temperatura das diferentes zonas do gaseificador foi feita por sensores de temperatura (termopares - são pares de fios metálicos de naturezas diferentes, unidos pelas extremidades. São usados para medições de temperaturas e baseiam-se nas propriedades termoelétricas dos metais.) conectados a um equipamento de monitoramento, por meio de cabos de compensação do tipo K. Para a realização do monitoramento da temperatura cada termopar foi ligado ao sistema de aquisição de dados serial via computador, o tratamento dos sinais foi feito automaticamente por meio de um software criado na UFV, programa desenvolvido em

linguagem C++. Os dados são visualizados numericamente em intervalos de 1 minuto e armazenados, em um arquivo digital, para posterior tabulação e análise.

Inicialmente o sistema de aquisição de dados foi conectado ao computador que ficava em uma sala distante 55m do sistema de gaseificação. A aquisição remota dos dados de temperatura mostrou-se inviável por causa da variação de temperatura na saída, uma vez que se optou por manter essa temperatura próxima de 70°C. Como foi preciso regular constantemente a entrada de ar do misturador, por meio de sua janela, para que a aquisição remota se torne viável é necessário instalar um sistema de controle automático nessa entrada de ar e interligá-lo ao sistema de aquisição de temperatura. Como não tínhamos o objetivo de automatizar nosso sistema optamos por instalar o computador com o sistema de aquisição de temperatura próximo ao sistema de gaseificação, conforme pode ser observado na Figura 3.19.



Figura 3.19: Gaseificador e sistema de aquisição de temperatura.

Os termopares utilizados foram do tipo K que possui faixa de operação de -200 a 1260°C e cuja composição é Níquel-Cromo/Níquel-Alumínio (\pm). De acordo com a Norma ASTM E230, o limite de erro desse termopar é de $\pm 2,2^\circ\text{C}$.

Os valores lidos pelos termopares foram aferidos com o uso do multímetro digital portátil, com resolução de 1°C, precisão básica de 0,3% + 2°C para ser usado em medições de temperatura na faixa de -50°C a 1300°C. A calibração foi feita a partir da comparação dos valores lidos pelos termopares T_x , comparados aos valores $T_{R,x}$, obtidos de um sensor de temperatura de referência. Esta aferição foi feita utilizando o método dos mínimos quadrados, onde obtivemos uma curva linear de calibração, cujos parâmetros de ajustes: coeficiente linear, a inclinação, suas variâncias e covariâncias estimadas, foram utilizados para obter o valor e a incerteza padronizada de uma correção prevista a partir da curva.

Foram medidos cinco valores de temperaturas ao longo do gaseificador. Os dois primeiros termopares foram instalados no reator, sendo uma leitura (canal 0 – T0) realizada na zona de secagem (instalado á 1,15m da base do cinzeiro) e a outra na zona de oxidação, instalado á 0,56m da base do cinzeiro (canal 1 – T1), o terceiro termopar (canal 2 – T2) foi colocado na região onde fica a chama piloto, o quarto termopar ficou localizado no corpo do combustor, próximo á entrada secundária de ar, (canal 3 – T3) e o último termopar (canal 4 – T4) foi instalado para a realização da temperatura do ar de saída do gaseificador.

3.3.2 Medição de vazão

Para a medição da velocidade do ar de entrada e de saída do sistema, nas diferentes aberturas, foi utilizado um anemômetro de pás rotativas da marca Instrutherm (com sensibilidade de $\pm 0,1$), modelo TAVR-650 que media velocidades de 0,0 a 45,0 m.s⁻¹. Com o auxílio de uma trena foram medidas as áreas de cada abertura, e então calculadas as respectivas vazões, tanto para as entradas como para a saída. O número de pontos de leituras da velocidade do ar variou em função do tamanho da abertura, sendo maior nos locais em que a abertura era maior.

O controle da velocidade do ventilador centrífugo foi feito de forma indireta, pelo uso de um Inversor de Frequência da WEG, modelo CFW080040B2024PSZ, que é destinado ao controle e variação da velocidade de motores elétricos de indução trifásicos. A velocidade de rotação do motor ligado ao ventilador foi feita pela variação da frequência da fonte de alimentação.

3.3.3 Outros equipamentos

Durante a realização do experimento outros equipamentos foram necessários para a tomada de dados, a saber: higrômetro, balança e estufa com circulação forçada de ar para determinação de umidade de equilíbrio das biomassas, micromêtro, cronômetro e bomba calorimétrica.

3.4 Comburente utilizado

Neste estudo foi utilizado como comburente para o processo de gaseificação o ar ambiente, comburente usado como fonte de oxigênio pela maioria dos processos industriais de combustão. O ar atmosférico não é apenas uma mistura de gases, mas também apresenta partículas sólidas de sujeira e sua composição altera-se com a latitude.

Para todos os fins práticos de combustão, o ar pode ser considerado como composto, em volume, de oxigênio (O₂) 20,9%; nitrogênio (N₂) 79,1%; e, em peso, de oxigênio (O₂) 23,15%; nitrogênio (N₂) 76,85%. O peso do ar a 15,5°C é 1,22 Kg/m³, ao nível do mar e à pressão atmosférica tem volume de 0,37 m³.

Foi medida a temperatura e a umidade relativa do ar ambiente por meio do termohigrógrafo, da Instrutemp, modelo HT-270. No entanto, esses valores podem influenciar as reações de gaseificação, afetando a formação do gás resultante (metano e hidrogênio), uma vez que o ar atmosférico será utilizado como oxidante em nosso estudo.

3.4.1 Qualidade do ar de saída

Com o uso do analisador de gás Testo 330-1 foram colhidas amostras instantâneas do gás de saída, para cada biomassa trabalhada, e analisadas em relação aos parâmetros: teor de monóxido de carbono (CO), teor de oxigênio (O₂) e teor de dióxido de carbono (CO₂).

As medições foram realizadas a cada quinze (15) minutos, em triplicata, para as três repetições realizadas em cada uma das biomassas.

Os dados foram coletados utilizando um sensor de “princípio eletroquímico”, com resolução de 1ppm e acurácia de ±50 ppm que detecta a concentração instantânea numa faixa de medição de 0 a 10.000 ppm.

3.5 Energia elétrica

O consumo da energia elétrica do conjunto motor e inversor de frequência, durante o estudo, foi medido utilizando o MUG, onde foram lidos os níveis de tensão e corrente elétrica em cada fase do sistema. Assim, foi calculado o valor da potência elétrica trifásica consumida pelo conjunto para então se determinar o valor da energia elétrica. Como se tratava de um sistema desequilibrado, a energia elétrica consumida durante cada experimento foi obtida pela soma das energias consumidas em cada fase.

Os dados foram coletados em intervalos de dez (10) segundos durante todo o período da gaseificação.

O controle da variação de velocidade, efetuado neste ensaio, foi feito por meio de um inversor de frequência, o qual alimentou o motor com uma tensão de alimentação cujas frequências foram: 60, 55 e 50Hz, as quais refletem uma velocidade no eixo da máquina de 1685, 1535 e 1385 rpm, respectivamente (ver anexo B).

3.6 Funcionamento e operação do sistema

3.6.1 Abastecimento

O abastecimento foi realizado a fim de manter um nível regular de combustível e, dessa forma, aproveitar para diminuir o teor de água da biomassa que seria gaseificada e aumentar o PCI.

A massa total de biomassa, aproximada, utilizada em cada teste de gasificação variou com a biomassa, sendo de 42,5, 42,5 e 21Kg, respectivamente para a lenha de café, lenha de eucalipto e carvão vegetal. Quando observávamos que o combustível da zona de secagem e pirólise estava chegando à zona de oxidação, pelas entradas do ar primário, procedia-se então o reabastecimento.

3.6.2 Regulagens e ignição

O processo de ignição foi feito com o uso de um lança-chamas, acoplado a um botijão de 13,5Kg de GLP. O lança-chamas era usado, aproximadamente por 3 min, para colocar em combustão uma porção de biomassa, que era inserida no gaseificador. Em seguida o restante da biomassa era colocada no gaseificador e por fim a entrada de biomassa era tampada. Após esta etapa procedia-se com as regulagens até atingir o ponto ideal de funcionamento, ou seja, gás limpo.

A ignição do processo de gasificação usando a torta de macaúba (pura ou mistura com carvão vegetal) foi feita de forma diferente dos demais combustíveis, por causa da sua baixa porosidade. A diferença no procedimento descrito acima é que a mistura era inserida no gaseificador previamente aquecido, com a temperatura da região onde ficou instalada a chama piloto próxima de 500°C. Este aquecimento era feito com a gasificação de uma pequena carga de carvão vegetal.

A energia fornecida pelo GLP à porção de biomassa utilizada durante a ignição foi desprezada, em todas as repetições.

3.6.3 Gaseificação

Para cada biomassa foram realizados três repetições, sendo que cada um destes experimentos foi realizado num tempo médio de duas horas e meia. Após, passado o regime transiente, estando o gaseificador em regime permanente, foram feitas, em intervalos de 15 minutos, leituras nos instrumentos de medida de vazão, temperatura, umidade, energia elétrica e qualidade do ar, sendo todos os dados levantados em triplicata.

Para cada teste obteve-se o tempo de gasificação, ou seja, o tempo em que sistema operou de maneira constante e ideal, produzindo ar quente e limpo conforme os objetivos propostos, e também o tempo total de queima de combustível. Em seguida, calculou-se a vazão mássica de cada biomassa, para cada teste. Com as medidas de velocidade nas diferentes aberturas do sistema, associado com a medida da área de cada abertura, pode-se calcular a vazão volumétrica do ar de entrada e saída. Com os dados de temperatura e umidade relativa do ar ambiente, estimou-se as propriedades termodinâmicas do ar ambiente (entrada) a pressão atmosférica de 94,1 KPa. Com os dados das temperaturas do ar de secagem, para cada teste calcularam-se as propriedades do ar de secagem (saída) como um aquecimento do ar ambiente até a temperatura do ar de secagem, mantendo-se a razão de mistura e desconsiderando-se o teor de água contido no combustível. Para a determinação da entalpia, foram utilizadas as tabelas das propriedades termodinâmicas do ar, encontradas em VAN WYLEN *et al.* (2003). Com os dados da velocidade de entrada de ar primário no reator e as respectivas áreas, calculou-se a vazão volumétrica de ar primário no reator, e com o uso do valor da massa específica úmida do ar ambiente, calculou-se a vazão mássica de ar primário no reator.

3.6.4 Cálculo da eficiência térmica e global

O cálculo da eficiência apresenta um papel fundamental na avaliação de um sistema gerador de calor. Para a eficiência térmica do sistema devem ser levados em consideração o volume de controle do sistema gerador de calor e os fatores:

- A energia fornecida a cada biomassa, em todos os testes, pelo GLP durante a ignição foi desprezada;
- A energia fornecida pelo carvão vegetal ao ar de saída, em todos os testes, durante a queima do gás produzido foi desprezada;
- A combustão do gás produzido foi completa;
- A quantidade de partículas de carbono arrastadas ou presentes nas cinzas foi desprezível;
- O sistema operava em regime permanente; e
- A vazão mássica do ar que entra no volume de controle é a diferença entre a vazão mássica do ar de saída e a vazão mássica dos combustíveis.

