

JOFRAN LUIZ DE OLIVEIRA

**POTENCIAL ENERGÉTICO DA GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS DA
PRODUÇÃO DE CAFÉ E EUCALIPTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2010**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

O48p
2010

Oliveira, Jofran Luiz de, 1982-

Potencial energético da gaseificação de resíduos da
produção de café e eucalipto / Jofran Luiz de Oliveira.

– Viçosa, MG, 2010.

xv, 79f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui anexos.

Orientador: Jadir Nogueira da Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. Biocombustíveis. 2. Energia - Fontes alternativas.
3. Gaseificadores. 4. Gás de síntese. I. Universidade Federal
de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 662.88

JOFRAN LUIZ DE OLIVEIRA

**POTENCIAL ENERGÉTICO DA GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS DA
PRODUÇÃO DE CAFÉ E EUCALIPTO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 18 de fevereiro de 2010.

Prof. Delly Oliveira Filho
(Coorientador)

Prof^a. Ilda de Fátima Ferreira Tinôco

Prof. José Márcio Costa

Prof. Brian Lynn Steward

Prof. Jadir Nogueira da Silva
(Orientador)

“No momento em que nos comprometemos, a providência divina também se põe em movimento. Todo um fluir de acontecimentos surge ao nosso favor. Como resultados da atitude, seguem todas as formas imprevistas de coincidências, encontros e ajudas, que nenhum ser humano jamais poderia ter sonhado encontrar. Qualquer coisa que você possa fazer ou sonhar, você pode começar. A coragem contém em si mesma, o poder, o gênio e a magia.”

Goethe

À minha querida esposa Maria da Conceição e amada filha Laura

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus sempre e em todo lugar por estar vivo, feliz e sempre abençoado nos caminhos os quais percorro.

Aos meus pais José Luiz e Francisca Pires, pelo exemplo de caráter, honestidade e respeito.

À minha esposa Conceição, pela mão que me segura durante tão longa caminhada.

Aos meus irmãos Jocélia, Júnior e Jucélio, por mostrarem que apesar da distância, o poder da união é sempre mais forte.

Ao meu orientador Jadir Nogueira da Silva, pela atenção e paciência que me foi dedicada, e pelos muitos “reais” de conselhos que recebi e que ainda procuro uma forma de pagá-lo.

Aos meus Co-Orientadores: Marcio Arêdes Martins e Delly Oliveira Filho, pelos preciosos ensinamentos repassados e pela amizade.

À Professora Ilda de Fátima, pela acolhida e por seus conselhos que me fizeram crescer e aprender a lidar com os problemas.

Aos meus grandes e queridos amigos: Neiton, Akemi, Jairo, Olga, Zanatta, Samuel, Damiana, Keller, Flávio, Débora, Maria Clara, Irene, Roque, Cássio, Emanuele, Svetlana, Olga Toledo, Evan, Gabriel, Rafael, Lauro, Fred e Tiago por me fazer aprender que ter amigos é ter uma família escolhida a dedos.

A todos que colaboraram de alguma forma para o desenvolvimento e finalização do nosso trabalho, especialmente Hamilton, José Eustáquio, sr. Carlos, Catitu, Edson e sr. Geraldo.

À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade que me foi concedida.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro e à FAPEMIG pelo financiamento do projeto, indispensáveis para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

Jofran Luiz de Oliveira, filho de José Luiz Neto e Francisca Pires de Oliveira Luiz, nasceu em 18 de julho de 1982, na cidade de Campina Grande, no Estado da Paraíba.

Graduou-se em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Campina Grande em Junho de 2007. Em março de 2008 iniciou o Mestrado em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa, na área de concentração em Energia na Agricultura, concluindo o curso em fevereiro de 2010.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	xi
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
INTRODUÇÃO.....	2
ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	5
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	6
CAPÍTULO 1 – TECNOLOGIAS DA GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA: UMA REVISÃO.....	7
1.1 HISTÓRICO DA GASEIFICAÇÃO.....	8
1.2 O PROCESSO DA GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA.....	8
1.3 ESTEQUIOMETRIA PARA COMBUSTÃO E GASEIFICAÇÃO	10
1.4 DESAFIOS DO PROCESSO	12
1.4.1 Formação de alcatrão.....	12
1.4.2 Umidade da biomassa.....	13
1.4.3 Equipamentos secundários	13
1.5 APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA DA GASEIFICAÇÃO	14
1.5.1 Geração de energia elétrica.....	14
1.5.2 Geração de calor.....	17
1.5.3 Produção de etanol.....	17
1.5.4 Produção de hidrogênio	18
1.6 ESTUDO TERMODINÂMICO.....	19
1.7 CONCLUSÕES.....	20
1.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22
CAPÍTULO 2 – CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA PRODUÇÃO MADEIREIRA E CAFEIEIRA PARA FINS DE CONVERSÃO TERMOQUÍMICA VIA GASEIFICAÇÃO.....	26
2.1 INTRODUÇÃO.....	27
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	28
2.3 Análise preliminar	29
2.4 Composição elementar e poder calorífico.....	30

2.5	<i>Massa específica da biomassa</i>	31
2.6	<i>Potencial energético dos resíduos no Brasil</i>	31
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃOS	32
2.3.1	<i>Análise da biomassa</i>	32
2.3.2	<i>Potencial energético dos resíduos agrícolas no Brasil</i>	34
2.4	CONCLUSÕES.....	38
2.5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
CAPÍTULO 3 – GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS DA PRODUÇÃO MADEIREIRA E		
	CAFEIEIRA	40
3.1	INTRODUÇÃO.....	41
3.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	44
3.2.1	<i>Reator e componentes secundários</i>	45
3.2.2	<i>Combustíveis</i>	46
3.2.3	<i>Análise do gás de síntese</i>	46
3.2.4	<i>Operação do sistema e instrumentação</i>	47
3.2.5	<i>Balanço de massa</i>	48
3.2.6	<i>Balanço de Energia</i>	49
3.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
3.3.1	<i>Gaseificação de cavacos de eucalipto</i>	50
3.3.2	<i>Gaseificação da palha de café</i>	59
3.3.3	<i>Gaseificação da lenha de cafeeiro</i>	64
3.4	BALANÇO DE MASSA E ENERGIA E RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA (ϕ).....	68
3.5	CONCLUSÕES.....	69
3.6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		
	ANEXOS	75

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
bep	barril equivalente de petróleo
C	Celsius
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
EJ	exajoule ($J 10^{18}$)
GW	gigawatt ($W 10^9$)
kg	kilograma ($g 10^3$)
Gg	gigagrama ($g 10^9$)
MJ	megajoule ($J 10^6$)
MW	megawatt ($W 10^6$)
MWhe	megawatt hora - eletricidade($W 10^6$)
ml	mililitro ($L 10^{-3}$)
m ³	metro cúbico
PJ	Petajoule ($J 10^{15}$)
TJ	Terajoule ($J 10^{12}$)
TWhe	Terawatt hora - eletricidade($W 10^{12}$)
t	tonelada
tep	tonelada equivalente de petróleo

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Quantidade total de resíduos da produção madeireira (cavaco de eucalipto) e cafeeira (palha e lenha) no Brasil, em 2008. -----	36
Figura 2.2 -	Mapa do potencial energético dos resíduos da produção madeireira e cafeeira no Brasil. -----	37
Figura 3.1 -	Sistema de gaseificação - gaseificador com os componentes secundários e esquematização do processo.-----	45
Figura 3.2 -	Sistema de monitoramento da composição química do gás de síntese. -----	47
Figura 3.3 -	Detalhes das zonas de combustão e redução. -----	47
Figura 3.4 -	Cavacos de eucalipto.-----	50
Figura 3.5 -	Temperatura e umidade do agente gaseificante durante o teste 1 com cavacos de eucalipto. -----	51
Figura 3.6 -	Temperatura e umidade do agente gaseificante durante o teste 2 com cavacos de eucalipto. -----	51
Figura 3.7 -	Temperatura e umidade do agente gaseificante durante o teste 3 com cavacos de eucalipto. -----	51
Figura 3.8 -	Pressão negativa no reator e no filtro durante o tempo do teste 1 com cavacos de eucalipto. -----	52
Figura 3.9 -	Pressão negativa no reator e no filtro durante o tempo do teste 2 com cavacos de eucalipto. -----	52
Figura 3.10 -	Pressão negativa no reator e no filtro durante o tempo do teste 3 com cavacos de eucalipto. -----	52
Figura 3.11 -	Temperatura da zona de combustão e da zona de gaseificação durante o teste 1 com cavacos de eucalipto. -----	53
Figura 3.12 -	Temperatura da zona de combustão, zona de gaseificação e da chama durante o teste 2 com cavacos de eucalipto. -----	54
Figura 3.13 -	Temperatura da zona de combustão, zona de gaseificação e da chama durante o teste 3 com cavacos de eucalipto. -----	54

Figura 3.14 -	Representação do consumo de cavaco de eucalipto em função do tempo de gaseificação nos testes T1, T2 e T3. -----	55
Figura 3.15 -	Comportamento da composição do gás e poder calorífico em função do tempo de gaseificação durante o teste 1 com eucalipto. ----	55
Figura 3.16 -	Comportamento da composição do gás e poder calorífico em função do tempo de gaseificação durante o teste 2 com eucalipto. ----	57
Figura 3.17 -	Comportamento da composição do gás e poder calorífico em função do tempo de gaseificação durante o teste 3 com eucalipto. ----	58
Figura 3.18 -	Palha de café. -----	60
Figura 3.19 -	Temperatura e umidade do agente gaseificante (ar) durante gaseificação da palha do café. -----	60
Figura 3.20 -	Pressão negativa no reator e no filtro durante a gaseificação da palha de café. -----	61
Figura 3.21 -	Temperatura da zona de combustão, zona de gaseificação e da chama durante a gaseificação da palha de café. -----	62
Figura 3.22 -	Representação do consumo de palha de café em função do tempo de gaseificação. -----	62
Figura 3.23 -	Comportamento da composição do gás e poder calorífico em função do tempo de gaseificação durante o teste com palha de café. --	63
Figura 3.24 -	Lenha de cafeeiro-----	64
Figura 3.25 -	Temperatura e umidade do ar (agente gaseificante) durante o tempo de gaseificação da lenha oriundo de cafeeiro. -----	65
Figura 3.26 -	Pressão negativa no reator e no filtro durante a gaseificação da lenha do cafeeiro. -----	65
Figura 3.27 -	Temperatura da zona de combustão, zona de gaseificação e da chama durante a gaseificação da lenha do cafeeiro.-----	66
Figura 3.28 -	Representação do consumo de biomassa em função do tempo de gaseificação. -----	67
Figura 3.29 -	Comportamento da composição do gás e poder calorífico em função do tempo de gaseificação durante o teste com lenha de cafeeiro. -----	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Análise imediata das biomassas estudadas, NBR 8112/83	33
Tabela 2.2 -	Massa específica das biomassas estudadas.....	33
Tabela 2.3 -	Composição elementar e poder calorífico dos resíduos	34
Tabela 2.4 -	Quantidade produzida de madeira em tora no Brasil em 2008	34
Tabela 2.5 -	Quantidade produzida de café no Brasil, em 2008.....	35
Tabela 2.6 -	Quantidade de pés de café colhidos, em 2006.....	35
Tabela 2.7 -	Quantidade produzida dos resíduos na produção de eucalipto e cafeeira, no Brasil em 2008.....	36
Tabela 2.8 -	Quantidade de energia disponível nos resíduos da produção madeireira e cafeeira, no Brasil, em 2008.....	37
Tabela 3.1 -	Análise imediata, composição elementar e poder calorífico superior das biomassas	46
Tabela 3.2 -	Análise estatística da composição e do poder calorífico do gás produzido durante o teste 1 da gaseificação com cavacos de eucalipto	56
Tabela 3.3 -	Análise estatística da composição e do poder calorífico do gás produzido durante o teste 2 da gaseificação com cavacos de eucalipto	57
Tabela 3.4 -	Análise estatística da composição e do poder calorífico do gás produzido durante o teste 3 da gaseificação com eucalipto	58
Tabela 3.5 -	Análise estatística da composição e poder calorífico dos três testes de gaseificação com cavacos de eucalipto	59
Tabela 3.6 -	Massa específica dos componentes do gás de síntese (kg/m ³)	59
Tabela 3.7 -	Análise estatística da composição e do poder calorífico do gás produzido durante a gaseificação da palha de café	63
Tabela 3.8 -	Análise estatística da composição e do poder calorífico do gás produzido durante a gaseificação da lenha do cafeeiro.....	68

Tabela 3.9 -	Balanço de massa e eficiência de conversão	68
Tabela 3.10 -	Balanço de energia e eficiência de conversão	69

RESUMO

OLIVEIRA, Jofran Luiz de, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2010.