3.7 Análise dos resultados

A análise estatística dos resultados foi realizada utilizando o programa SAEG 9.0 (Sistema de Análises Estatísticas e Genéticas), desenvolvido na Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Os tratamentos foram organizados segundo o esquema fatorial 3x3, em triplicata, com 3 repetições, tendo como fatores os tipo de biomassa (torta do coco macaúba, lenha de eucalipto, lenha de café e carvão vegetal) e velocidade de rotação do motor (1385, 1535 e 1685 rpm). O experimento foi instalado no Delineamento Inteiramente Casualizado (DIC), considerando a homogeneidade das condições ambientais e do material experimental.

Foi feita a análise de variância (ANOVA) e as médias foram comparadas utilizando-se o teste de Tukey, adotando-se o nível de 5% de probabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Analisando o consumo de energia durante a realização dos experimentos, apresentado na tabela 4.8, foi observado que dentre as biomassas trabalhadas a gaseificação com o carvão vegetal foi a que consumiu a menor quantidade de matéria-prima, seguida da gaseificação com a lenha de café e lenha de eucalipto, que apresentaram o mesmo consumo. Portanto, com base no consumo energético, conclui-se que a gaseificação com o carvão vegetal é o combustível melhor recomendado para o aquecimento do ar, além de ter apresentado as melhores resultados na análise do ar de secagem.

Nas tabelas a seguir os locais indicados por: “*”, significa que os experimentos de gaseificação utilizando a torta de macaúba não apresentaram resultados satisfatórios, visto que: para todos os testes realizados (100% torta de macaúba, 75% de torta de macaúba e 25% de carvão vegetal, 50% de torta de macaúba e 50% de carvão vegetal, e 25% de torta de macaúba e 75% de carvão vegetal), a grelha apresentou entupimento e a gaseificação foi interrompida.

4.1 Grelha

A grelha suportou as elevadas temperaturas da zona de redução (1200 – 700°C) e permitiu a passagem das cinzas sem uma perda excessiva de combustível.

A tabela 4.1, ilustra os valores obtidos para a vazão mássica, taxa de combustão e tensão térmica em relação às biomassas gaseificadas.

FERREIRA *et al* (2006), cita que: OLIVEIRA FILHO (1987) usando lenha, palha e bagaço de cana queimados em fornalha com grelha plana, carga manual e ar forçado, obteve taxa de combustão entre 150 e 300 Kg.h⁻¹.m⁻² e ANDRADE (1984), cita valores de taxa de combustão, variando entre 30 e 40 Kg.h⁻¹.m⁻², podendo chegar até 60 Kg.h⁻¹.m⁻².

MARTIN (2005), obteve tensão térmica variando entre 1113 e 1447 kW.m⁻², usando lenha de eucalipto em um gaseificador concorrente. Já FERREIRA *et al* (2006), obteve tensão térmica variando entre 5,7 e 22,5 kW.m⁻², numa fornalha a carvão vegetal e fogo direto.

Tabela 4.1: Tensão térmica, taxa de consumo de combustível e de combustão das biomassas utilizadas.

Biomassa	Torta de Macaúba	Lenha de café	Lenha de eucalipto	Carvão vegetal
Tensão térmica (kW.m ⁻²)	*	312,88	410,06	222,37
Vazão mássica (Kg.h ⁻¹)	*	6,00	6,00	2,96
Taxa de combustão (Kg.h ⁻¹ .m ⁻²)	*	58,95	58,95	29,13

4.2 Caracterização dos combustíveis

4.2.1 Análise das biomassas

Pode-se observar que nas primeiras 24h, em estufa a 105°C, que as biomassas perderam uma grande quantidade de água (existente nas partes mais superficiais) pela transferência do calor sensível da corrente de ar, devido à evaporação da água livre. A partir deste momento a secagem torna-se mais lenta uma vez que a água deverá deslocar-se do centro para a superfície. Esta etapa é evidenciada por uma forte tendência à estabilidade.

O poder calorífico superior, em bomba calorimétrica, das biomassas torta do coco macaúba, lenha de eucalipto pellita, com 7 anos de idade, lenha de café catuaí, com 10 anos de idade e do carvão vegetal, obtido da madeira de eucalipto pellita com 7 anos de idade, foi determinado no Laboratório de Energia da Madeira, no Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (DEF-UFV), sendo, respectivamente, igual á 26988,42 KJ.Kg⁻¹, 29432,84 KJ.Kg⁻¹, 22809,72 KJ.Kg⁻¹ e 29990,12 KJ.Kg⁻¹.

Pela análise da tabela 4.2, pode-se observar que todas as biomassas utilizadas possuem a umidade na faixa recomendada (menor que 30%) para uso como combustível em gaseificadores concorrentes. Dentre elas, o carvão vegetal apresentou o maior valor do Poder Calorífico Superior e o menor valor de umidade percentual de água (teor de água), a lenha de café apresentou o menor valor do PCS e o maior teor de água, a torta de macaúba e a lenha de eucalipto apresentaram valores intermediários de PCS e teor de água quando comparados ao carvão vegetal e a lenha de café. Sendo assim, pode-se concluir que o carvão vegetal é o combustível mais recomendado para o aquecimento do ar, em relação ao teor de água e ao PCS.

Tabela 4.2: Análise das biomassas utilizadas.

Biomassa	Torta de Macaúba	Lenha de café	Lenha de eucalipto	Carvão vegetal
Teor de água (%)	14,15	17,12	15,93	8,35

PCS (KJ Kg⁻¹)	26988,42	22809,72	29432,84	29990,12
PCI_u (KJ Kg⁻¹)	23331,68	19108,47	25043,42	27485,42

O valor do PCS da lenha de eucalipto é superior ao encontrado por LOPES (2002), MARTIN (2005) e ZANATTA (2007), respectivamente, 18420 KJ.Kg⁻¹, 20035,68 KJ.Kg⁻¹, 19675,19 KJ.Kg⁻¹ e 19825,54 KJ.Kg⁻¹. Já o PCS do carvão vegetal está próximo ao pesquisado por LOPES (2002) 30900 KJ.Kg⁻¹. O PCS da torta de macaúba e da lenha de café é inferior ao pesquisado para a lenha de eucalipto.

Observa-se um valor muito superior do PCS da torta do coco macaúba quando comparado com as demais oleaginosas, o que é desejável do ponto de vista da combustão. Os valores do poder calorífico de algumas oleaginosas, dentre elas a macaúba, encontram-se na tabela 4.3.

Tabela 4.3: PCS de algumas oleaginosas.

Oleaginosa	PCS (KJ.Kg⁻¹)
Torta de macaúba**	26988
Macaúba casca dura**	21568
Macaúba coco interior envolto pela casca**	20263
Girassol*	9269
Dendê*	9104
Buriti (óleo)*	8780
Mamona*	4472

Fonte: *Escola SENAI Mario Amato

**Laboratório de Energia da Madeira – DEF/UFV

4.2.2 Propriedades físicas

Para a determinação das propriedades físicas da torta de macaúba, da lenha de eucalipto, da lenha de café e do carvão vegetal utilizou-se um recipiente com 11,55 litros de capacidade e uma balança da marca Bel Engineering, com desvio de 10mg. A Figura 4.1 mostra o recipiente e as amostras de cada biomassa utilizadas nesta análise.



Figura 4.1: Amostras para determinação das propriedades físicas.

Analisando as propriedades físicas das biomassas durante a realização dos experimentos, como mostrado na tabela 4.4, pode-se observar que dentre as biomassas trabalhadas o carvão vegetal apresentou a menor massa específica aparente e conseqüentemente o maior volume específico, seguido da lenha de eucalipto, da lenha de café e da torta de macaúba.

O carvão vegetal foi à biomassa que apresentou o maior teor de cinzas, seguido da lenha de café e da lenha de eucalipto.

Tabela 4.4: Propriedades físicas das biomassas utilizadas.

Biomassa	Torta de Macaúba	Lenha de café	Lenha de eucalipto	Carvão vegetal
Massa (g)	6100,00	3692,34	3355,80	3074,96
Volume do recipiente (L)	11,55	11,55	11,55	11,55
Massa específica aparente (Kg.m ⁻³)	528,14	319,68	290,55	266,23
Volume específico (m ³ .Kg ⁻¹)	0,001893	0,003128	0,003442	0,003756

Peso específico (N.m⁻³)	0,018556	0,030655	0,033730	0,036810
Massa específica real (Kg.m⁻³)	‡	575,83	642,18	‡
Porosidade (%)	‡	44,48	54,76	‡
Densidade relativa	0,5281	0,3197	0,2905	0,2662
Cinzas (%)	*	2,75	2,12	2,93

‡ Não foi possível determinar a massa específica real e nem a porosidade.

A massa específica aparente das biomassas estudadas varia de 266,23 á 528,14 Kg.m⁻³, valores que estão condizentes aos obtidos para a lenha de eucalipto por MARTIN (2005) e ZANATTA (2007), respectivamente 425,9 e 412 Kg.m⁻³.

MATA (1981) utilizou carvão vegetal com peso específico de 394 Kg.m⁻³ e teor de umidade de 4,2% (base seca).

4.3 Temperatura

As médias dos valores medidos, pelos termopares, das temperaturas para cada biomassa, em função das velocidades trabalhadas, podem ser observadas nas tabelas 4.5, 4.6 e 4.7.

Tabela 4.5: Valores médios das temperaturas lidos pelos termopares, durante a gaseificação da lenha de eucalipto.

Velocidade (rpm)	Temperatura nos termopares (°C)				
	T0	T1	T2	T3	T4
1685	41,97	870,30	305,20	65,60	75,30
	54,27	505,00	267,00	46,60	71,60
	77,93	609,00	387,67	54,27	72,60
Média 1	58,06	661,43	319,96	55,49	73,17
1535	132,00	778,00	192,64	72,30	68,00
	71,93	693,33	163,33	42,93	65,93
	71,60	563,00	260,00	56,93	72,60
Média 2	91,84	678,11	205,32	57,39	68,84
1385	229,70	690,30	166,80	64,30	70,30
	175,00	777,33	145,67	38,60	62,27
	116,20	549,67	185,33	54,33	66,93
Média 3	173,63	672,43	165,93	52,41	66,50
Média Geral	107,84	670,66	230,40	55,10	69,50

Tabela 4.6: Valores médios das temperaturas lidos pelos termopares, durante a gaseificação da lenha de café.

Velocidade (rpm)	Temperatura nos termopares (°C)				
	T0	T1	T2	T3	T4
1685	21,93	609,67	319,00	37,93	73,60
	29,93	753,00	162,33	38,27	67,27
	78,93	458,67	372,67	57,93	75,60
Média 1	43,60	607,11	284,67	44,71	72,16
1535	28,27	626,67	223,67	40,27	67,27
	38,60	661,67	222,33	37,93	69,27
	81,07	579,00	255,33	59,60	65,93
Média 2	49,31	622,45	233,78	45,93	67,49
1385	28,93	709,00	202,33	42,27	65,93
	64,60	622,67	181,67	37,93	69,60
	58,60	594,00	229,00	57,27	65,60
Média 3	50,71	641,89	204,33	45,82	67,04
Média Geral	47,87	623,82	240,93	45,49	68,90

Tabela 4.7: Valores médios das temperaturas lidos pelos termopares, durante a gaseificação do carvão vegetal.

Velocidade (rpm)	Temperatura nos termopares (°C)				
	T0	T1	T2	T3	T4
1685	113,30	871,30	210,00	82,00	70,00
	128,70	817,00	245,00	94,00	66,00
	230,70	851,00	206,00	87,00	69,00
Média 1	157,57	846,43	220,33	87,67	68,33
1535	203,00	852,70	209,00	89,00	69,00
	193,00	846,30	191,00	86,00	65,00
	231,67	837,00	220,00	73,00	72,00
Média 2	209,22	845,33	206,67	82,67	68,67
1385	201,00	834,30	199,00	69,00	71,00
	237,33	902,60	186,00	63,00	65,00
	229,33	1024,00	173,00	55,00	64,00
Média 3	222,55	920,30	186,00	62,33	66,67
Média Geral	196,45	870,69	204,33	77,56	67,89

Analisando a temperatura lida pelo termopar T0, pode-se observar (conforme as tabelas estatísticas no anexo C) que na velocidade de 1385 rpm não houve diferença significativa, durante a gaseificação da lenha de eucalipto e do carvão vegetal, que apresentaram médias

maiores que a gaseificação com a lenha de café. Na velocidade de 1535 rpm a gaseificação do carvão vegetal apresentou a maior média, sendo o combustível melhor recomendado. E para a velocidade de 1685 rpm não houve diferença significativa entre as gaseificações com carvão vegetal e lenha de café.

Pela análise da temperatura lida pelo termopar T1 (provável zona de oxidação), pode-se observar (conforme as tabelas estatísticas no anexo C) que na velocidade de 1385 rpm a gaseificação do carvão vegetal apresentou a maior média, sendo o combustível melhor recomendado. Na velocidade de 1535 rpm não houve diferença significativa entre as gaseificações com carvão vegetal e lenha de café. E para a velocidade de 1685 rpm não houve diferença significativa entre as gaseificações.

Com base nas temperaturas lidas pelo termopar T2 e nas tabelas estatísticas (anexo C), pode-se observar que não houve diferença significativa entre as gaseificações, em nenhuma das velocidades estudadas.

Não houve diferença significativa entre as gaseificações na velocidade de 1385 rpm, das temperaturas lidas pelo termopar T3 (conforme as tabelas estatísticas no anexo C). Na velocidade de 1535 rpm não houve diferença significativa entre as gaseificações com carvão vegetal e lenha de café. Já na velocidade de 1685 rpm a gaseificação do carvão vegetal apresentou a maior média, sendo o combustível melhor recomendado.

A temperatura lida pelo termopar T4 (saída do misturador) foi controlada, em todos os testes, em aproximadamente 70°C.

Durante a realização do experimento as condições atmosféricas (umidade relativa e temperatura) foram mais favoráveis à gaseificação do carvão vegetal. Uma vez que à temperatura mais elevada somada ao valor menor de umidade, contribuem com o aumento da energia do comburente, conforme pode ser visto nas tabelas 4.8 e 4.9.

Tabela 4.8: Média da temperatura (°C) do ar ambiente durante o experimento.

Velocidade (rpm)	Biomassa			
	Torta de Macaúba	Lenha de café	Lenha de eucalipto	Carvão vegetal
1685	*	19,42	20,08	23,22
	*	20,02	23,44	21,78
	*	19,87	21,43	22,57
Média 1	*	19,77	21,65	22,52
1535	*	19,65	18,74	22,39
	*	19,88	22,18	21,79
	*	19,55	21,59	17,91
Média 2	*	19,69	20,84	20,70

1385	*	20,16	18,60	22,88
	*	20,14	21,77	19,44
	*	18,93	21,10	18,32
Média 3	*	19,74	20,49	20,21
Média Geral	*	19,73	20,99	21,14

Tabela 4.9: Média da umidade relativa (%) do ar ambiente durante o experimento.

Velocidade (rpm)	Biomassa			
	Torta de Macaúba	Lenha de café	Lenha de eucalipto	Carvão vegetal
1685	*	79,39	84,70	61,00
	*	78,74	63,54	64,10
	*	78,73	66,61	73,58
Média 1	*	78,95	71,62	66,23
1535	*	78,46	77,81	62,04
	*	78,13	69,60	65,92
	*	79,45	64,69	73,43
Média 2	*	78,68	70,70	67,13
1385	*	77,46	70,11	60,66
	*	77,39	69,39	70,64
	*	80,39	67,74	72,62
Média 3	*	78,41	69,08	67,97
Média Geral	*	78,68	70,47	67,11

4.4 Energia

O gráfico 4.1, abaixo, ilustra a energia elétrica consumida ($\text{kW}\cdot\text{h}^{-1}$) pelo conjunto motor-inversor de frequência, em função da velocidade do motor (rpm), para as gaseificações com as biomassas utilizadas durante o experimento. Pode-se observar uma diminuição do consumo de energia empregando velocidades menores (potência elétrica consumida é o produto da velocidade pelo torque), já que a carga é constante e a aplicação de uma velocidade inferior à nominal atende às características de secagem.

Fica evidente, portanto, a importância da variação de velocidade em sistemas que trabalham sob condições de torque e velocidades parciais, uma vez que o emprego de um motor elétrico à velocidade constante produz um consumo desnecessário de energia do processo. Assim, variar a velocidade de um processo significa economia de energia.

Entretanto, do ponto de vista da análise da energia consumida em função da gaseificação das biomassas, pode-se observar que a gaseificação feita a partir da lenha de

eucalipto foi a que teve o menor consumo energético, seguida da gaseificação obtida a partir da lenha de café e do carvão vegetal, a qual apresentou maior consumo em todos os casos.

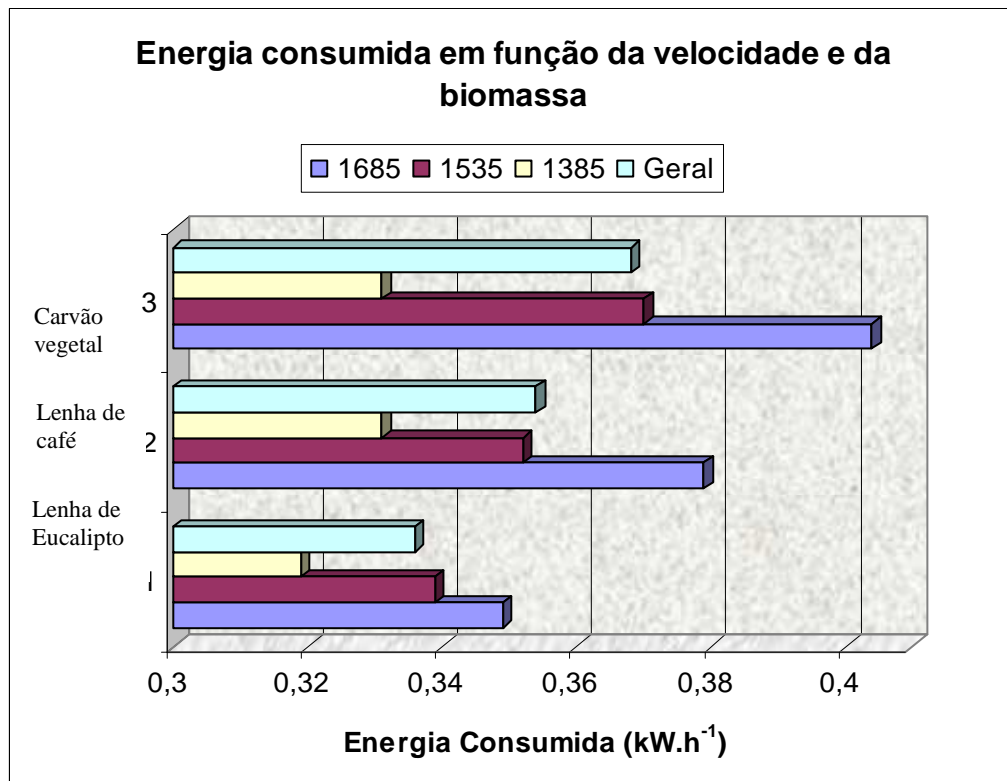


Gráfico 4.1: Energia consumida em função da velocidade e da biomassa.

Por meio dos gráficos 4.2 ao 4.10, vistos abaixo, pode-se observar o comportamento dos sinais: tensão elétrica, corrente elétrica e potência elétrica durante a gaseificação das biomassas. Os gráficos citados acima foram obtidos por amostragem.

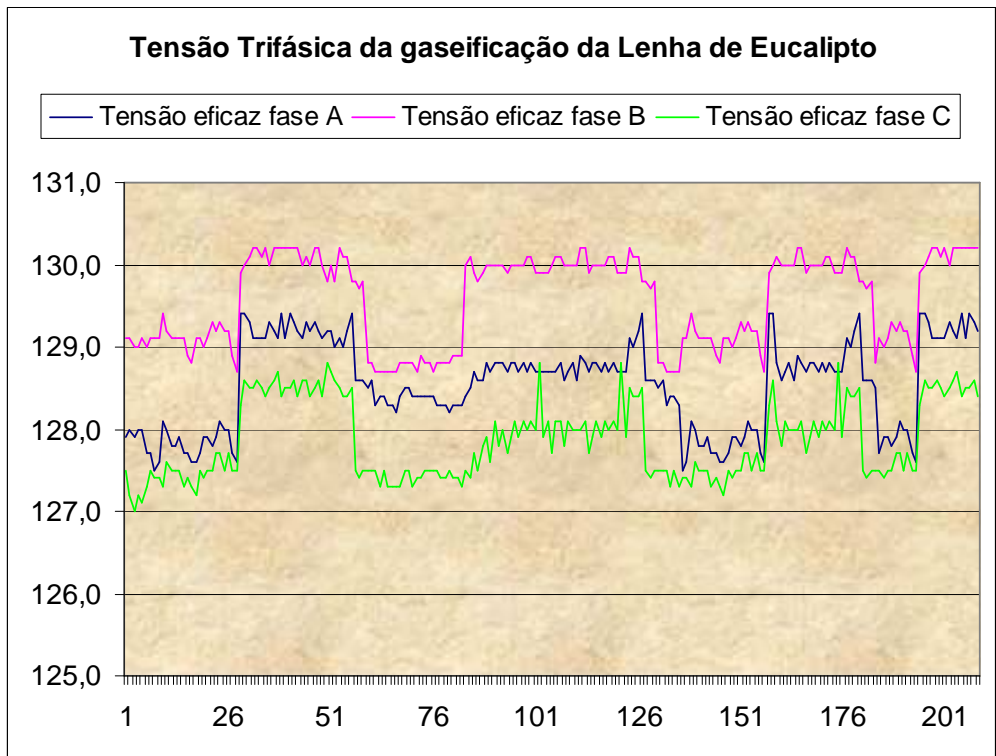


Gráfico 4.2: Tensão trifásica da gaseificação da lenha de eucalipto.