Potencial energético da gaseificação de resíduos da produção de café e eucalipto.

Orientador: Jadir Nogueira da Silva. Co-orientadores: Marcio Arêdes Martins e Delly Oliveira Filho.

Este trabalho apresenta resultados do estudo relacionado à produção de gás de síntese a partir da gaseificação de resíduos da produção madeireira e cafeeira. Dados da composição química dos resíduos foram analisados e todos os resíduos estudados mostraram grande potencial para produção de energia no Brasil, com potencial energético total superior a 123 PJ/Ano. Os resíduos da produção madeireira (sob a forma de cavacos) e os resíduos da produção cafeeira (sob a forma de palha e lenha) foram submetidos ao processo de gaseificação, em gaseificador comercial de fluxo concorrente, sendo o ar o agente de gaseificação. A composição do gás de síntese foi monitorada em um analisador de gases de gaseificação quanto à concentração volumétrica (%) de CO, CO₂, CH₄ e H₂, e poder calorífico (MJ/m³). Também foram analisados os dados referentes às propriedades do agente gaseificante, temperatura das zonas de redução e combustão, pressão de operação do gaseificador e consumo de biomassa, para cada resíduo gaseificado. Observou-se que cada resíduo apresentou um gás de síntese com composição distinta, sendo o gás de síntese da palha de café, aquele com o maior poder calorífico (7,76 MJ/m³) com predomínio de metano (14,77%), e o gás de síntese da lenha de cafeeiro com o menor poder calorífico (5,45 MJ/m³), com predominância de monóxido de carbono (14,03%). A gaseificação dos cavacos de eucalipto apresentou um poder calorífico médio de (6,60 MJ/m³), com predominância de monóxido de carbono (19,02%), composição regular durante o teste, e melhor desempenho operacional entre as biomassas. As eficiência de conversão de massa e energia foram satisfatórias, sugerindo todos os resíduos estudados como sendo fonte de energia viável para o processo de gaseificação.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Jofran Luiz de, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2010.
Energetic potential of gasification of residues from coffee and eucalyptus production. Advisor: Jadir Nogueira da Silva. Co-advisors: Marcio Arêdes Martins and Delly Oliveira Filho.

This work presents data and studies related to the production of syngas from gasification of residues from coffee and wood production processes. Chemical composition data from residues were gathered and all showed great potential for energy production in Brazil, with energetic potential value superior to 15.5 PJ per year. Residues from wood process (in the form of chips) and residues of coffee production (in the form of husk and wood) were submitted to gasification process, in a downdraft commercial gasifier, being air as gasification agent. The syngas composition was monitored in a syngas analyser as the concentration v.b.(%) of CO, CO₂, CH₄ and H₂, and heating value (MJ/m³). It was also analyzed the data regarding gasification agent properties, temperature of reduction and combustion zones, gasifier pressure and fuel consumption rate, for each residue gasified. It was observed that each residue produced a syngas with different compositions, being the syngas from coffee husk with the highest heating value (7.76 MJ/m³) with predominance of methane (14.77%), and the syngas from coffee wood with the lowest heating value (5.45 MJ/m³) with predominance of carbon monoxide(14.03%). The gasification of eucalyptus chips showed an average heating value of (6.60 MJ/m³), with predominance of carbon monoxide (19.02%), regular chemical composition during test period and best operational performance among residues. The efficiency of mass and energy conversion was in accordance with others studies, suggesting all residues studied as viable energy sources for gasification processes.

INTRODUÇÃO GERAL

INTRODUÇÃO

Há pouco mais de 100 anos a energia da biomassa começou a perder sua liderança histórica para a energia do carvão mineral e, como consequência do crescimento contínuo do petróleo e do gás natural, a sua utilização reduziu-se praticamente às residências populares em regiões agrícolas (CORTEZ et al., 2006). Recentemente, o aumento mundial da demanda de energia, acarretou o aumento da dependência dos combustíveis fósseis, ocasionando uma urgente busca por uma solução sustentável. Nesse contexto, a biomassa tem sido uma alternativa eficiente e muito vislumbrada. O uso da biomassa proporciona menor emissão dos gases de efeito estufa quando comparado aos combustíveis fósseis, vantagem esta que legitima o interesse na disseminação dessa fonte energética, uma vez que a preocupação ambiental é um dos pilares da sustentabilidade tão almejada a nível mundial.

A Índia é a maior produtora mundial de sistemas solares em habitações rurais e gaseificação da biomassa. Este país tem desenvolvido sistemas de gaseificação de biomassa em pequena escala para geração de eletricidade em áreas rurais com até 70 MW de potência. Atualmente, a biomassa contribui para satisfazer 70% das necessidades energéticas básicas das zonas rurais que representam quase 70% da população da Índia (LIMING, 2009).

O Reino Unido tem uma significativa fonte de biomassa, estimada em 20 milhões de toneladas anuais, porém apenas uma fração desta é utilizada efetivamente para produção de energia, o que corresponde a uma contribuição de aproximadamente 4,1% da produção de calor e eletricidade no país (TAYLOR, 2008).

A biomassa contribuiu com aproximadamente 14% da demanda de energia mundial em 1991, equivalente a cerca de 25 milhões de barris de petróleo por dia (mbep/dia) (= 55EJ). Esta é a mais importante (35%) fonte de energia nos países em desenvolvimento, mas também desempenha um papel importante num certo número de países industrializados, por exemplo, nos E.U.A. a energia da biomassa representava 4% (1 mbep/dia) da matriz energética em 1991, e na Suécia cerca de 14%, nesse mesmo ano (HALL, 1991).

No Brasil a oferta interna de energia em 2006 foi de 226 milhões de tep (toneladas equivalentes de petróleo) ou 1,12 tep por habitante. As fontes renováveis de energia foram responsáveis por 45,1% deste montante, onde 14,8% provieram de fontes

hidrotermais e 27,2% a partir da biomassa. O total da potência instalada em 2008 foi 96,63 GW, da qual 4,74 GW correspondeu à utilização da energia da biomassa, isto é, apenas 4,9% (ANEEL, 2009).

Biomassa e biocombustíveis podem ser utilizados como substitutos dos combustíveis fósseis para gerar calor, energia elétrica e produtos químicos trazendo benefícios impulsionadores da sustentabilidade tais: desenvolvimento econômico regional, desenvolvimento social e agrícola, fornecimento regular de energia, redução no balanço de emissão de gases do efeito estufa e consequente mitigação do mesmo (DERMIBAS e DERMIBAS, 2007).

Por meio da conversão termoquímica de energia, a biomassa pode ser utilizada via três diferentes processos: gaseificação, pirólise e combustão direta, sendo a gaseificação um dos processos mais eficientes (PUROHIT, 2009).

A gaseificação é a conversão de qualquer combustível sólido, em um gás energético, por meio da oxidação parcial a temperaturas elevadas. Esse gás, chamado de gás de síntese, é constituído por uma mistura de monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂), metano (CH₄), pequenas quantidades de outros hidrocarbonetos leves, dióxido de carbono (CO₂) e vapor d'água (H₂O), além do nitrogênio (N₂) presente no ar e fornecido para a reação. Em função do processo obtém-se também quantidades variáveis de carvão, ácidos pirolenhosos (formado por ácido acético, ácido fórmico, alcatrão solúvel, metanol e água) e alcatrão insolúvel (CEMIG, 1986).

A formação de alcatrão é um dos maiores problemas a ser enfrentado durante a gaseificação de biomassa. Alcatrão condensa sob temperaturas reduzidas, polimerizando-se em equipamentos tais como motores e turbinas, prejudicando assim o funcionamento dos mesmos (DEVI et al, 2003).

A eficiência da conversão termoquímica da biomassa depende do material utilizado, tamanho e forma das partículas, vazão do gás, tipos de reatores, entre outros fatores. Em linhas gerais, os gaseificadores podem ser classificados com base na direção do fluxo dos gases: concorrente, contra-corrente, fluxo cruzado, e leito fluidizado. Para a utilização do gás produzido em motores e turbinas, a configuração concorrente é o mais adequado devido a relativa menor produção de alcatrão (SHARMA, 2009).

A gaseificação vem atraindo a atenção mundial em virtude das variadas utilidades e benefícios. Os resíduos, que atualmente são um problema mundial, principalmente em países industrializados, podem ser aproveitados de forma sustentável através da gaseificação. Em uma perspectiva econômica e ambiental, a produção de

hidrogênio e etanol a partir de resíduos plásticos é uma tecnologia promissora que vem obtendo bons resultados. (Czernik e French, 2006)

A geração de eletricidade a partir da gaseificação tem sido utilizada em várias partes do mundo, tanto para a redução de emissão de gases do efeito estufa, quanto para prover eletricidade em áreas rurais. Na Índia, mais de 3000 vilas e aldeias remotas e inacessíveis têm sido beneficiadas com o serviço de eletricidade básica através da distribuição de sistemas de geração de eletricidade a partir de fontes renováveis. A China tem planos para eletrificar 10.000 aldeias e 3,5 milhões de famílias rurais com as energias renováveis até 2010 (LIMING, 2009).

Pesquisas e desenvolvimento de tecnologias de gaseificação da biomassa têm sido incentivados mundialmente, devido à abundância de matéria prima e vasto potencial para aproveitamento energético. Neste sentido, esta dissertação busca divulgar o conceito de energia renovável a partir do processo de gaseificação de biomassa, caracterizando os resíduos da cafeicultura e da produção de eucalipto, e determinando o potencial energético do gás produzido durante a gaseificação destes resíduos.

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos:

O Capítulo 1 apresenta uma revisão sobre a tecnologia da gaseificação de biomassa. Este capítulo busca rever os conceitos da gaseificação, mostrando o histórico da tecnologia, destacando trabalhos realizados mundialmente e apontando as tendências para a consolidação do processo da gaseificação.

O Capítulo 2 faz a introdução sobre o estudo das biomassas, relacionando o mercado agrícola ao mercado energético. As biomassas foram analisadas e caracterizadas quanto à composição química, para determinação do potencial energético de cada resíduo.

O Capítulo 3 traz o potencial energético das biomassas gaseificadas. Este capítulo mostra detalhadamente o processo de gaseificação das biomassas e a determinação da composição química e do poder calorífico do gás produzido.

A conclusão geral deste trabalho engloba todos os aspectos discutidos neste trabalho, sugerindo pontos a serem abordados em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL, Banco de Informações de Geração/Combustíveis, Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 30/11/2009.
- CEMIG - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, Superintendência de Desenvolvimento Energético e Mercado, Departamento de Desenvolvimento Energético 1986. **Gaseificação de biomassa**, p.111. Belo Horizonte.
- CORTEZ L. A. B., LORA E. S., AYARZA J. A. C. 2006. **Biomassa para Energia**. Ed. Unicamp. 736p.
- CZERNIK S., FRENCH R. J. 2006. Production of Hydrogen from Plastics by Pyrolysis and Catalytic Steam Reform. **Energy Fuel**, v.20, p.754-758.
- DERMIBAS A. H., DERMIBAS I. 2007. Importance of rural bioenergy for developing countries. **Energy Conversion and Management**, v.48, p. 2386-2398.
- DEVI L., PTASINSKI K. J., JANSSEN F. J. J. G. 2003. A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. **Biomass and Bioenergy**, v.24, p.125-140.
- HALL D. O. 1991. Biomass energy. **Energy Policy**, v.19, p.711-737.
- LIMING H. 2009. Financing rural renewable energy: A comparison between China and India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.13, p.1096-1103.
- PUROHIT P. 2009. Economic potential of biomass gasification projects under clean development mechanism in India. **Journal of Cleaner Production**, v.17, p.181-193.
- SHARMA A. K. 2009. Experimental study on 75 kW_{th} downdraft (biomass) gasifier system. **Renewable Energy**, v.34, p.1726-1733.
- TAYLOR G. 2008. Bioenergy for heat and electricity in the UK: A research atlas and roadmap. **Energy Policy**, v.36, p.4383-4389.

Capítulo 1.

TECNOLOGIAS DA GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA: UMA REVISÃO

1.1 HISTÓRICO DA GASEIFICAÇÃO

A história mostra claramente que nossos antepassados faziam uso do fogo por meio da biomassa existente, para atividades de caça, proteção contra o frio e mais tarde para a cocção de alimentos. A evolução conduziu esses indivíduos a usar tal processo em outras atividades, como na produção de energia para a indústria cerâmica e metalúrgica. Gradativamente, as técnicas para a conversão de biomassa em biocombustível ou em energia térmica por meio da combustão direta foram desenvolvidas e modernizadas em processos que hoje são úteis e eficientes. Os primeiros trabalhos com gaseificação datam de 1669, realizados por Thomas Shirley, e com o aperfeiçoamento do processo, surgem os primeiros resultados publicados. (SIEMENS, 1889; WYER, 1907; DOWSON e LARTER, 1907; ALLEN, 1908; GOLDMAN e JONES, 1939).

Durante as duas grandes guerras mundiais, os trabalhos e pesquisas relacionadas à conversão térmica utilizando a biomassa foram estimulados devido à escassez do petróleo. Porém, logo após este período, os trabalhos envolvendo o processo da gaseificação foram esquecidos por um tempo, devido ao baixo preço dos combustíveis fósseis. Atualmente, com a diminuição das fontes de petróleo e gás natural, junto ao aumento acelerado dos custos dos combustíveis fósseis e preocupação mundial com a emissão de gases poluentes, a atividade de pesquisa em conversões termoquímicas de biomassa tem sido estimulada.

1.2 O PROCESSO DA GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA

O processo de gaseificação consiste na conversão termoquímica de materiais carbonáceos em combustível gasoso rico em CO e H₂. Apresentar uma teoria válida para descrever todo o processo de gaseificação, em geral, é muito complexo devido à variedade de matéria prima disponível. No entanto, o fenômeno da pirólise seguida da volatilização do carbono remanescente é predominante em todos os processos de gaseificação, o que leva os autores a desenvolver uma teoria para a gaseificação baseada no modelo mais simples do carbono puro, discutindo a influência de características específicas das biomassas separadamente (HIGMAN e Van der BURGT, 2008; REED e DAS, 1988).

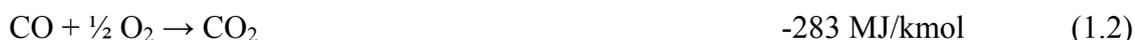
Na discussão do mecanismo de qualquer reação química, é necessário examinar a termodinâmica, ou seja, o estado em que o processo será conduzido sob condições específicas de pressão e temperatura, a cinética do processo, que apresenta o tempo da reação, e a rota adotada.

Reações químicas

O processo de gaseificação acontece na faixa de temperatura entre 800 e 1800 °C, sendo esta temperatura influenciada pelas características do combustível utilizado. As principais reações químicas decorrentes do processo de gaseificação são as que envolvem carbono, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio, metano e água (HIGMAN e Van der BURGT, 2008).

Combustão

A combustão é uma reação química exotérmica, ou seja, libera calor para o ambiente, e ocorre na presença de oxigênio. A liberação de calor é crucial para que as reações subsequentes sejam realizadas com êxito.



Reação de Boudouard

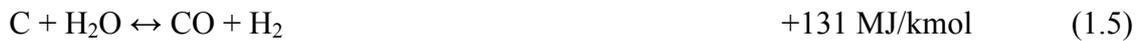
A reação de Boudouard é possivelmente a reação mais importante no processo de gaseificação de biomassa. É uma reação heterogênea de redução-oxidação (redox) de uma mistura de monóxido de carbono e dióxido de carbono a uma determinada temperatura. Nesta, ocorre a desproporcionalização do monóxido de carbono em dióxido de carbono e carbono, e vice-versa.

A reação de Boudouard implica que, sob baixas temperaturas, o equilíbrio é deslocado para a reação exotérmica de formação de dióxido de carbono, e sob altas temperaturas, a formação endotérmica de monóxido de carbono é o produto dominante.



Reação de gás de água ou carbono-vapor

É uma reação química endotérmica e heterogênea, na qual o carbono reage com o vapor de água para formar monóxido de carbono e hidrogênio.



Reação de formação de metano

É uma reação química exotérmica e heterogênea, onde o carbono reage com o hidrogênio para a formação do metano.



Reações Homogêneas de Conversão água/gás

Em geral, está-se preocupado com situações onde a conversão do carbono é praticamente completa. Desta forma pode-se reduzir as reações heterogêneas 1.4, 1.5 e 1.6:



Esta é uma reação exotérmica, onde o monóxido de carbono reage com o vapor de água para formar dióxido de carbono e hidrogênio.



O metano reage com o vapor de água para formação de monóxido de carbono e hidrogênio, sendo esta uma reação endotérmica.

Reações em materiais diversos

Para combustíveis reais, os quais também contêm hidrogênio, a reação completa pode ser descrita pela equação 1.9.



1.3 ESTEQUIOMETRIA PARA COMBUSTÃO E GASEIFICAÇÃO

Para a combustão completa de 1 kg de biomassa ($\text{CH}_{1,4}\text{O}_{0,6}$) é necessário 6,5 kg de ar (N_2 -78%, O_2 -21%, CO_2 -0,03%). Esta é chamada razão estequiométrica. Na prática, processos que envolvem combustão asseguram excesso de ar, com o objetivo de forçar a combustão completa mesmo em casos de deficiência na mistura, e manter o baixo nível de emissão de CO.

Para reações de gaseificação utiliza-se a razão de equivalência, ou seja, uma fração da quantidade estequiométrica de ar aplicado. Melhores resultados são obtidos com razões de equivalência de aproximadamente 0,25. Razões inferiores são indicativos de predominância de pirólise, com produção de um gás mais rico, porém com mais alcatrão. Razões superiores a 0,25 são indicativos de combustão excessiva, com produção de um gás mais fraco (REED e DAS, 1988).

O processo de gaseificação basicamente divide o processo de combustão em duas partes.

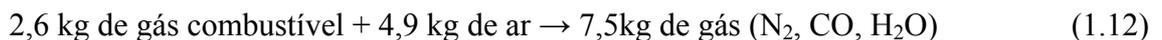
A combustão da biomassa:



Adotando um processo de gaseificação com razão de equivalência igual a 0,25 tem-se:



Para realizar a combustão deste gás é necessário:



Pode-se observar que o valor final do produto da combustão do gás combustível é idêntico ao valor final do produto da combustão da biomassa.

Considerando que uma biomassa apresenta em média 80% de voláteis e 20% de carbono fixo, em 1 kg de biomassa tem-se 0,8 kg de material volátil, o qual originará os vapores condensáveis, comumente conhecidos como alcatrão. Carbono puro apresenta uma razão estequiométrica de 12,7, o que significa que são necessários 2,5 kg de ar para combustão. Portanto, para a combustão do material volátil será necessário uma quantidade de 4 kg de ar (6,5 kg de ar para combustão da biomassa – 2,5 kg de ar para combustão do carbono fixo), ou seja, aproximadamente 60% do ar disponível.

Considerando a fórmula para vapor de alcatrão sendo $\text{CH}_{1,2}\text{O}_{0,5}$, a combustão parcial destes gases pode ser aproximadamente representada pela reação abaixo (REED e DAS, 1988):



A razão O_2 /vapor de alcatrão dependerá da exata composição do vapor e das condições de operação do gaseificador. Gaseificadores concorrentes produzem geralmente combustíveis com baixo teor de alcatrão, em torno de 1%, o que os tornam uma excelente escolha como fonte de energia para motores.

1.4 DESAFIOS DO PROCESSO

O processo de gaseificação, apesar de antigo, ainda necessita de desenvolvimento visando minimizar perdas da eficiência energética decorrentes da formação de alcatrão, umidade da biomassa, e consumo em equipamentos secundários.

1.4.1 Formação de alcatrão

A formação de alcatrão é um dos maiores problemas a ser enfrentado durante a gaseificação de biomassas. O alcatrão condensa sob temperaturas reduzidas, polimerizando-se nos equipamentos tais como motores e turbinas. As tecnologias de remoção de alcatrão podem ser divididas em duas categorias: limpeza do gás aquecido após a gaseificação (método secundário), e tratamentos internos no gaseificador (método primário). Apesar dos métodos secundários terem provado eficácia, os métodos primários têm chamado bastante atenção, uma vez que eliminam a necessidade de limpeza do gás. No tratamento primário, o gaseificador é otimizado para produzir um gás combustível com a mínima concentração de alcatrão possível. Os métodos primários podem ser descritos tais:

- a – seleção específica dos parâmetros operacionais.
- b – uso de catalisadores no leito.
- c – otimização do projeto do gaseificador.

Os parâmetros operacionais como temperatura, agente gaseificador, razão de equivalência, e tempo de residência são de extrema importância para a formação e decomposição do alcatrão. Existe um potencial para o uso de aditivos no leito como dolomita, olivina e carvão. Catalisadores a base de níquel são reportados por serem

muito eficazes, não apenas para redução de alcatrão, mas também para a diminuição da quantidade de compostos nitrogenados como amônia. O conceito de gaseificação em dois estágios e injeção de ar secundário no gaseificador é de grande importância para a evolução da tecnologia (DEVI et al., 2003). Li e Suzuki (2009) apresentaram uma revisão sobre propriedades físicas e químicas do alcatrão, indicando que o controle e a conversão do alcatrão é uma questão chave para uma aplicação bem sucedida do gás derivado da biomassa. Sun et al. (2009) realizaram uma pesquisa experimental sobre a gaseificação de casca de arroz com ar circulante, e um dos parâmetros estudados foi o efeito do ar secundário na quantidade de alcatrão do gás de síntese. Os resultados obtidos mostraram que a quantidade de alcatrão é principalmente uma função da temperatura de gaseificação, decrescendo quando a temperatura no gaseificador está aumentando. Skoulou et al. (2009) analisaram as características do processo e o produto da gaseificação das amêndoas da oliva com vapor a alta temperatura. Amêndoas de oliva contêm metais como o Fe, e esse metal apresenta um efeito catalisador na destruição do alcatrão dentro do gaseificador devido às reações produzidas com o vapor a alta temperatura. O poder calorífico do alcatrão produzido ($25,5 \text{ MJ kg}^{-1}$) indicou que este poderia ser reciclado para uma produção complementar de energia.