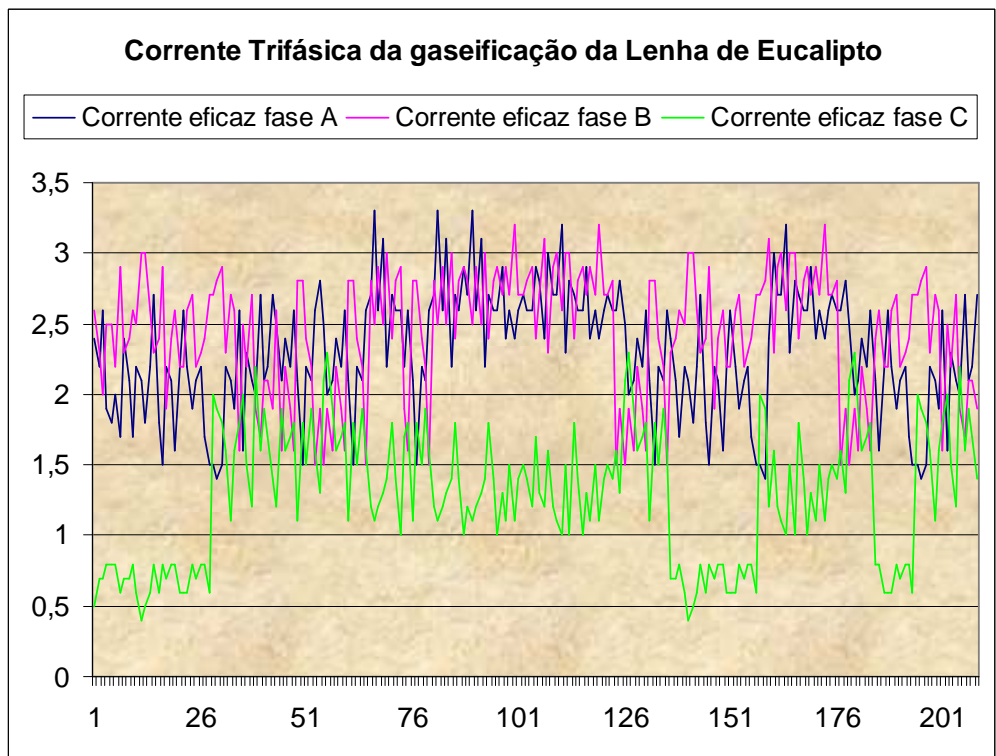


Gráfico 4.3: Corrente trifásica da gaseificação da lenha de eucalipto.

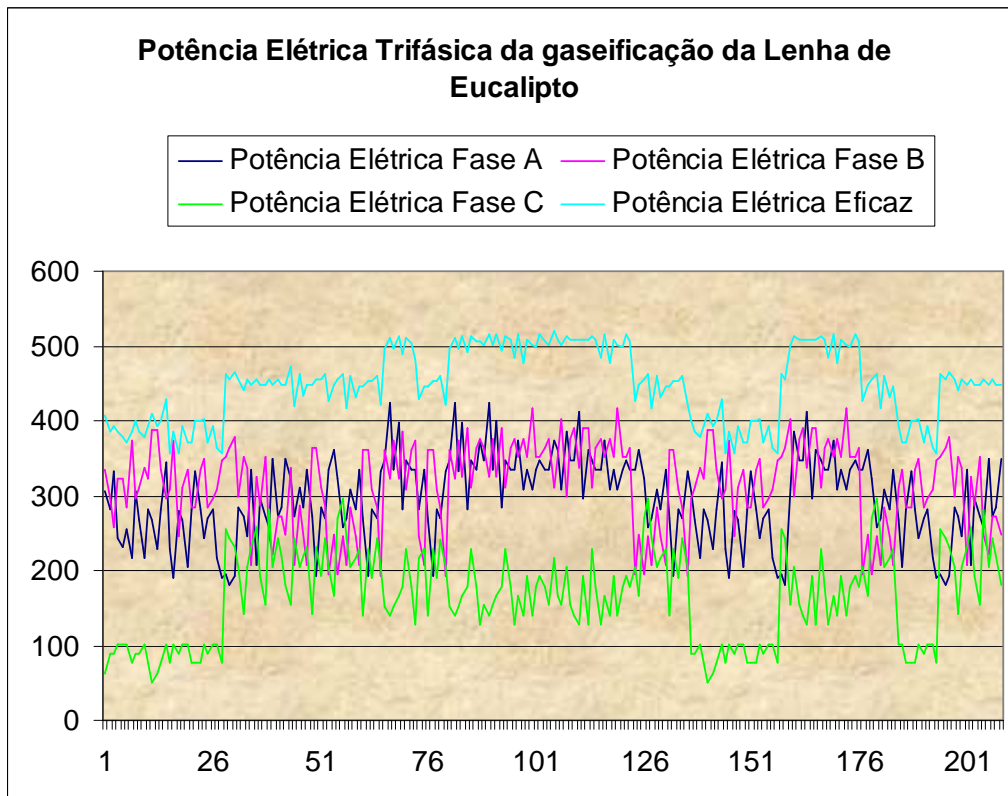


Gráfico 4.4: Potência elétrica trifásica da gaseificação da lenha de eucalipto.

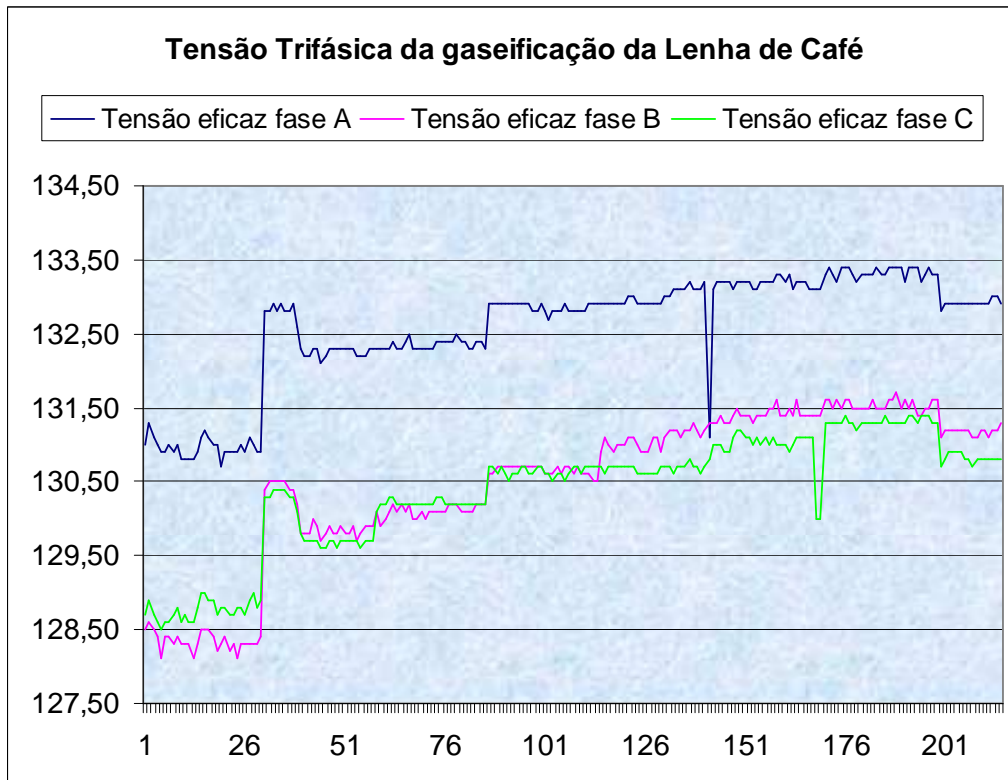


Gráfico 4.5: Tensão trifásica da gaseificação da lenha de café.

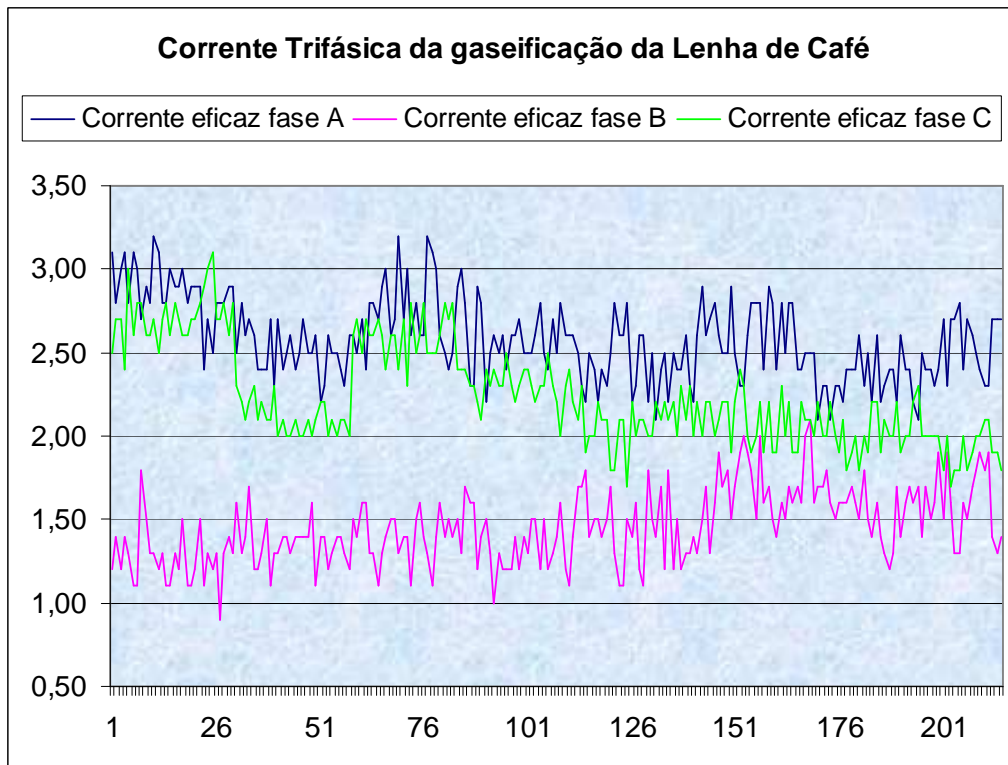


Gráfico 4.6: Corrente trifásica da gaseificação da lenha de café.