1.4.2 Umidade da biomassa

A necessidade de secar a biomassa antes de submetê-la à gaseificação pode ocasionar um grande custo capital e energético em pequenas e médias plantas de gaseificação de biomassa para produção de calor e eletricidade. Brammer e Bridgwater (2002) estudaram a influência da umidade antes e após a secagem, no desempenho e custo de um sistema gaseificador-motor para geração combinada de calor e eletricidade, e demonstraram que a presença de umidade excessiva na biomassa prejudica a qualidade do gás produzido e o desempenho geral do sistema, uma vez que grande parte da energia do sistema é gasta durante a evaporação da água contida na biomassa.

1.4.3 Equipamentos secundários

O maior impedimento atualmente para gaseificação de biomassa para produção de energia encontra-se no alto custo dos equipamentos secundários, acarretando o encarecimento do processo de obtenção de um gás limpo, livre de contaminantes. Sistemas auxiliares são operações adicionais ao processo de gaseificação e geralmente

se apresentam em duas categorias: preparação e alimentação do combustível no gaseificador, e sistema de limpeza do gás. Cummer e Brown (2002) coletaram informações sobre os sistemas auxiliares, proporcionando um melhor entendimento de todo o processo de gaseificação.

1.5 APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA DA GASEIFICAÇÃO

Atualmente estão em andamento vários projetos visando o desenvolvimento de sistemas sustentáveis, com uso do processo de gaseificação para geração das diversas formas de energia, utilizando a biomassa como combustível.

1.5.1 Geração de energia elétrica

A técnica para geração de energia elétrica a partir da gaseificação da biomassa vem sendo utilizada mundialmente. Assim, consideráveis pesquisas têm sido conduzidas nos últimos vinte anos no intuito de avançar as técnicas do processo e adaptá-las para aplicações com diversas fontes de biomassa.

Bridgwater (1995) apresentou uma revisão dos custos e tecnologias envolvidas em um sistema integrado para produção de eletricidade a partir de biomassas diversas e madeira em particular, considerando todos os elementos necessários como manejo, preparo, processo e limpeza do gás. Os resultados apontam um estágio de desenvolvimento avançado do processo de gaseificação de biomassa, justificando a implementação do conceito GICC Geração Integrada com Ciclo Combinado (IGCC - Integrated Generation with Combined Cycle).

A integração de ciclos evaporativos de turbinas a gás (Evaporative gas turbine cycle – EvGT) com a gaseificação de biomassa é uma tecnologia interessante que indica ser capaz de sustentar uma grande demanda no futuro. Steinwall (1997) desenvolveu e avaliou sistemas EvGT, e mostrou que é termodinamicamente viável esta integração, com eficiência elétrica entre 38 e 45% . A eficiência total para os sistemas modelados variaram de 84 a 92% para sistema de cogeração.

Beenackers (1999) apresentou uma revisão sobre as tecnologias mais utilizadas para gaseificação de biomassa na Europa no final da década de 90, indicando especial interesse na combinação de geração de calor e eletricidade.

Kersten et al. (2003) descreveram um sistema de gaseificação em multi-fase com um reator de leito fluidizado circulante. Os benefícios deste conceito, no qual diferentes

processos são realizados separadamente em segmentos de um mesmo reator, tem sido demonstrado para biomassas específicas, mostrando-se possível criar zonas de oxidação nos quais o O_2 reage exclusivamente com o carbono, ocasionando uma melhor conversão e conseqüentemente maior eficiência.

Leung et al. (2004) revisaram o desenvolvimento tecnológico da gaseificação de biomassa para uma variedade de aplicações na China, e discutiram seus panoramas. Os autores entenderam que a gaseificação de biomassa com finalidade de geração de energia elétrica é muito promissora e possui grande potencial em pesquisas e desenvolvimento na China.

Henriksen et al. (2006) realizaram um estudo em um gaseificador de dois estágios com potência de 75kW. Este operou por mais de 2.000 horas automaticamente dia e noite, sendo necessário apenas ajuste no sistema de alimentação. O motor operou satisfatoriamente com o gás produzido, não se observando depósitos sólidos após o experimento. O sistema de limpeza do gás através de filtro de mangas ocorreu de forma excelente, sendo que pequenas quantidades de depósitos sólidos contendo sais e carbonatos foram observados no trocador de calor.

A limpeza do gás é a parte do processo considerada menos desenvolvida, onde se concentra os principais problemas. Brown et al. (2007) realizaram um estudo termo-econômico de uma planta industrial de gaseificação de madeira com capacidade de 20 MW, contemplando limpeza do gás e conversão energética. Foram testados dois conjuntos: motor de combustão interna MCI e turbina a gás TG. As condições de operação que maximizam a eficiência do MCI favoreceram a formação mínima de alcatrão. Para o conjunto TG a concentração de alcatrão se mostrou maior, porém não devendo ser considerado um problema, uma vez que a limpeza do gás quente pode prevenir de modo eficaz a condensação do alcatrão. Em gaseificação com ar como agente oxidante, os menores custos foram apresentados pelo conjunto TG com 2,5€/We, e 3,1€/We para o conjunto MCI.

López et al. (2008) reportaram questões relacionadas a utilização de biomassa para geração de energia elétrica, no aspecto específico de encontrar o melhor local para implementação de uma planta industrial com três tecnologias alternativas (motor a gás, turbina a gás e célula combustível com microturbinas), levando em consideração variáveis como local de distribuição de biomassa, custo de transporte e distância da rede de distribuição de energia elétrica já existente.

Polyzakis et al. (2008) otimizaram uma usina termoeletrica de ciclo combinado (CCPP - Combined Cycle Power Plant), descrevendo e comparando quatro diferentes ciclos: ciclo simples, ciclo com resfriamento interno, ciclo reaquecido e ciclo com resfriamento interno e reaquecido. O sistema proposto foi capaz de gerar 300 MW de energia, do qual 200 MW proveniente da turbina a gás e 100 MW da turbina a vapor. Os resultados mostraram que o ciclo reaquecido com turbina a gás obteve melhor resultado, principalmente devido à alta temperatura do gás exaurido pela turbina, resultando numa alta eficiência térmica na turbina a vapor.

Berggren et al. (2008) investigaram o potencial energético da gaseificação de biomassa no sistema de geração de energia polonês. Os resultados mostraram um potencial para produção de energia elétrica complementar a partir da gaseificação de biomassa de 2,3 a 6,6 TWh, o que representa 1,6 a 4,6% da produção total de eletricidade da Polônia em 2010. Segundo os autores, o custo para implementação desta energia chega a ser menos de 20 euros por MWh, bem menor que o preço médio de 96 euros por MWh do sistema de geração de energia utilizado na Polônia em 2003.

Um dos mais bem sucedidos conceitos de gaseificação da biomassa foi aplicado na Áustria, na aldeia de Güssing, por meio de um gaseificador de leito fluidizado circulante com capacidade de produção de aproximadamente 2 MW de energia elétrica e 4,5 MW de energia térmica. Depois de limpo, o gás foi utilizado em um motor associado a uma caldeira, para produção combinada de calor e potência, associação esta também conhecida por cogeração (CHP - Combined Heat and Power). A biomassa foi gaseificada e a energia elétrica foi produzida no gerador acoplado ao motor de combustão interna. Antes da combustão, o gás passou por um sistema de tratamento constituído por ciclone, filtro e resfriamento (RENTIZELAS et al., 2009).

Sharma (2009) realizou um estudo experimental em um gaseificador de biomassa de fluxo concorrente com potência de 75 kWth. O autor verificou que o perfil de temperatura obtido experimentalmente aumentou à medida em que ocorria um acréscimo na taxa de fluxo de ar pelo leito do gaseificador. Os resultados também mostraram que a temperatura mais alta é mantida perto da zona de oxidação. A maior temperatura no leito aumentou de 1.388 °C para 1441 °C para um crescimento na vazão de massa de ar de 7 gs⁻¹ para 9 gs⁻¹.

No Brasil, o projeto GASEIFAMAZ “Comparação entre as tecnologias existentes para a gaseificação da biomassa” é uma parceria entre CENBIO (Centro Nacional de Biomassa), BUN (Biomass Users Network of Brazil), IPT (Instituto de

Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) e UA (Universidade do Amazonas). Esse projeto tem como objetivo principal avaliar a tecnologia indiana de gaseificação de leito fixo em pequena escala visando o fornecimento de energia elétrica em um modo sustentável para comunidades isoladas da região Amazônica. O sistema de gaseificação de 20 kW foi importado do Instituto Tecnológico da Índia, e com este foi obtido poder calorífico superior a $5,7 \text{ MJ/Nm}^3$, para um consumo de biomassa de 18 kg h^{-1} (LORA e ANDRADE, 2009).

1.5.2 Geração de calor

Silva et al. (2004) estudaram a viabilidade de um gaseificador/combustor utilizando eucalipto em pedaços, resíduos de serraria, cavacos de lenha e sabugo de milho como combustíveis na secagem de produtos agrícolas. Concluiu-se que o gaseificador, usando cavacos de eucalipto como combustível, consumiu entre 15,3 e $18,8 \text{ kg h}^{-1}$ de biomassa, sendo o equipamento técnica e economicamente viável para a secagem de café despulpado e para outros produtos agrícolas.

A utilização de reatores para gaseificação de biomassa, acoplados a combustores do gás é também uma alternativa energeticamente eficiente e funcional para aquecimento de galpões avícolas. A utilização do sistema de gaseificação se baseia na hipótese desta tecnologia poder apresentar ao avicultor redução no custo de produção, comparativamente aos sistemas tradicionais de aquecimento de galpões avícolas (ZANATTA et al., 2008).

1.5.3 Produção de etanol

A combustão parcial da biomassa lignocelulósica, através da gaseificação, quebra os polímeros complexos e a converte em gás de síntese. Uma alternativa sustentável para a produção de etanol é a fermentação do gás de síntese. As bactérias anaeróbicas *Clostridium ljunduhdi* e *Clostridium autoethanogenum* tem demonstrado produzir etanol e ácido acético a partir de CO, CO₂ e H₂ através do processo acetogênico.

Bredwell et al. (1999) revisaram os recentes progressos no desenvolvimento da fermentação do gás de síntese, com ênfase nos esforços para aumentar a eficiência da transferência da massa de gás, por meio de propriedades metabólicas de muitos microorganismos capazes de fermentar o gás síntese.

Younesi et al. (2005) realizaram experimentos em que o gás de síntese apresentava várias pressões iniciais, 0,08-0,18 MPa. A formação de acetato foi quase a mesma para todas as pressões iniciais. A máxima produção de acetato ($1,3 \text{ g l}^{-1}$) foi obtida quando a pressão total do gás de síntese foi igual a 0,14 MPa. No entanto, a máxima concentração de etanol, $0,6 \text{ g l}^{-1}$, ocorreu com a pressão total de gás síntese de 0,16 e 0,18 MPa.

Cotter et al. (2009) utilizaram um reator para fermentação do gás síntese e concluíram que as bactérias autótrofas *C. ljungdahlii* e *C. autoethanogenum* são capazes de produzir quantidades mensuráveis de etanol e significantes quantidades de acetato através desse processo.

1.5.4 Produção de hidrogênio

Existe um interesse crescente no processo de produção de hidrogênio a partir de matéria prima alternativa. Uma dessas fontes de alimentação para a produção de hidrogênio é o resíduo plástico, que quando utilizado no processo de gaseificação pode ter suas moléculas quebradas para produção de hidrogênio. (CZERNIK e FRENCH, 2006).