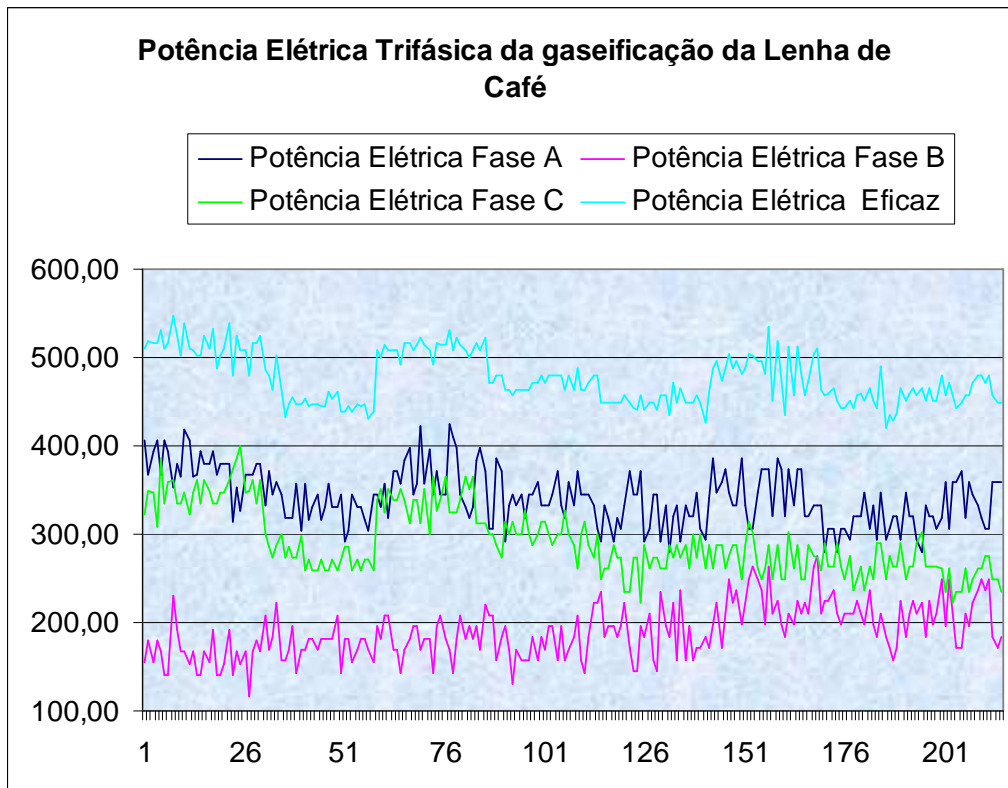


Gráfico 4.7: Potência elétrica trifásica da gaseificação da lenha de café.

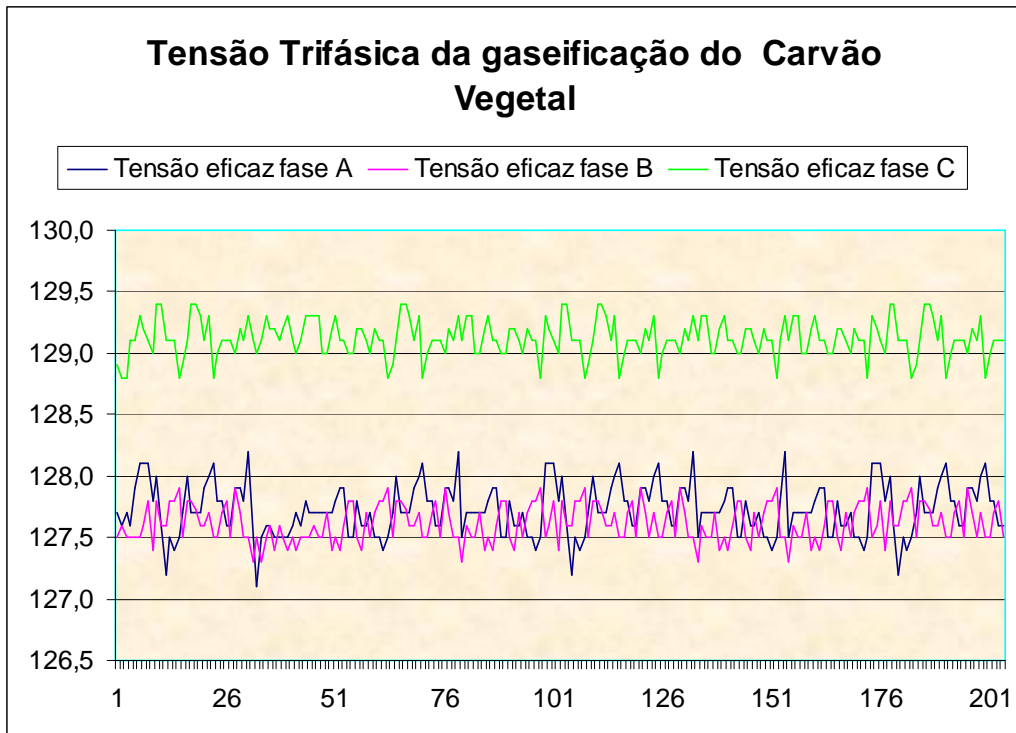


Gráfico 4.8: Tensão trifásica da gaseificação do carvão vegetal.

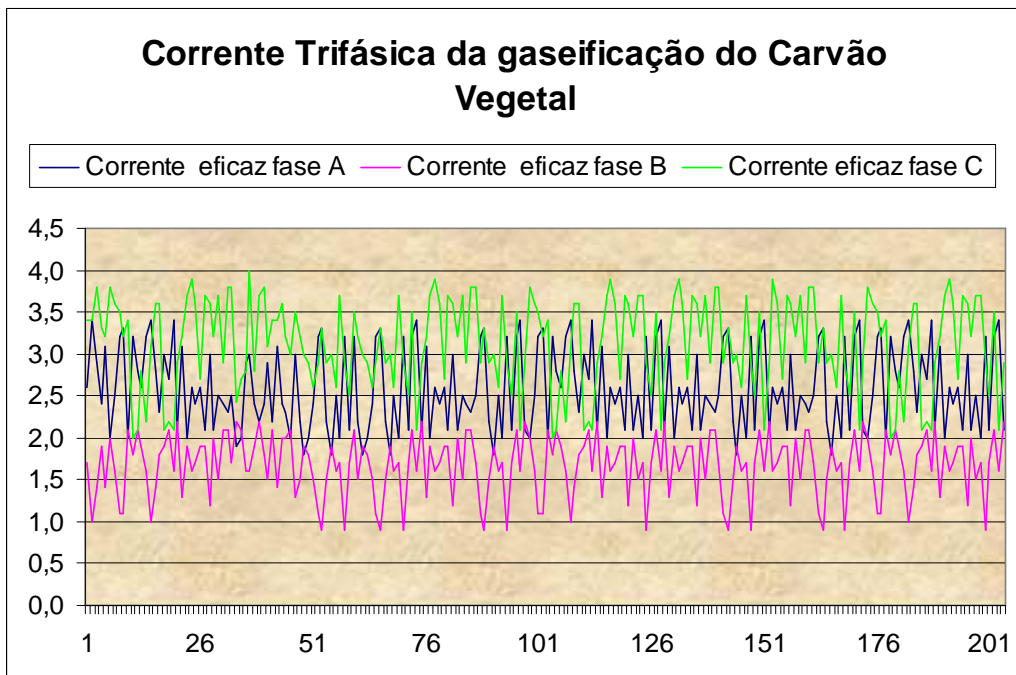


Gráfico 4.9: Corrente trifásica da gaseificação do carvão vegetal.

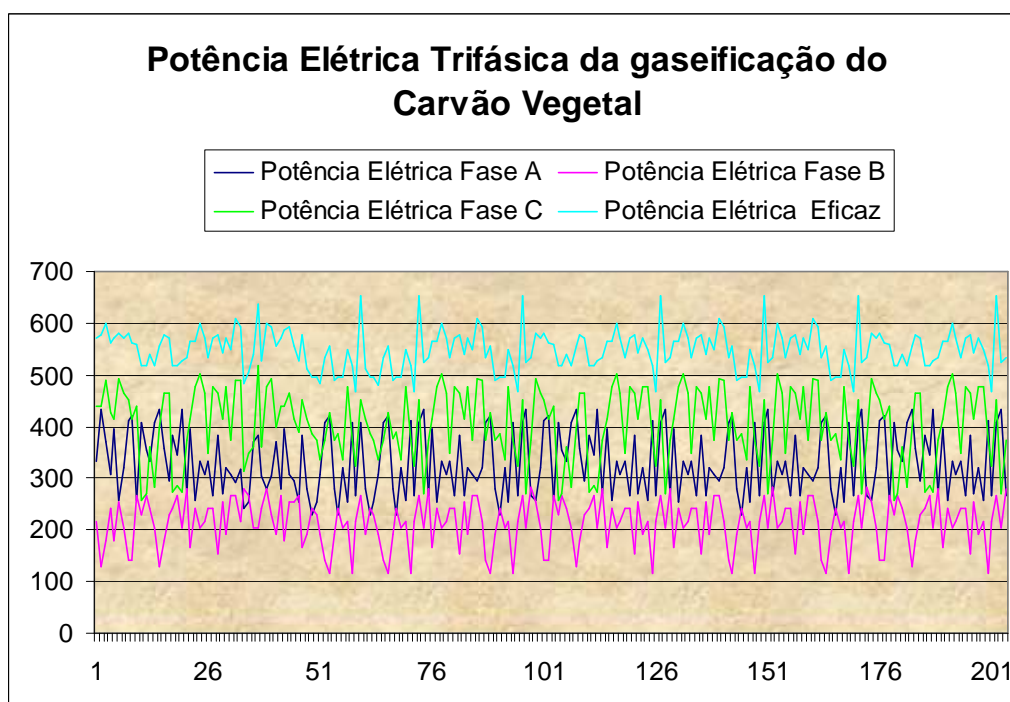


Gráfico 4.10: Potência elétrica trifásica da gaseificação do carvão vegetal.

Analisando o consumo de energia durante a realização dos experimentos, pela tabela 4.10, pode-se observar que dentre as biomassas trabalhadas a gaseificação com o carvão vegetal consumiu a menor quantidade de matéria-prima, seguida da gaseificação com a lenha de café e da gaseificação com a lenha de eucalipto, que tiveram o mesmo consumo. Em relação ao custo da energia elétrica, a gaseificação com a lenha de eucalipto foi a que teve o menor custo, em todos os testes, entre as biomassas. Porém levando-se em conta os preços do Kg das biomassas e do KW, cobrados no período do experimento, pode-se concluir que a gaseificação com as biomassas trabalhadas possuem o mesmo custo para o aquecimento do ar para a desidratação de frutas.

Tabela 4.10: Consumo médio da energia durante o experimento, para cada biomassa.

Biomassa		Torta de Macaúba	Lenha de café	Lenha de eucalipto	Carvão vegetal
Massa total (Kg)		*	42,50	42,50	21,00
Preço (R\$.Kg ⁻¹)		0,40	0,50	0,50	1,00
Custo da biomassa (R\$)		*	21,25	21,25	21,00
Custo da energia elétrica	Todas as velocidades ⁺	*	1,69	1,60	1,75
	1685 rpm	*	1,81	1,66	1,92
	1535 rpm	*	1,68	1,62	1,76

(R\$)	1385 rpm	*	1,57	1,52	1,57
Custo total (R\$) (Todas as velocidades⁺)		*	22,94	22,85	22,75

⁺ A gaseificação foi realizada variando a velocidade nas três condições trabalhadas.

4.5 Qualidade do ar

No teste de qualidade do ar de saída foram medidas as concentrações de O₂ (%), CO (ppm) e CO₂ (ppm) em todos os tratamentos. Analisando o ar aquecido produzido durante a realização dos experimentos, mostrados na tabela 4.11, pode-se observar que dentre as biomassas trabalhadas, a gaseificação com o carvão vegetal apresentou as menores concentrações de CO e CO₂ e a maior concentração de O₂; ao passo que a gaseificação com a lenha de eucalipto apresentou as maiores concentrações de CO e CO₂ e a menor concentração de O₂; e a gaseificação com a lenha de café apresentou concentrações intermediárias de CO, CO₂ e O₂. Sendo assim, pode-se concluir que a gaseificação com o carvão vegetal é a melhor recomendada para o aquecimento do ar para a desidratação de frutas.