Um fator chave para maximizar a produção de hidrogênio a partir de resíduos plásticos através da gaseificação é a utilização de catalisadores, sendo que os catalisadores a base de níquel tem demonstrado ser eficaz para a redução do alcatrão e produção de hidrogênio, (SIMELL et al., 1997; SUTTON et al., 2001; SRINAKRUANG et al., 2005; El-RUB et al., 2008).

Wu et al. (2009) prepararam sete tipos de catalisadores em laboratório para investigar a produção de hidrogênio a partir da gaseificação de polipropileno em um reator de duas fases. Os resultados indicaram que o catalisador $\text{Ni/Al}_2\text{O}_3$ foi muito eficiente na produção de hidrogênio, e o catalisador $\text{Ni/CeO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ não apresentou alta habilidade catalítica.

Soni et al. (2009) estudaram a gaseificação de restos de carne e ossos para a produção de hidrogênio. Este processo seguido de craqueamento térmico de alcatrão foi realizado sob pressão atmosférica em duas etapas em um reator de leito fixo. Os resultados obtidos mostraram que esses resíduos podem ser eficazmente utilizados como uma fonte alternativa de combustíveis gasosos, bem como para a produção de

hidrogênio e gás de síntese. Temperaturas mais altas que 850°C foram encontradas, o que favorece a produção de hidrogênio no gás de síntese.

1.6 ESTUDO TERMODINÂMICO

Em processos com transformação de energia como combustão, gaseificação e pirólise, nas quais se utiliza combustíveis fósseis ou renováveis, a conservação da energia (Primeiro Princípio da Termodinâmica) assim como a qualidade desta energia (Segundo Princípio da Termodinâmica) são de grande importância.

Ruggiero e Manfrida (1999) descreveram um modelo de equilíbrio muito simples, que considera concentrações químicas geralmente atingidas pelo processo de gaseificação de biomassa e obtiveram sucesso quando compararam com dados experimentais.

Mathieu e Dubuisson (2002) apresentaram um modelo original de um processo de gaseificação de madeira. O modelo, baseado na minimização da energia livre de Gibbs, foi avaliado no simulador de processos Aspen Plus. Concluiu-se que para o gaseificador estudado existe uma temperatura crítica do ar, no qual acima desta o pré-aquecimento não mais é eficiente. Existe um fator de oxigênio ótimo, e o aumento de pressão trás pequeno aumento na eficiência do processo.

Prins et al. (2003) estudaram a conversão energética da biomassa em gás e carbono (grafite) via gaseificação com ar e/ou vapor. Perdas de energia e exergia (energia útil disponível) são analisadas por meio dos cálculos da composição da biomassa seca representada por $\text{CH}_{1,4}\text{O}_{0,59}\text{N}_{0,0017}$ em equilíbrio, variando a quantidade de ar/vapor. A análise é realizada para sistema adiabático, pressão atmosférica, com entrada de biomassa e ar a temperatura ambiente e vapor a pressão atmosférica e temperatura de 773°C. Apesar da gaseificação com vapor mostrar-se mais eficiente (87,6% VS 80,5%), esta diferença é esperada ser zero se as perdas de energia para a produção do vapor utilizado forem consideradas. A escolha pela utilização de vapor ou ar como meio de gaseificação mostra depender da composição do gás requerido. Para gaseificação com vapor, o gás produzido apresenta-se essencialmente como metano e dióxido de carbono, enquanto a gaseificação com ar produz principalmente nitrogênio, hidrogênio e monóxido de carbono.

O efeito da composição do combustível na eficiência termodinâmica de gaseificadores foi estudado por Prins et al. (2007). Um modelo de equilíbrio químico foi utilizado para descrever o gaseificador. Resultados mostraram que o modelo de equilíbrio apresentou maior eficiência em gaseificação possível alcançada por um dado combustível. Comparou-se a gaseificação de combustíveis com diferentes composições de matéria orgânica em termos de razões de O/C e H/C. Em gaseificação com temperatura de 927 °C recomenda-se um combustível com razão O/C menor que 0,4 o que corresponde a um PCI maior que 23 MJ/kg. Para a gaseificação a 1227 °C, combustível com razão O/C abaixo de 0,3 correspondente a um PCI maior que 26 MJ kg⁻¹ é recomendado.

Gungor (2009) investigou teoricamente a segunda lei da termodinâmica em transferência de calor em superfícies de reatores de leito fluidizado circulante (circulating fluidized beds - CFB) para definir os parâmetros que afetam a eficiência do sistema. Usando um modelo 2D desse tipo de gaseificador, o método prediz os aspectos fluidodinâmicos e da combustão, a eficiência da segunda lei e o valor de geração de entropia obtidos em diferentes alturas e razão de volume. Além disso, a influência da taxa de fluxo de água e do diâmetro do tubo na eficiência do segundo princípio foi investigada. Por meio dessa análise, as dimensões, as disposições e o tipo de transferência de calor das superfícies que atingiu o máximo de eficiência foram obtidos.

1.7 CONCLUSÕES

A partir das características apresentadas sobre o processo de gaseificação de biomassas diversas, bem como as tecnologias de conversão de energia mais importantes e pesquisadas mundialmente, pode-se inferir que a gaseificação da biomassa desempenha um papel de extrema importância para o desenvolvimento energético de forma sustentável. Apesar de boa eficiência, poucos estudos foram encontrados quanto à utilização do processo de gaseificação para aquecimento de instalações agropecuárias e secagem de produtos agrícolas. A tecnologia da gaseificação de biomassas traz benefícios como redução no balanço de emissão de gases do efeito estufa, desenvolvimento econômico regional, desenvolvimento social e agrícola e fornecimento regular de energia, o que a faz bastante promissora, principalmente em áreas com necessidade energética cada vez mais intensa.

Desta forma, a gaseificação da biomassa merece uma atenção maior, tanto como difusão tecnológica mundial, quanto para tema de pesquisas, para que assim haja avanços significativos desta tecnologia.

1.8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN H. 1908. **Modern power gas producer. Practise and applications.** New York, D. Van Nostrand Company, 350p.
- BEENACKERS A. A. C. M. 1999. Biomass gasification in moving beds, a review of European Technologies. **Renewable Energy**, v.16, p. 1180-1186.
- BERGGREN M., LJUNGGREN E., JOHNSON F. 2008. Biomass co-firing potentials for electricity generation in Poland-matching supply and co-firing opportunities. **Biomass and Bioenergy**, v.32, p. 865-879
- BRAMMER I. G, BRIDGWATER A. V. 2002. The influence of feedstock drying on the performance and economics of a biomass gasifier-engine CHP System. **Biomass and Bioenergy**, v.22, p. 271-281.
- BREDWELL M. D., SRIVASTAVA P., WORDEN R. M. 1999. Reactor Design Issues for Synthesis-Gas Fermentations. **Biotechnol. Prog.**, v.15, p.834-844.
- BRIDGWATER A. V. 1995. The technical and economic feasibility of biomass gasification for Power generation. **Fuel**, v.74, n5, p. 631-653.
- BROWN D., GASSNER M., FUCHINO T., MARECHAL F. 2007. Thermo-economic analysis for the optimal conceptual design of biomass gasification energy conversion systems. **Thermal Engineering**, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.06.021
- COTTER J. L., CHINN M. S., GRUNDEN A. M. 2009. Influence of process parameters on growth of *Clostridium ljungdahlii* and *Clostridium autoethanogenum* on synthesis gas. **Enzyme and Microbial Technology**, v.44, p. 281-288.
- CUMMER. K. R., BROWN R. C. 2002. Ancillary equipment for biomass gasification. **Biomass and Bioenergy**, v.23, p.113-128.
- CZERNIK S., FRENCH R. J. 2006. Production of Hydrogen from Plastics by Pyrolysis and Catalytic Steam Reform. **Energy Fuel**, v.20, p.754-758.
- DEVI L., PTASINSKI K. J., JANSSEN F. J. J. G. 2003. A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. **Biomass and Bioenergy**, v.24, p.125-140.
- DOWSON J. E., LARTER A. T. 1907. **Producer gas.** Longmans, Green, and Co. Second Edition, 328p.
- EL-RUB Z. A., BRAMER E. A., BREM G. 2008. Experimental comparison of biomass chars with other catalysts for tar reduction. **Fuel**, v.87, p.2243-2252.

- GOLDMAN B., JONES N. C. 1939. The modern portable gas producer. Theory, design, fuels, performance, utilization and economics. **Journal of the Institute of the Fuel** v.12 n63, p103-132.
- GUNGOR A. 2009. Second law analysis of heat transfer surfaces in circulating fluidized beds. **Applied Energy**, v.86, p. 1344-1353.
- HENRIKSEN U., AHRENFELDT J., JENSEN T. K., GOBEL B., BENTZEN J. D., HINDSGAUL C., SORENSEN L. H. 2006. The design, construction and operation of a 75 kW two-stage gasifier. **Energy**, v.31, p. 1542-1553.
- HIGMAN, C., VAN DER BURGT M. 2008. **Gasification**. Gulf Professional Publishing, Second Edition, 456p.
- KERSTEN S. R. A., PRINS W., DRIFT B., SWAAIJ W. P. M. 2003. Principles of a novel multistage circulating fluidized bed reactor for biomass gasification. **Chemical Engineering Science**, v.58, p. 725-731.
- LEUNG D. Y. C., YIN X. L., WU C. Z. 2004. A review on the development and commercialization of biomass gasification Technologies in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.8, p. 565-580.
- LI C., SUZUKI K. 2009. Tar property, analysis, reforming mechanism and model for biomass gasification—An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.13, p.594-604.
- LÓPEZ P. R., GONZÁLEZ M. G., REYES N. R., JURADO F. 2008. Optimization of biomass fuelled systems for distributed Power generation using Particle Swarm Optimization. **Electric Power Systems Research**, v.78, p. 1448-1455.
- LORA E. S., ANDRADE R. V. 2009. Biomass as energy source in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.13, p.777-788.
- MATHIEU P., DUBUISSON R. 2002. Performance of a biomass gasifier. **Energy Conversion and Management**, v.43, p. 1291-1299.
- POLYZAKIS A. L., KORONEOS C., XYDIS G. 2008. Optimum gas turbine cycle for combined cycle Power plant. **Energy Conversion and Management**, v.49, p. 551-563.
- PRINS M. J., PTANSINSKI K. J., JANSEN F. J. J. G. 2003. Thermodynamics of gas-char reactions: First and second Law analysis. **Chemical Engineering Science**, v.58, p.1003-1011.
- PRINS M. J., PTASINSKI K. J., JANSEN F. J. J. G. 2007. From coal to biomass gasification. Comparison of thermodynamic efficiency. **Energy** v32 1248-1259.