Tabela 4.11: Média da qualidade do ar de saída durante o experimento, para cada biomassa.

Biomassa	Torta de Macaúba	Lenha de café	Lenha de eucalipto	Carvão vegetal
O₂ (%)	*	20,27**	20,06**	20,32
CO (ppm)	*	0,20**	0,29**	0,11
CO₂ (ppm)	*	1000,00**	1031,67**	877,30

**O ar de saída de cada processo de gaseificação, foi analisado com o uso do equipamento Testo, tendo como base o carvão vegetal, uma vez os combustíveis padrões do testo são: carvão, gás natural, óleo leve, óleo pesado, antracite, coke, propano e butano. Conseqüentemente não foi possível a sua calibração para todos os combustíveis usados no experimento.

4.6 Eficiência térmica e global

Na determinação das eficiências térmica e global o ar de entrada e os gases de saída foram considerados como gases perfeitos, ha e hg foram obtidos por interpolação da tabela termodinâmica para o ar (A.7), que pode ser encontrada em VAN WYLEN *et al.* (2003).

Tabela 4.12: Valores médios do desempenho do sistema, durante a gaseificação da lenha de eucalipto.

Parâmetros	Valor médio
Tempo de gaseificação (h)	2,07
Consumo de lenha de eucalipto (kg. h ⁻¹)	6,00
Velocidade do ar primário no combustor (m.s ⁻¹)	2,58
Velocidade do ar de saída (m.s ⁻¹)	9,43
Eficiência térmica (%)	29,72
Eficiência global (%)	60,06

Tabela 4.13: Valores médios do desempenho do sistema, durante a gaseificação da lenha de café.

Parâmetros	Valor médio
Tempo de gaseificação (h)	2,04
Consumo de lenha de café (kg. h ⁻¹)	6,00
Velocidade do ar primário no combustor (m.s ⁻¹)	2,53
Velocidade do ar de saída (m.s ⁻¹)	8,59
Eficiência térmica (%)	27,56
Eficiência global (%)	55,68

Tabela 4.14: Valores médios do desempenho do sistema, durante a gaseificação do carvão vegetal.

Parâmetros	Valor médio
Tempo de gaseificação (h)	2,09
Consumo de carvão vegetal (kg. h ⁻¹)	2,96
Velocidade do ar primário no combustor (m.s ⁻¹)	3,27
Velocidade do ar de saída (m.s ⁻¹)	13,27
Eficiência térmica (%)	31,65
Eficiência global (%)	63,34

As eficiências térmica e global possuem valores condizentes aos obtidos na literatura. SANTOS (2003), obteve eficiência térmica média 46,71 %. Martin (2005), obteve eficiência térmica de 37,90% e global de 76,57%, cita ainda que SAGLIETTI (1991) e OLIVEIRA (1996), obtiveram rendimento térmico médio de 28 % e 30 %, respectivamente.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O sistema construído e testado, para ser usado na geração de calor, demonstrou a viabilidade do uso das biomassas testadas (lenha de eucalipto, lenha de café e carvão vegetal) para a desidratação de frutas. Verificou-se também que este sistema forneceu temperatura do ar de saída (ar de secagem) maior do que a necessária para a desidratação de frutas, havendo a necessidade de regular a entrada de ar do misturador. Isto mostra a necessidade de se aumentar à vazão do ventilador para que possa ser feita a mistura do ar ambiente com o ar quente, a fim de se obter a temperatura ideal do ar de secagem (não superior á 70 °C) sem alterar o funcionamento do restante do sistema. Tal aumento também se justifica pela necessidade de criar uma maior pressão negativa, que seja suficiente para vencer as perdas de carga impostas e a baixa porosidade da torta do coco macaúba, e assim succionar o ar que passará por toda a extensão do sistema.

Durante a realização dos testes observou-se que o sistema necessitava, aproximadamente, de 5 minutos para gerar gás combustível de qualidade e de 15 a 20 minutos para atingir as condições ideais de funcionamento, mesmo estando o sistema em regime transiente, passando assim a apresentar produção contínua e regular de gás para combustão, o que permitiu manter a geração de ar quente estável.

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos e nas discussões apresentadas, pode-se concluir que:

A associação do reator para gaseificação de biomassa com o combustor do gás produzido pode ser considerada uma alternativa na geração de calor para a desidratação de frutas, competindo com os métodos tradicionais, pois o sistema foi de fácil construção e o reabastecimento do reator, feito com o sistema em pleno funcionamento, permitiu sua estabilidade e continuidade operacional.

Não se recomenda o uso da torta de macaúba pura e nem combinada com carvão vegetal para o fornecimento de ar quente por meio de da gaseificação, com o uso de um sistema semelhante ao utilizado. Pois, em todos os testes realizados houve entupimento da grelha.

Em relação à qualidade do ar aquecido, conclui-se que a gaseificação com o carvão vegetal é o mais recomendado para o aquecimento do ar para a desidratação de frutas.

Em relação ao consumo de biomassa, conclui-se que a gaseificação com o carvão vegetal é o combustível mais recomendado para o aquecimento do ar para a desidratação de frutas.

Em relação ao consumo de energia elétrica, conclui-se que a gaseificação com a lenha de eucalipto é o combustível mais recomendado para o aquecimento do ar para a desidratação de frutas.

Em relação ao teor de umidade e ao PCS, conclui-se que a gaseificação com o carvão vegetal é o mais recomendado para o aquecimento do ar para a desidratação de frutas.

Em relação à temperatura, conclui-se que a gaseificação com o carvão vegetal é o mais recomendado para o aquecimento do ar para a desidratação de frutas.

Por fim conclui-se que o combustível mais recomendado para o aquecimento do ar para a desidratação de frutas é o carvão vegetal, pois dentre as biomassas estudadas foi a que forneceu ar quente de melhor qualidade com o menor consumo de matéria prima, além de apresentar a melhor eficiência térmica e global.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARRIGA A., M. B. **Experimentos de gaseificação de casca de arroz em leito fluidizado**. 85p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, 2002.
- BARUFFALDI, R.; O. M. N. de. **Fundamentos da tecnologia de alimentos**. São Paulo, Atheneu, 1998.
- BONDAR, G. **Palmeiras do Brasil**. São Paulo: Instituto de Botânica, São Paulo, 1964, n.2; p. 50-554.
- BRASIL, Ministério da indústria e comércio. Secretaria de Tecnologia Industrial. **Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais**. Brasília, STI/CIT, 1985. 364p (STI Documentos, 16).
- BUENO, C. R. F.; SACHS, R. C. C.; MARGARIDO, M. A. **PERSPECTIVAS PARA O MERCADO BRASILEIRO DE FRUTAS DESIDRATADAS**. XX Congresso Brasileiro de Fruticultura 54th Annual Meeting of the Interamerican Society for Tropical Horticulture 12 a 17 de Outubro de 2008 - Centro de Convenções – Vitória/ES.
- CARIOCA, J. O. B.; ARORA, H. L. **Biomassa - Fundamentos e Aplicações Tecnológicas**. Edição UFC/BNB.1985.
- CEMIG – COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Gaseificação de Biomassa**. Belo Horizonte: Divisão de análise e desenvolvimento energético. 1986.
- CENBIO, Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Estado da Arte da Gaseificação**. Convênio FINEP São Paulo 2002.
- COELHO, J. C. **Biomassa, biocombustíveis, bioenergia**. Brasília: Ministério das Minas e Energia (MME), 1982.
- CORRÊA NETO, V. **Análise de Viabilidade da Co-geração de Energia Elétrica em Ciclo Combinado com Gaseificação de Biomassa de Cana de açúcar e Gás Natural**. 174p. Dissertação (Mestrado em Ciência em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2001.
- CUNHA, J. P. A. R. **Introdução a Gaseificação Biomassa** Viçosa M.G., 2001 16p, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de VIÇOSA-M.G.
- CHITARRA, M.I.F.; CHITARRA, A. B. **Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio**. Lavras: ESAL/FAEPE, 2005. 735p.
- ELETROBRÁS. Centrais Elétricas Brasileiras, FUPAI/EFFICIENTIA. **Eficiência Energética no Uso de Vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005. 196p.
- FERNANDES, M. C. **Avaliação tecno-econômica da gaseificação do capim-elefante para eletrificação rural**. 104p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, 2000.
- FERREIRA, W. P. M.; SILVA, J. de S.; SILVA, J. N. da; SOUZA, C. de F. **Dimensionamento de uma fornalha a carvão vegetal para aquecimento de aviário**. Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, v.14, n.4, 258-267, Out./Dez, 2006.

FILHO, F. P. **Gaseificadores de leito fixo: análise e modelo para otimização de projetos e pesquisas.** 165p. Brasília. Ed. do Centro Gráfico do Senado Federal, 1988.

FRUITS from América: na ethnobotanical inventory *Acrocomia aculeata*. Disponível em: http://www.ciat.cgiar.org/ipgri/fruits_from_americas/frutales/Acrocomiaaculeata.htm Acesso em: 8.11.2007.

FURIGO JÚNIOR, A. **Biodiesel.** Universidade Federal de Santa Catarina. CTC Centro Tecnológico. Florianópolis. Santa Catarina. 2006.

GOULART, E. A. **Reciclagem energética de pneus automotivos através do reator de leito fluidizado: uma proposta para a questão ambiental.** 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, 1999.

GUERREIRO, F. **FRUTICULTURA IRRIGADA NA BAHIA.** 2002.

GRAY, M. **Palm and Cycad Societies of Austrália.** Disponível em: <http://www.pacsoa.org.au/palms/Acrocomia/aculeata.html> Acesso em: 20.09.2007.

KLAUTAU, J. von P. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo co-corrente para secagem de grãos.** 193p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental Curitiba) – Universidade Federal do Paraná, 2008.

LOPES, R. P. **Desenvolvimento de um sistema gerador de calor com opção para aquecimento direto e indireto do ar.** 220 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

LORA, E. S.; HAPP, J. F.; CORTEZ, L. A. B. **Caracterização e disponibilidade da biomassa.** IN: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.S. **Tecnologias de conversão energética da biomassa.** Manaus: EDUA/EFEI. 1997. p 5-38.

LORA, E. S.; HAPP, J. F. **Balço de massa e energia nos processos de combustão.** IN: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S. **Tecnologias de conversão energética da biomassa.** Manaus: EDUA/EFEI. 1997 a. p 61-90.

LORA, E. S.; HAPP, J. F. **Classificação e balanço térmico das fornalhas para a combustão de biomassa.** IN: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S. **Tecnologias de conversão energética da biomassa.** Manaus: EDUA/EFEI, 1997b, p 91-132.

LORA, E. S.; CORTEZ, L. A. B. **Biomassa para energia.** 2006.

MATA, S. F. **Gaseificação de carvão vegetal em gasogênio de sucção ascendente. Gás de ar e de água.** 89p. Dissertação (Mestrado em de Alimentos e Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, 1981.

MARTIN, S. **Desenvolvimento de um gaseificador de biomassa de fluxo concorrente.** 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2005.