- REED T. B., DAS A. 1988. **Handbook of downdraft gasifier engine systems**. Golden, Colo. : Solar Technical Information Program, Solar Energy Research Institute, 140 p.
- RENTIZELAS A., KARELLAS S., KAKARAS E., TATSIPOULOS I. 2009. Comparative techno-economic analysis of ORC and gasification for bioenergy applications. **Energy Conversion and Management**, v.50, p.674-681.
- RUGGIERO M., MANFRIDA G. 1999. An equilibrium model for biomass gasification processes. **Renewable Energy**, v.16, p. 1106-1109.
- SHARMA A. K. 2009. Experimental study on 75 kW_{th} downdraft (biomass) gasifier system. **Renewable Energy**, v.34, p.1726-1733.
- SIEMENS C. W. 1889. **The scientific works of C. William Siemens, A collection of papers and discussions**. Vol I, London: John Murray, Albermale St. 614p.
- SILVA J. N., CARDOSO SOBRINHO J., SAIKI E. T. 2004. Utilização de biomassa na secagem de produtos agrícolas via gaseificação com combustão adjacente dos gases produzidos. **Engenharia Agrícola**, v.24, n.2, doi: 10.1590/S0100-69162004000200020 .
- SIMELL P. A., HEPOLA J. O., KRAUSE A. I. 1997. Effects of gasification gas components on tar and ammonia decomposition over hot gas cleanup catalysts. **Fuel**, v.76, p.1117-1127
- SKOULOU V., SWIDERSKI A., YANG W., ZABANIOTOU A. 2009. Process characteristics and products of olive kernel high temperature steam gasification (HTSG). **Bioresource Technology**, v. 100, p.2444-2451.
- SONI C. G., WANG Z., DALAI A. K., PUGSLEY T., FONSTAD T. 2009. Hydrogen production via gasification of meat and bone meal in two-stage fixed bed reactor system. **Fuel**, v.88, p. 920-925.
- SRINAKRUANG J., SATO K., VITIDSANT T., FUJIMOTO K. 2005. A highly efficient catalyst for tar gasification with steam. **Catalysis Communications**, v.6, p.437-440.
- STEINWALL P. H. 1997. Integration of Biomass Gasification and evaporative gas turbine cycles. **Energy Conversion and Management**, v.38, n.15-17, p. 1665-1670.
- SUN S., ZHAO Y., LING F., SU F. 2009. Experimental research on air staged cyclone gasification of rice husk. **Fuel Processing Technology**, v.90, p.465-471.
- SUTTON D., KELLEHER B., ROSS J. R. H. 2001. Review of literature on catalysts for biomass gasification. **Fuel Processing Technology**, v.73, p.155-173.

- WU C., WILLIAMS P. T. 2009. Hydrogen production by steam gasification of polypropylene with various nickel catalysts. **Applied Catalysis B: Environmental**, v.87, p.152-161.
- WYER S. S. 1907. **A Treatise on producer gas and gas producers**. Hill Publishing Company, 315p.
- YOUNESI H., NAJAFPOUR G., MOHAMED A. R. 2005. Ethanol and acetate production from synthesis gas via fermentation processes using anaerobic bacterium, *Clostridium ljungdahlii*. **Biochemical Engineering Journal**, v.27, p.110-119.
- ZANATTA F. L., SILVA J. N., TINÔCO I. F. F., OLIVEIRA FILHO D., MARTIN S. 2008. Avaliação do conforto térmico em aviário aquecido com gaseificador de biomassa. **Engenharia na Agricultura**, v. 16, p.270-284.

Capítulo 2

CARACTERIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA PRODUÇÃO MADEIREIRA E CAFEEIRA PARA FINS DE CONVERSÃO TERMOQUÍMICA VIA GASEIFICAÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

A agricultura e energia sempre estiveram vinculadas, sendo que o caráter e a intensidade deste vínculo vêm se transformando com o tempo. A agricultura sempre foi uma fonte de energia, e a energia é um insumo importante para produção agrícola moderna. Até o século XIX, os animais proviam quase toda energia para transporte e trabalho, e assim segue em muitas partes do mundo, com a agricultura produzindo o combustível necessário para alimentar estes animais. Há aproximadamente dois séculos, vinte por cento das terras agrícolas dos EUA eram utilizadas para alimentação de animais de trabalho (SEXTON et al., 2007).

No século XX, as ligações entre o mercado de produtos agrícolas e o mercado de produtos energéticos foram debilitadas à medida que os combustíveis fósseis adquiriram maior importância no setor de transporte. Ao mesmo tempo, se fortaleceram os vínculos no plano dos insumos ao aumentar cada vez mais a dependência da agricultura aos fertilizantes químicos derivados de combustíveis fósseis e das maquinarias movidas a Diesel. Da mesma forma, o armazenamento, a elaboração e a distribuição dos alimentos são atividades que requerem um grande consumo de energia. Portanto, o aumento dos custos de energia repercute de maneira direta e considerável na produção agrícola e no preço dos alimentos (FAO, 2008).

A maioria dos sistemas agrícolas produz grande quantidade de resíduos que oferecem amplo potencial energético, e geralmente em áreas com escassez de fontes convencionais de energia é que os resíduos agrícolas são utilizados, principalmente com objetivo de fornecimento de energia para preparação de alimentos em zonas rurais. O Brasil, devido à sua área territorial, apresenta grande potencial de recursos naturais, que pode gerar energia para minimizar a necessidade de suprimento de energia convencional. Apesar dos estudos sobre as energias eólica, solar e hidráulica, o desenvolvimento de processos eficientes para uso de resíduos são altamente necessários, principalmente devido ao crescimento das atividades agrícolas e florestais nas últimas décadas.

A disponibilidade de resíduos provenientes da indústria madeireira, carvoeira e do beneficiamento de produtos agrícolas como café e arroz é muito grande. Do total de resíduos gerados pelas atividades agrícolas e florestais, aproximadamente 65% vem da indústria madeireira (excluindo o uso direto da lenha para aquecimento). Somente na

indústria madeireira, a produção de serragem pode alcançar 16% do total em volume da madeira original. Na produção do café, aproximadamente 21% são transformados em resíduos sólidos, casca e pergaminho, que possuem poder calorífico de 17.500 kJkg^{-1} (MAGALHÃES et al., 2008).

Há grande questionamento sobre a utilização da palha de café como fonte de energia em processos termoquímicos, devido à rica fonte de potássio presente neste resíduo, o qual é agregado ao solo como fertilizante. Entretanto, sabe-se que o potássio estará presente nas cinzas produzidas, o que possibilitará seu aproveitamento agrícola com a aplicação na lavoura (MELO et al., 2005).

A cadeia produtiva do café produz ainda outro resíduo pouco explorado, a lenha do cafeeiro. De acordo com pesquisadores da Embrapa Café, um cafeeiro adulto pesa em média 15 kg (lenha seca), no entanto, aproximadamente 25% deste cafeeiro se torna resíduo sob a forma de lenha após a poda, a qual ocorre a cada 5 anos aproximadamente. Observa-se, desta forma, que a cadeia produtiva do café insere no mercado, fontes alternativas de energia, as quais podem ser aproveitadas para provimento da energia requerida pela própria cadeia.

Por outro lado, o processo de gaseificação ainda se limita quanto ao combustível sólido a ser gaseificado, uma vez que a abundância em biomassa implica em uma diversidade de materiais diferentes em propriedades e composições. A madeira verde pode conter até 50% de umidade, o que demanda muita energia para secagem, uma vez que o calor de vaporização da água nem sempre é fornecido pela combustão. A composição química da biomassa é mais uniforme. A determinação da composição química é necessária também para realização da estequiometria, ou seja, encontrar a quantidade de ar necessária para gaseificação da biomassa de forma mais eficiente.

Desta forma, neste trabalho objetiva-se caracterizar os resíduos da produção cafeeira (palha e lenha) e resíduos da produção de eucalipto (sob a forma de cavacos) com vistas ao seu uso para fins energéticos, realizando um levantamento do potencial bioenergético destes resíduos no Brasil.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

A massa específica e a caracterização química das biomassas foram realizadas respectivamente no Laboratório de Energias Alternativas do Departamento de Engenharia Agrícola e no Laboratório de Energia da Madeira do Departamento de Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. Foram

utilizados resíduos da produção madeireira sob a forma de cavacos de eucalipto (formato aproximado a um cubo de lados iguais a 2,2 cm e 0,3 cm de espessura aproximadamente), proveniente do Departamento de Engenharia Florestal, e resíduos da produção agrícola do café, sob a forma de palha (formato aproximado a uma semi-elipsóide oca, com maior dimensão igual a 0,9 cm e dimensão inferior igual a 0,5 cm aproximadamente) e lenha (formato aproximado a um cilindro com diâmetro igual a 2,3 cm e altura igual a 3,5 cm aproximadamente), proveniente do Departamento de Engenharia Agrícola.

2.3 Análise preliminar

A análise preliminar das biomassas citadas foi realizada de acordo com padronização da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), pela norma NBR 8112/83: umidade (U), teor de cinzas (CZ), teor de sólidos voláteis (SV) e carbono fixo (CF).

Umidade

O teor de umidade é determinado ao estabelecer a perda (em peso) de uma amostra quando aquecido sob condições controladas de temperatura. Para determinação do teor de umidade foram realizados os seguintes procedimentos:

Foram coletadas pequenas porções de amostras (cerca de 500 gramas), fazendo o conjunto total representativo pela amostras analisadas.

As amostras foram colocadas imediatamente em um recipiente fechado, no intuito de preservar a umidade do material. Em seguida, foram separadas três amostras de 50 gramas, as quais foram pesadas e seguiram para estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ até manter uma diferença entre pesagens inferior a 0,2%.

O teor de umidade foi então calculado pela razão entre a quantidade de água na amostra e o peso inicial da amostra.

Teor de Cinzas

O teor de cinzas é uma medida aproximada da quantidade de minerais e outros materiais inorgânicos, restante após a oxidação, do material a ser analisado.

As amostras, com aproximadamente 1 grama, são previamente secas em estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$, até manter a pesagem constante. Em seguida são levadas à mufla $650\pm 10^{\circ}\text{C}$ por seis horas. Após este procedimento as amostras são retiradas da mufla, resfriadas

em dessecador até atingir temperatura ambiente, e por diferença de peso é determinado o teor de cinzas.

Sólidos Voláteis

O percentual de material volátil determina a quantidade de produtos gasosos, sem presença de umidade, que é liberado da amostra analisada sob condições específicas.

As amostras, com aproximadamente 1 grama, são previamente secas em estufa a $103\pm 2^{\circ}\text{C}$, até manter a pesagem constante. Em seguida são levadas à mufla $950\pm 10^{\circ}\text{C}$ por nove minutos. Após este procedimento as amostras são retiradas da mufla, resfriadas em dessecador até atingir temperatura ambiente, e por diferença de peso é determinado o teor de sólidos voláteis.

Carbono Fixo

Carbono fixo é um valor calculado, que representa a quantidade de carbono quimicamente ligado a outro carbono. Este é resultante do somatório dos percentuais de umidade, cinzas e material volátil, subtraído de 100. Todos os percentuais devem estar na mesma base de referência da umidade (seca ou úmida).

2.4 Composição elementar e poder calorífico

Para determinação da composição elementar (Carbono-C, Hidrogênio-H e Oxigênio-O) e do poder calorífico superior (PCS) foi utilizada a metodologia proposta por Parikh et al. (2007) e Parikh et al. (2005), respectivamente, as quais descrevem as seguintes equações algébricas baseadas na análise preliminar de todo espectro de materiais sólidos lignocelulósicos.

$$C = 0,637 CF + 0,455 SV \quad (\%) \quad (2.1)$$

$$H = 0,052 CF + 0,062 SV \quad (\%) \quad (2.2)$$

$$O = 0,304 CF + 0,476 SV \quad (\%) \quad (2.3)$$

$$PCS = 0,3536 CF + 0,1559 SV - 0,0070 CZ \quad (\text{MJ kg}^{-1}) \quad (2.4)$$

As equações 3.1, 3.2 e 3.3 são válidas para materiais sólidos lignocelulósicos com valores de carbono fixo na faixa entre 4,7 a 38,4%, teor de sólidos voláteis entre 57,2 a 90,6% e teor de cinzas entre 0,12 a 77,7%, em base seca. A equação 3.4 é válida

para materiais sólidos lignocelulósicos com valores de carbono fixo na faixa entre 1,0 a 91,5%, teor de sólidos voláteis entre 0,92 a 90,6% e teor de cinzas entre 0,12 a 77,7%, em base seca. O erro médio absoluto destas correlações é 3,21%, 4,79%, 3,40% e 3,74% para os valores medidos de C, H, O e PCS respectivamente.