MARTINS, P. M. **A influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem no teor e composição química do óleo essencial de Capim Limão (*Cymbopogum citratus* (D.C.) STAPF).** 77p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2000.

MENDES, L. M.; SILVA, J. R. da; TRUGILHO, P. F. **Gaseificação de carvão vegetal ou madeira para geração de energia em pequena escala.** Lavras: UFLA/FAEPE, 1998.

- MONTE, J. E. C. **Sistema de controle e automação aplicável a secadores em camada fina utilizando-se instrumentos digitais endereçáveis.** 135p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 2006.
- MORAES, S. B. **Estudo analítico experimental de um conjunto gaseificador.** 68p. Dissertação (Mestrado em Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, 1983.
- NASCIMENTO NETO, F. do. **Roteiro para elaboração de manual de Boas Práticas de Fabricação (BPF) em restaurantes.** SENAC SAO PAULO, 2003.
- OLIVARES G., E. **Projeto, construção e avaliação preliminar de um reator de leito fluidizado para gaseificação de bagaço de cana de açúcar.** 200p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, 1996.
- OLIVEIRA, J. C. D. de. **Estudo experimental de uma válvula cônica para controle de descarga de sólidos em leito fluidizado.** 107p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, 2001.
- PERA, H. **Geradores de vapor: um compêndio sobre conversão de energia com vistas à preservação da ecologia.** São Paulo: Fama, 1990.
- PINHEIRO, P. C. C.; VALLE, R. M. **Controle de combustão: otimização do excesso de ar.** In: II Congresso de equipamentos e automação da indústria química e petroquímica, 1995, Rio de Janeiro.
- RAMIREZ B., J. J. **Diminuição de H₂S na gaseificação de carvão mineral mediante adição de dolomita em reator de leito fluidizado.** 173p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, 1999.
- REINATO, C. H. R.; BORÉM, F. M.; VILELA, E. R.; CARVALHO, F. M.; MEIRELES, E. de P. **Consumo de energia e custo de secagem de café cereja em propriedades agrícolas do sul de Minas Gerais.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.6, n.1, p.112-116, 2002.
- SÁNCHEZ, C. G. **Estudo da volatilização e da gaseificação de biomassa em leito fluidizado.** 175p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, 1994.
- SANTOS, I. S. **Reator de gaseificação de biomassa em fluxo contracorrente.** 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2003.
- SILVA, J. C. **Macaúba: fonte de matéria prima para os setores alimentício, energético e industrial.** Viçosa: CEDAF/DEF/UFV, 1994. 41p.
- SODRÉ, B. J. **Morfologia das palmeiras como meio de identificação e uso paisagístico.** Lavras, Minas Gerais 2005.
- SOUZA, M. R. de. **Cofiring como alternativa para impulsionar a tecnologia de gaseificação de biomassa integrada a ciclos combinados – BIG-CC.** 190p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, 2001.
- VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica.** São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2003.
- VIEIRA, A. C. **Gaseificação de briquetes de casca de eucalipto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

WANDER, P. R. **Utilização de resíduos de madeira e lenha como alternativas de energia renováveis para o desenvolvimento sustentável da região nordeste do estado do Rio Grande do Sul.** 106 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.


ZANATTA, F. L. **Gaseificador de biomassa no aquecimento de aviários e sua relação com o conforto térmico, qualidade do ar e desempenho produtivo de frangos de corte.** 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2007.

Sites Consultados

- **Embrapa 2008.** <http://www22.sede.embrapa.br/cafe/unidade/historico.htm>. Acesso em: 20.01.2009.
- **Escola SENAI Mario Amato.** Disponível em: www.pr.senai.br/clinicatecnologica/uploadAddress/ Acesso em: 17.09.2008.
- **MME – Ministério de Minas e Energia.** Balanço Energético Nacional 2000.
- **MME – Ministério de Minas e Energia.** Balanço Energético Nacional 2007.
- **O Biodiesel.** Disponível em: <http://mbdobrasil.com.br/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=8&page=2>. Acesso em: 17.09.2008.
- **Origem e características das cultivares de café.** Disponível em: <http://www.revistacafeicultura.com.br/index.php?tipo=ler&mat=3696>. Acessado em: 25.01.09.
- **PETROBRAS 2007.** Disponível em: www2.petrobras.com.br. Acesso em: 15.09.2008.

• 8. ANEXOS

8.1 Anexo A – Certificados de Calibração do analisador de gás



testo do Brasil

Certificado de Calibração

Rua Dr. Guilherme da Silva 190
Cambuí - CEP 13015-028
Campinas - SP - Brasil
Tel: (19) 3731-5800
Fax: (19) 3731-5819
testo@testo.com.br
www.testo.com.br

Certificado Nº: 009413/1
Nº do Inventário do Equipamento: 14767
Modelo do Equipamento: 0632 3301
Série do Equipamento: 01087436/505
Descrição do Equipamento: Testo 330-1 Analisador de Gás
Modelo da Sonda: 0600 9761
Descrição da Sonda: SONDA DE GASES
Cliente: FUNDACAO ARTHUR BERNARDES
Localização do Cliente: VICOSA-MG

Série da Sonda: NA
Nº do Inventário da Sonda: NA
CNPJ/CGC do Cliente: 20.320.503/0001-51

Este certificado atende aos requisitos do nosso sistema de garantia da qualidade que está de acordo a norma ISO/IEC 17025:2005.
Os nossos padrões são regularmente calibrados no laboratório de nossa matriz na Alemanha, sendo que o mesmo é credenciado ao DKD e acreditado pelo Instituto Federal Alemão de Física e tecnologia (PTB), ou por laboratórios credenciado a RBC. Os documentos citados nesta calibração estão disponíveis para verificação.
Não é autorizada a reprodução parcial deste documento sem prévia autorização da TESTO.
As incertezas expandidas relatadas estão baseadas em suas respectivas incertezas padrão combinadas, multiplicadas pelo fator de abrangência k correspondente, fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%.

(X) Os valores obtidos nas medições encontram-se DENTRO da área de especificação
() Os valores obtidos nas medições encontram-se FORA da área de especificação

Instalações
Descrição de Equipamento:
Cilindro de Referência contendo gás Padrão. Validade 08 de Agosto de 2009
Rastreado a padrões RBC de referência através do certificado: RBC/INMETRO 65.840-101

232708

Incerteza do Instrumento de Referência :
O2: ± 0,1% Vol.
CO: ± 10 ppm
CO2: ± 11 ppm
SO2: ± 10 ppm

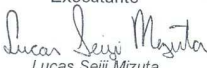
Condições ambientais :
Temperatura: 22 °C ± 3 °C
Umidade: 55 %RH ± 10%UR
Pressão: 926 hPa ± 15 hPa


Procedimento de Calibração: Introdução de amostra de gás Padrão .

Resultados da medição:

Referência	Valores do Padrão	Valores do Mensurando	Erro	Incerteza
Concentração O2 (ppm)	9,90	10,10	0,20	0,10
Concentração CO (ppm)	1.014,00	998,00	-16,00	10,00

Data do Recebimento do Equipamento: 12/5/2008
Data de Calibração: 26/8/2008

Executante: 
Lucas Seiji Mizuta

Responsável - Laboratório Calibração: 
Jaime Macherini

Certificado de Calibração

Rua Dr. Guilherme da Silva 1
 Cambuí - CEP 13015-028
 Campinas - SP - Brasil
 Tel: (19) 3731-5800
 Fax: (19) 3731-5819
 testo@testo.com.br
 www.testo.com.br

Certificado Nº: 009413/2
 Nº do Inventário do Equipamento: 14767
 Modelo do Equipamento: 0632 3301
 Série do Equipamento: 01087436/505
 Descrição do Equipamento: Testo 330-1 Analisador de Gás
 Modelo da Sonda: 0600 9761
 Descrição da Sonda: SONDA DE GASES
 Cliente: FUNDAÇÃO ARTHUR BERNARDES
 Localização do Cliente: VICOSA-MG

Série da Sonda: NA
 Nº do Inventário da Sonda: NA

CNPJ/CGC do Cliente: 20.320.503/0001-51

Este certificado atende aos requisitos do nosso sistema de garantia da qualidade que está de acordo a norma ISO/IEC 17025:2005. Os nossos padrões são regularmente calibrados no laboratório de nossa matriz na Alemanha, sendo que o mesmo é credenciado ao DKD e acreditado pelo Instituto Federal Alemão de Física e tecnologia (PTB), ou por laboratórios credenciado a RBC. Os documentos citados nesta calibração estão disponíveis para verificação.

Não é autorizada a reprodução parcial deste documento sem prévia autorização da TESTO.
 As incertezas expandidas relatadas estão baseadas em suas respectivas incertezas padrão combinadas, multiplicadas pelo fator de abrangência k correspondente, fornecendo um nível de confiança de aproximadamente 95%.

(X) Os valores obtidos nas medições encontram-se DENTRO da área de especificação
 () Os valores obtidos nas medições encontram-se FORA da área de especificação

Instalações

Descrição de Equipamento:
 Cilindro de Referência contendo gás Padrão, Validade 08 de Agosto de 2009
 Rastreado a padrões RBC de referência através do certificado: RBC/INMETRO 322.0305-01,
 RBC/INMETRO 65.840-101

Incerteza do Instrumento de Referência :

239708

O2: ± 0,1% Vol.
 CO: ± 1 ppm
 CO2: ± 15 ppm

Condições ambientais :

Temperatura: 22 °C ± 3 °C
 Umidade: 55 %RH ± 10%UR
 Pressão: 926 hPa ± 15 hPa

Procedimento de Calibração: Introdução de amostra de gás Padrão .

Resultados da medição:

Referência	Valores do Padrão	Valores do Mensurando	Erro	Incerteza
Concentração O2 - (ppm)	2,70	2,80	0,10	0,10
Concentração CO - (ppm)	141,00	136,00	-5,00	1,00

Data do Recebimento do Equipamento:
 12/5/2008
 Data de Calibração:
 27/8/2008

Executante

 Lucas Seiji Mizuta

Responsável - Laboratório Calibração


 Jaime Macherini

8.2 Anexo B – Determinação da velocidade do motor

Antes de calcularmos as velocidades em que o motor (rotor) operou, veremos alguns conceitos sobre motores de corrente alternada.

- Princípio de funcionamento

Os motores de indução trifásicos são constituídos de duas partes principais:

1- estator;

2- rotor (constituídos de chapas metálicas).

O rotor pode ser constituído de um conjunto de barras não isoladas e interligadas por anéis de curto-circuito. Este tipo de ligação é chamado de motor de gaiola.

Um enrolamento trifásico é formado por três enrolamentos monofásicos interligados entre si a 120°. Se este enrolamento for alimentado por um sistema trifásico, as correntes I1, I2 e I3 criarão seus campos magnéticos H1, H2 e H3, que são proporcionais às correntes que estão defasadas em 120°, logo também estarão defasados em 120°. Dessa forma o campo magnético resultante terá um valor fixo, porém mudará de direção, girando até completar uma volta. A essa propriedade damos o nome de “campo girante”.

- Potência

Quando se deseja escolher um motor para acionar uma determinada carga, é preciso conhecer a sua potência (equação B.1), ou seja, o conjugado requerido pela carga e a rotação que esta carga deve ter em condições nominais.

$$P = W_r * T \quad (B.1)$$

em que:

P = potência [W];

W_r = Velocidade mecânica [rad/s];

T = torque [N.m].