2.5 Massa específica da biomassa

A massa específica aparente da biomassa (ρ_{ap}) representa a quantidade de biomassa que ocupa uma unidade de volume, sendo esta determinada por meio de uma balança com um cilindro de capacidade de um litro, preenchida apenas com a biomassa, em três repetições, sendo os resultados expressos em kg m^{-3} .

2.6 Potencial energético dos resíduos no Brasil

O levantamento do potencial bioenergético das biomassas analisadas foi realizado a partir do levantamento da produção agrícola e florestal realizado pelo IBGE (IBGE, 2010).

A quantidade de resíduos foi calculada pelo percentual de material não aproveitável após a finalização do processo produtivo. A partir destes dados, foi realizado um levantamento do potencial energético para os resíduos da produção de eucalipto e do café no Brasil.

Segundo o IBGE 2010, a cultura do eucalipto representa aproximadamente 60% da produção madeireira do Brasil. Excluindo as madeiras com finalidade de lenha e carvão, cerca de 65% da produção de madeira em tora é caracterizado por resíduo gerado pela atividade da indústria (MAGALHÃES et al. 2008). Portanto, para estimar o potencial energético (PE) dos resíduos da produção madeireira foi utilizada a equação 2.5:

$$PE_{\text{Resíduos de eucalipto}} (\text{MJ}) = \text{PCS do eucalipto em cavaco} \times \text{massa de resíduos de eucalipto} \quad (2.5)$$

em que:

$$\text{Massa de resíduos de eucalipto} = \text{volume de eucalipto} \times 0,65 \times \text{massa específica aparente do eucalipto em cavaco} \quad (2.6)$$

$$\text{volume de eucalipto} = \text{volume da produção de madeira em tora} \times 0,60 \quad (2.7)$$

Na produção do café, aproximadamente 21% da massa de grãos é transformado em resíduo sólido, casca e pergaminho (MAGALHÃES et al. 2008), e 25% em massa dos pés de café colhidos, sendo cada pé de café com peso médio de 15 kg, é transformado em lenha, após a poda que é realizada a cada 5 anos. Portanto, para estimar o potencial energético (PE) dos resíduos da produção cafeeira foram utilizadas as seguintes metodologias.

Para o cálculo do potencial energético da palha do café:

$$PE_{\text{Palha de café}} \text{ (MJ)} = \text{PCS da palha de café} \times \text{massa de resíduos sob a forma de palha de café} \quad (2.8)$$

em que:

$$\text{massa de resíduos sob a forma de palha de café} = \text{quantidade produzida de café} \times 0,21 \quad (2.9)$$

Para o cálculo do potencial energético da lenha do cafeeiro:

$$PE_{\text{Lenha de cafeeiro}} \text{ (MJ)} = \text{PCS da lenha de cafeeiro} \times \text{massa de resíduos sob a forma de lenha de cafeeiro} \quad (2.10)$$

em que:

$$\text{quantidade de resíduos sob a forma de lenha de cafeeiro} = \text{quantidade de pés de café colhidos} \times 15 \text{ kg por pé de café} \times 0,25 \times 0,2 \text{ (referente a 1 poda a cada 5 anos)} \quad (2.11)$$

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃOS

2.3.1 Análise da biomassa

Na análise preliminar da palha do café, da lenha do cafeeiro e dos cavacos de eucalipto (Tabela 2.1) pôde-se observar uma pequena variação quanto ao teor de umidade, o que pode estar relacionado ao longo período de secagem ao sol de toda biomassa, aproximadamente dois meses. A umidade das biomassas esteve adequada para o processo de gaseificação, inferior a 30%, de acordo com o trabalho realizado por Brammer e Bridgwater (2002). Observou-se uma pequena discrepância quanto às demais análises entre as biomassas, no entanto todas se encontraram em uma faixa ótima para o processo de gaseificação (REED e DAS, 1988).

Tabela 2.1 - Análise imediata das biomassas estudadas, NBR 8112/83

Biomassas	Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)
Lenha de cafeeiro	9,61	85,73	0,94	13,33
Lenha de eucalipto	9,74	90,55	0,44	9,02
Palha de café	9,22	81,87	1,71	16,42

A umidade da biomassa afeta não somente a operação do gaseificador, mas também a qualidade do gás produzido pelo mesmo. A água retida na biomassa requer cerca de 2300 kJ kg⁻¹ para vaporizar, e 1.500 kJ kg⁻¹ para elevar sua temperatura a 700°C durante a pirólise. No entanto esta energia deve ser subtraída da energia fornecida pela zona de combustão. A queda da temperatura na zona de combustão faz com que a zona de pirólise funcione de forma inadequada, produzindo mais alcatrão do que poderia ser craqueado. Apesar de fisicamente possível gaseificar biomassas com alto teor de umidade, fazê-lo torna-se um processo economicamente inviável.

O material volátil se mistura com o ar e é oxidado na fase gasosa na zona de pirólise, enquanto o carbono fixo permanece sólido e segue para a zona de combustão. Os produtos da oxidação dos voláteis são então reduzidos a monóxido de carbono e hidrogênio ao passar pela zona de combustão onde se encontra o carbono fixo superaquecido.

Na maioria das biomassas, as cinzas são compostas por sais. Quando em grande quantidade, acima de 5%, as cinzas podem causar sérios prejuízos ao reator e a equipamentos secundários (sistema de limpeza, motores, turbinas) (REED e DAS, 1988), pois pode vitrificar-se.

A quantidade de calor produzido por unidade volumétrica também está relacionada à massa específica da biomassa, a qual pode ser observada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Massa específica das biomassas estudadas

Biomassas	Massa específica (kg m ⁻³)
Lenha de cafeeiro	416,7
Cavaco de eucalipto	179,8
Palha de café	138,8

Biomassa com menor massa específica requer maior cuidado quanto ao reabastecimento do gaseificador. Portanto, a gaseificação da palha de café deverá ser realizada com reabastecimento, à medida que o volume de biomassa no reator é consumido.

A partir dos dados da análise imediata, foram obtidos os valores referentes à composição elementar e poder calorífico dos resíduos, os quais podem ser observados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Composição elementar e poder calorífico dos resíduos

	C	H	O	PCS
	% (g g ⁻¹)	% (g g ⁻¹)	% (g g ⁻¹)	(MJ kg ⁻¹)
Lenha de cafeeiro	47,50	6,01	44,86	18,07
Lenha de eucalipto	46,94	6,08	45,84	17,30
Palha de café	47,71	5,93	43,96	18,56

Observa-se uma composição química similar das biomassas estudadas, e poder calorífico superior condizente com valores citados na literatura (HIGMAN e Van der BURGT, 2008). Apesar da pouca variação, observa-se na palha de café o maior PCS, 18,56 MJ kg⁻¹.

2.3.2 Potencial energético dos resíduos agrícolas no Brasil.

A produção brasileira legalizada de madeira em tora em 2008 reduziu 3,68% em relação a 2007, no entanto com uma produção de mais de 101 milhões de metros cúbicos, com a maior parte da produção concentrada nas regiões sul e sudeste, conforme a Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Quantidade produzida de madeira em tora no Brasil em 2008

Região	Quantidade (m ³)
Norte	3.012.045
Nordeste	12.281.842
Sudeste	38.765.444
Sul	45.085.745
Centro-Oeste	2.116.824
Brasil	101.261.900

Fonte: (IBGE, 2010).

Por outro lado, o Brasil teve uma produção recorde de café em 2008 (Tabela 2.5). Tendo produzido mais de 2 milhões e 700 mil toneladas, sendo o sudeste a principal região produtora.

Tabela 2.5 - Quantidade produzida de café no Brasil, em 2008

Região	Quantidade (t)
Norte	133.609
Nordeste	169.023
Sudeste	2.306.422
Sul	156.641
Centro-Oeste	31.232
Brasil	2.796.927

Fonte: (IBGE, 2010)

De acordo com o senso agropecuário realizado pelo IBGE em 2006, foram constatados mais de 3,6 bilhões de pés de café colhidos. Para este levantamento, o IBGE considerou apenas estabelecimentos com mais de 50 pés existentes (Tabela 2.6).

Tabela 2.6 - Quantidade de pés de café colhidos, em 2006

Região	Quantidade (und)
Norte	150.915.000
Nordeste	228.276.000
Sudeste	3.047.610.000
Sul	205.119.000
Centro-Oeste	22.696.000
Brasil	3.654.616.000

Fonte: (IBGE, 2010)

A partir dos dados produtivos de cada biomassa, de acordo com as equações 2.6, 2.9 e 2.11, pode-se quantificar a geração destes resíduos no Brasil e regiões (Tabela 2.7).

Tabela 2.7 - Quantidade produzida dos resíduos na produção de eucalipto e cafeeira, no Brasil em 2008

Região	Eucalipto (Gg)	Palha de café (Gg)	Lenha do cafeeiro (Gg)	Total (Gg)
Norte	211,2	28,1	113,2	352,5
Nordeste	861,2	35,5	171,2	1.067,9
Sudeste	2.718,3	484,3	2.285,7	5.488,4
Sul	3.161,5	32,9	153,8	3.348,2
Centro-Oeste	148,4	6,6	17,0	172,0
Brasil	7.100,7	587,4	2.741,0	10.429,0

Por ser uma região produtora de café e eucalipto, o sudeste aponta como a região com maior geração de resíduos, produzindo sozinha mais da metade da quantidade total destes resíduos produzidos no país (Figura 2.2).

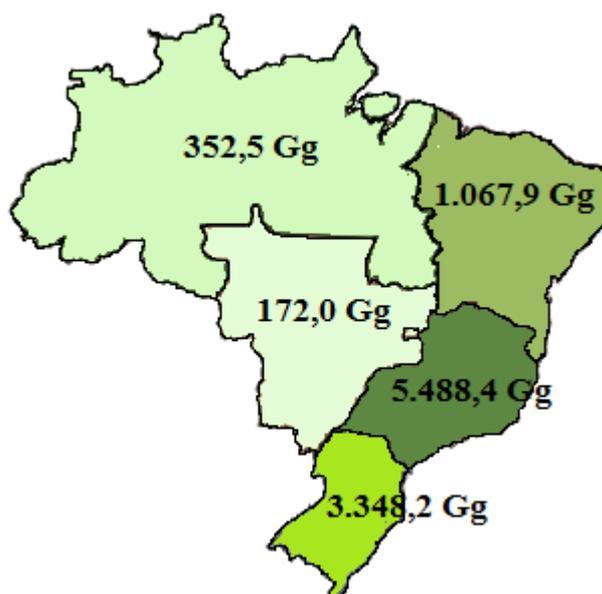


Figura 2.1 - Quantidade total de resíduos da produção madeireira (cavaco de eucalipto) e cafeeira (palha e lenha) no Brasil, em 2008. -

Da mesma forma, com os dados de geração de resíduos e com os valores do poder calorífico de cada resíduo pôde-se avaliar a quantidade de energia potencialmente disponível em cada região do Brasil (Tabela 2.8).

Tabela 2.8 - Quantidade de energia disponível nos resíduos da produção madeireira e cafeeira, no Brasil, em 2008

Região	Madeira (PJ)	Palha de café (PJ)	Lenha do cafeeiro (PJ)	Total (PJ)
Norte	3,7	0,5	2,0	6,2
Nordeste	14,9	0,7	3,1	18,7
Sudeste	47,0	9,0	41,3	97,3
Sul	54,7	0,6	2,8	58,1
Centro-Oeste	2,6	0,1	0,3	3,0
Brasil	122,8	10,9	49,5	183,3

As regiões Sudeste e Sul do Brasil são as regiões com maior quantidade de energia disponível a partir dos resíduos agrícolas estudados. Observa-se na Figura 2.3 que o Brasil possui grande potencial bioenergético, totalizando aproximadamente 183 PJ de energia disponível.