- Velocidade Síncrona

A velocidade do campo girante determina a rotação do motor.

Um motor poderá ter mais do que um par de pólos, e isto influirá na rotação, o que pode ser visto pela equação B.2, abaixo:

$$N_s = \frac{120 * f}{p} \quad (B.2)$$

em que:

N_s = rotação [rpm];

f = frequência de alimentação da rede [Hz];

p = número de pólos.

- Escorregamento

Se o motor gira numa velocidade diferente do campo girante, o rotor corta as linhas de força magnética do campo, e, conseqüentemente, circularão nele correntes induzidas.

As correntes induzidas no rotor criarão seu próprio campo magnético de polaridade contrária á do campo girante e, como campos opostos se atraem, o rotor tende a acompanhar o campo girante.

Ao se colocar, porém uma carga no rotor do motor, a sua rotação tenderá a cair, e a diferença entre a velocidade do campo girante (síncrona) e a velocidade do rotor recebe o nome de escorregamento. Que pode ser determinado pelas equações abaixo:

$$Nr = Ns(1 - \frac{s}{100}) \text{ ou } s(\%) = (\frac{Ns - Nr}{Ns})100 \text{ ou } Nesc_{(rpm)} = Ns - Nr \quad (B.3)$$

em que:

Nr = velocidade do motor (rotor);

Ns = velocidade síncrona ou do campo girante [rpm];

Nesc = Velocidade de escorregamento;

s = escorregamento.

Determinação das velocidades de operação

Sejam os dados retirados da placa do motor:

V = 220V;

I = 3,16A;

Nr = 1685 rpm;

P = 0,75 CV;

f = 60 Hz;

p = 4 pólos.

Com base nos valores e nas equações acima, obteve-se a Tabela B.1 a seguir.

Tabela B.1: Determinação da velocidade do motor.

f (Hz) =	60	55	50
p =	4	4	4
Ns (rpm) =	1800	1650	1500
Nr (rpm) =	1685	1535	1385

8.3 Anexo C – Tabelas estatísticas

Para as tabelas de 1 a 15, tratamento 1, 2 e 3 são, respectivamente, gaseificação com lenha de café, lenha de eucalipto e carvão vegetal.

Tabela C.1: ANOVA de T0, Nr = 1385 rpm

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	47033,44	23516,72	17,856
Resíduo	6	7902,30	1217,05	
Total	8	54935,74		
Média:	148,97			
Desvio:	82,87			
CV:	24,36			

Teste de Tukey

Tratamento	Médias	Comparação 5%
3	222,55	A
2	173,63	A
1	50,71	B

Tabela C.2: ANOVA de T1, Nr = 1385 rpm

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	139882,90	69941,45	8,067
Resíduo	6	52022,96	8670,49	
Total	8	191905,86		
Média:	744,87			
Desvio:	154,88			
CV:	12,50			

Teste de Tukey

Tratamento	Médias	Comparação 5%
3	920,30	A
1	672,43	B
2	641,89	B

Tabela C.3: ANOVA de T2, Nr = 1385 rpm

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	2213,34	1106,67	2,95
Resíduo	6	2251,67	375,28	
Total	8	4465,01		
Média:	185,42			
Desvio:	23,63			
CV:	10,45			

Tabela C.4: ANOVA de T3, Nr = 1385 rpm

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	414,44	207,22	1,94
Resíduo	6	640,40	106,73	
Total	8	1054,84		
Média:	53,52			
Desvio:	11,48			
CV:	19,30			

Tabela C.5: ANOVA de T4, Nr = 1385 rpm

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	0,46	0,23	0,02
Resíduo	6	71,04	11,84	
Total	8	71,50		
Média:	66,74			
Desvio:	2,99			
CV:	5,16			

Tabela C.6: ANOVA de T0, Nr = 1535 rpm

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	41158,07	20579,04	25,77
Resíduo	6	4790,75	798,46	
Total	8	45948,82		
Média:	116,79			
Desvio:	75,79			
CV:	24,19			

Teste de Tukey

Tratamento	Médias	Comparação 5%
3	209,22	A
1	91,84	B
2	49,31	B

Tabela C.7: ANOVA de T1, Nr = 1535 rpm

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	80740,52	40370,26	8,96
Resíduo	6	27028,54	4504,76	
Total	8	107769,06		
Média:	715,3			
Desvio:	116,07			
CV:	9,38			

Teste de Tukey

Tratamento	Médias	Comparação 5%
3	845,33	A
1	678,11	A B
2	622,45	B

Tabela C.8: ANOVA de T2, Nr = 1535 rpm

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	1546,35	773,17	0,77
Resíduo	6	6040,23	1006,71	
Total	8	7586,58		
Média:	215,26			
Desvio:	30,79			
CV:	14,74			

Tabela C.9: ANOVA de T3, Nr = 1535 rpm

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	2119,60	1059,80	7,40
Resíduo	6	859,18	143,20	
Total	8	2978,78		
Média:	62,00			
Desvio:	19,30			
CV:	19,30			

Teste de Tukey

Tratamento	Médias	Comparação 5%
3	82,67	A
1	57,39	A B
2	45,93	B

Tabela C.10: ANOVA de T4, Nr = 1535 rpm

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	3,25	1,62	0,18
Resíduo	6	53,63	8,94	
Total	8	56,88		
Média:	68,33			
Desvio:	2,66			
CV:	4,37			

Tabela C.11: ANOVA de T0, Nr = 1685 rpm

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	23100,49	11550,25	6,47
Resíduo	6	10714,04	1785,67	
Total	8	33814,53		
Média:	86,41			
Desvio:	65,02			
CV:	48,9			

Teste de Tukey

Tratamento	Médias	Comparação 5%
3	157,57	A
1	58,06	A B
2	43,60	B

Tabela C.12: ANOVA de T1, Nr = 1685 rpm

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	94449,72	47224,86	2,45
Resíduo	6	115676,30	19279,39	
Total	8	210126,02		
Média:	704,99			
Desvio:	162,07			
CV:	19,69			

Tabela C.13: ANOVA de T2, Nr = 1685 rpm

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	15308,97	7654,84	1,42
Resíduo	6	32417,55	5402,93	
Total	8	47726,52		
Média:	274,98			
Desvio:	77,24			
CV:	26,73			

Tabela C.14: ANOVA de T3, Nr = 1685 rpm

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	2996,82	1498,41	17,37
Resíduo	6	517,61	86,27	
Total	8	3514,43		
Média:	62,62			
Desvio:	20,96			
CV:	14,83			

Teste de Tukey

Tratamento	Médias	Comparação 5%
3	87,67	A
1	55,49	B
2	44,71	B

Tabela C.15: ANOVA de T4, Nr = 1685 rpm

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	39,00	19,50	2,17
Resíduo	6	53,81	8,97	
Total	8	92,81		
Média:	71,22			
Desvio:	3,41			
CV:	4,20			

Para as tabelas de 16 a 30, tratamento 1, 2 e 3 são, respectivamente, gaseificação com rotação do motor em 1685, 1535 e 1385 rpm.

Tabela C.16: ANOVA da Lenha de Café para T0

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	85,23	42,61	0,06
Resíduo	6	4200,30	700,05	
Total	8	4285,53		
Média:	47,87			
Desvio:	23,14			
CV:	55,27			

Tabela C.17: ANOVA da Lenha de Café para T1

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	1822,57	911,28	0,10
Resíduo	6	53935,41	8989,23	
Total	8	55757,98		
Média:	623,82			
Desvio:	83,48			
CV:	15,20			

Tabela C.18: ANOVA da Lenha de Café para T2

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	9910,15	4955,07	1,16
Resíduo	6	25713,43	4285,57	
Total	8	35623,58		
Média:	240,93			
Desvio:	66,73			
CV:	27,17			

Tabela C.19: ANOVA da Lenha de Café para T3

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	2,75	1,37	0,01
Resíduo	6	751,07	125,18	
Total	8	753,82		
Média:	45,49			
Desvio:	9,71			
CV:	24,60			

Tabela C.20: ANOVA da Lenha de Café para T4

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	48,12	24,06	2,71
Resíduo	6	53,33	8,89	
Total	8	101,45		
Média:	68,90			
Desvio:	3,56			
CV:	4,33			

Tabela C.21: ANOVA da Lenha de Eucalipto para T0

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	21189,11	10594,55	6,67
Resíduo	6	9530,89	1588,48	
Total	8	30720,00		
Média:	107,84			
Desvio:	61,97			
CV:	36,96			

Teste de Tukey

Tratamento	Médias	Comparação 5%
3	173,63	A
2	91,84	A B
1	58,06	B

Tabela C.22: ANOVA da Lenha de Eucalipto para T1

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	431,34	215,67	0,01
Resíduo	6	120699,30	20116,54	
Total	8	121130,64		
Média:	670,66			
Desvio:	123,05			
CV:	21,15			

Tabela C.23: ANOVA da Lenha de Eucalipto para T2

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	38415,56	19207,78	8,66
Resíduo	6	13308,69	2218,11	
Total	8	51724,25		
Média:	230,4			
Desvio:	80,41			
CV:	20,44			

Teste de Tukey

Tratamento	Médias	Comparação 5%
1	319,96	A
2	205,32	A B
3	165,93	B

Tabela C.24: ANOVA da Lenha de Eucalipto para T3

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	37,85	18,92	0,12
Resíduo	6	950,12	158,35	
Total	8	987,97		
Média:	55,10			
Desvio:	11,11			
CV:	22,84			

Tabela C.25: ANOVA da Lenha de Eucalipto para T4

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	68,63	34,31	3,26
Resíduo	6	63,16	10,53	
Total	8	131,79		
Média:	69,50			
Desvio:	4,06			
CV:	4,67			

Tabela C.26: ANOVA do Carvão Vegetal para T0

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	7069,37	3435,68	2,19
Resíduo	6	9675,91	1612,65	
Total	8	16745,28		
Média:	196,45			
Desvio:	45,75			
CV:	20,44			

Tabela C.27: ANOVA do Carvão Vegetal para T1

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	11077,50	5538,75	1,65
Resíduo	6	20093,15	3348,86	
Total	8	31170,65		
Média:	870,69			
Desvio:	62,42			
CV:	6,65			

Tabela C.28: ANOVA do Carvão Vegetal para T2

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	1792,67	896,33	3,19
Resíduo	6	1687,33	281,22	
Total	8	3480,00		
Média:	204,33			
Desvio:	20,86			
CV:	8,21			

Tabela C.29: ANOVA do Carvão Vegetal para T3

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	1080,22	540,11	10,25
Resíduo	6	316,00	52,67	
Total	8	1396,22		
Média:	77,56			
Desvio:	13,21			
CV:	9,36			

Teste de Tukey

Tratamento	Médias	Comparação 5%
1	87,67	A
2	82,67	A
3	62,33	B

Tabela C.30: ANOVA do Carvão Vegetal para T4

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	6,89	3,44	0,33
Resíduo	6	62,00	10,33	
Total	8	68,89		
Média:	67,89			
Desvio:	2,93			
CV:	4,73			