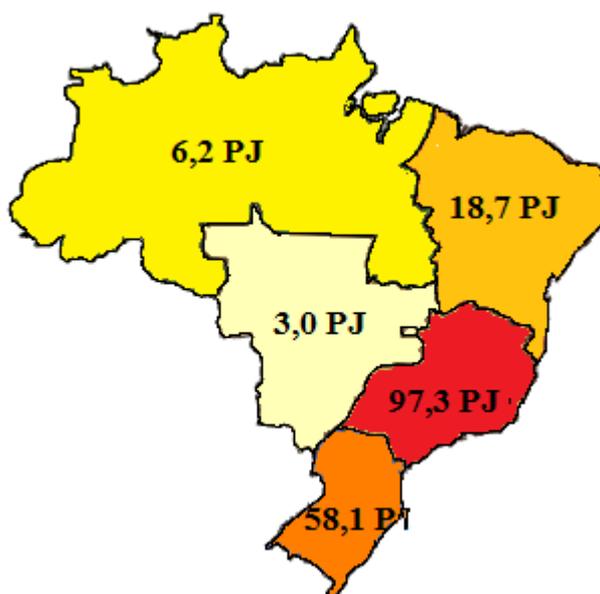


Figura 2.2 - Mapa do potencial energético dos resíduos da produção madeireira e cafeeira no Brasil.

Estes resíduos podem ser aproveitados para gerar energia térmica para a própria produção agrícola, como fontes de calor para secagem de grãos ou aquecimento de instalações animais, ou ainda podem ser utilizados como combustível para geração de energia mecânica ou elétrica, utilizando tecnologias de conversão termoquímica eficientes, como a gaseificação.

De acordo com a Tabela 2.9, a quantidade de energia disponível nos resíduos estudados corresponde a 11,7% do total da energia elétrica consumida no Brasil em 2007, não considerando a eficiência do processo de conversão energética a ser adotado.

Tabela 2.9 – Disponibilidade energética dos resíduos

Região	Consumo de energia elétrica	Disponibilidade energética dos resíduos	
	(GWh)	(GWh)	(%)
Norte	30.455,5	1.727,8	5,7
Nordeste	63.480,6	5.181,0	8,2
Sudeste e Centro-oeste	270.204,0	27.865,6	10,3
Sul	71.544,4	16.134,6	22,6
Brasil	435.684,5	50.909,0	11,7

Fonte: Aneel 2010

A região Sul do Brasil se destaca pela disponibilidade de 22,6% da sua demanda de energia elétrica, de recurso energético provenientes dos resíduos estudados.

2.4 CONCLUSÕES

As biomassas estudadas apresentam características químicas apropriadas para utilização como combustível sólido renovável, para a geração de energia.

Os resíduos gerados na produção madeireira e cafeeira possuem grande potencial para produção de energia no Brasil, podendo ser utilizado como um insumo do próprio setor produtivo. A região sudeste do Brasil destaca-se por ser a principal região produtora de café e eucalipto no país, com cerca de 53 % do potencial energético total destes resíduos no Brasil.

A gaseificação das biomassas em estudo pode ser vista como uma alternativa técnica e economicamente viável para a geração de energia em sistemas de produção ou até mesmo em locais remotos, onde o acesso à rede de distribuição elétrica ainda não está disponível.

2.5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8112/83 - Carvão Vegetal, Análise Imediata**. 6p.
- ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica. Atlas de energia elétrica no Brasil, disponível em: [http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par1_cap2 .pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par1_cap2.pdf). Acessado em 09 de Maio de 2010.
- BRAMMER I. G, BRIDGWATER A. V. 2002. The influence of feedstock drying on the performance and economics of a biomass gasifier-engine CHP System. **Biomass and Bioenergy**, v.22, p. 271-281.
- FAO – Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação, 2008. **El Estado Mundial de la Agricultura e la Alimentación**. Roma, Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação, 160p.
- HIGMAN, C., VAN DER BURGT M. 2008. **Gasification**. Gulf Professional Publishing, Second Edition, 456p.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, disponível em www.ibge.gov.br. Acessado em 15 de Janeiro de 2010.
- MAGALHÃES E. A., SILVA J. S., SILVA J. N., OLIVEIRA FILHO D., DONZELES S. M. L. 2008. Casca de café associada à lenha como combustível para aquecimento indireto do ar de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento – Especial Café**, v.10, p.66-72.
- MELO F. A. O., SILVA J. N., SILVA J. S., DONZELES S. M. L. 2005. Avaliação da utilização da palha de café para o aquecimento indireto de ar para a secagem de produtos agrícolas. **Engenharia na Agricultura**, v. 13, n.1, p. 49-50.
- PARIKH L, CHANNIWALA S. A., GHOSAL G. K. 2005. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, V.84, p. 487-494.
- PARIKH L, CHANNIWALA S. A., GHOSAL G. K. 2007. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. **Fuel**, V.86, p. 1710-1719.
- REED T. B., DAS A. 1988. **Handbook of downdraft gasifier engine systems**. Golden, Colo. : Solar Technical Information Program, Solar Energy Research Institute, 140 p.
- SEXTON, S., RAJAGOPAL, D., ZILBERMAN, D. Y ROLAND-HOLST, D. 2007. The intersections of energy and agriculture: implications of rising demand for biofuels and the search for the next generation. **Agricultural and Resources Economics Update**, 10(5): 4–7.

Capítulo 3

GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS DA PRODUÇÃO MADEIREIRA E CAFEEIRA

3.1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos países que possui os programas mais avançados para aproveitamento da energia da biomassa, e a tecnologia da gaseificação apresenta variadas aplicações, devendo constituir a base da disseminação do uso da bioenergia (LORA e ANDRADE, 2009).

A gaseificação consiste na conversão termoquímica de materiais carbonáceos em combustível gasoso rico em CO e H₂, por meio da oxidação parcial, em reatores sob elevada temperatura. (HIGMAN e Van der BURGT, 2008; REED e DAS, 1988).

A gaseificação de biomassas vem atraindo a atenção mundial em virtude das variadas utilidades e benefícios. Os resíduos, que atualmente são um problema mundial, principalmente em países industrializados, podem ser aproveitados de forma sustentável através da gaseificação (Czernik e French, 2006).

O processo de gaseificação geralmente acontece na faixa de temperatura entre 800 e 1800 °C, sendo esta temperatura influenciada pelas características do combustível utilizado. As principais reações químicas decorrentes do processo de gaseificação são as que envolvem carbono, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrogênio, metano e água (HIGMAN e Van der BURGT, 2008).

Combustão

A combustão é uma reação química exotérmica, ou seja, libera calor para o ambiente, e ocorre na presença de oxigênio. A liberação de calor é crucial para que as reações subseqüentes sejam realizadas com êxito.



Reação de Boudouard

A reação de Boudouard é possivelmente a reação mais importante no processo de gaseificação de biomassa. É uma reação heterogênea de redução-oxidação (redox) de uma mistura de monóxido de carbono e dióxido de carbono a uma determinada

temperatura. Nesta, ocorre a desproporcionalização do monóxido de carbono em dióxido de carbono e carbono, e vice-versa.

A reação de Boudouard implica que, sob baixas temperaturas, o equilíbrio é deslocado para a reação exotérmica de formação de dióxido de carbono, e sob altas temperaturas, a formação endotérmica de monóxido de carbono é o produto dominante.



Reação de gás de água ou carbono-vapor

É uma reação química endotérmica e heterogênea, na qual o carbono reage com o vapor de água para formar monóxido de carbono e hidrogênio.



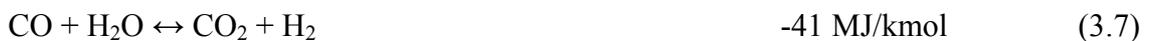
Reação de formação de metano

É uma reação química exotérmica e heterogênea, onde o carbono reage com o hidrogênio para a formação do metano.



Reações homogêneas de conversão água/gás

Em geral, está-se preocupado com situações onde a conversão do carbono é praticamente completa. Desta forma pode-se reduzir as reações heterogêneas 1.4, 1.5 e 1.6:



Esta é uma reação exotérmica, onde o monóxido de carbono reage com o vapor de água para formar dióxido de carbono e hidrogênio.



O metano reage com o vapor de água para formação de monóxido de carbono e hidrogênio, sendo esta uma reação endotérmica.

Reações em materiais diversos

Para combustíveis reais, os quais também contêm hidrogênio, a reação completa pode ser descrita pela equação 3.9.



Razão estequiométrica e razão de equivalência

Para a combustão completa de 1 kg de biomassa ($CH_{1,4}O_{0,6}$) é necessário 6,5 kg de ar (N_2 -78%, O_2 -21%, CO_2 -0,03%). Esta é chamada razão estequiométrica. Na prática, processos que envolvem combustão asseguram excesso de ar, com o objetivo de forçar a combustão completa mesmo em casos de deficiência na mistura, e manter o baixo nível de emissão de CO.

Para reações de gaseificação utiliza-se a razão de equivalência, ou seja, uma fração da quantidade estequiométrica de ar aplicado. Melhores resultados são obtidos com razões de equivalência de aproximadamente 0,25. Razões inferiores são indicativos de predominância de pirólise, com produção de um gás mais rico, porém com mais alcatrão. Razões superiores a 0,25 são indicativos de combustão excessiva, com produção de um gás mais fraco (REED e DAS, 1988).

O processo de gaseificação basicamente divide o processo de combustão em duas partes.

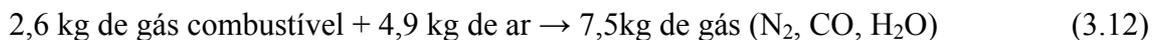
A combustão da biomassa:



Adotando um processo de gaseificação com razão de equivalência igual a 0,25 tem-se:



Para realizar a combustão deste gás é necessário:



Pode-se observar que o valor final do produto da combustão do gás combustível é idêntico ao valor final do produto da combustão da biomassa.

Considerando que uma biomassa apresenta em média 80% de voláteis e 20% de carbono fixo, em 1 kg de biomassa tem-se 0,8 kg de material volátil, o qual originará os vapores condensáveis, comumente conhecidos como alcatrão. Carbono puro apresenta uma razão estequiométrica de 12,7, o que significa que são necessários 2,5 kg de ar para combustão. Portanto, para a combustão do material volátil será necessário uma

quantidade de 4 kg de ar (6,5 kg de ar para combustão da biomassa – 2,5 kg de ar para combustão do carbono fixo), ou seja, aproximadamente 60% do ar disponível.

Considerando a fórmula para vapor de alcatrão sendo $\text{CH}_{1,2}\text{O}_{0,5}$, a combustão parcial destes gases pode ser aproximadamente representada pela reação abaixo (REED e DAS, 1988):



A razão O_2 /vapor de alcatrão dependerá da exata composição do vapor e das condições de operação do gaseificador. Gaseificadores concorrentes produzem geralmente combustíveis com baixo teor de alcatrão, em torno de 1%, o que os tornam uma excelente escolha como fonte de energia para motores.

O processo de gaseificação tem sido intensivamente estudado, apontando uma solução para o melhoramento da matriz energética local, e destino para resíduos diversos. Dentre as varias aplicações desta tecnologia, pode-se destacar: geração de energia elétrica a partir de um conjunto gaseificador/motor/gerador (BERGGREN et al., 2008; WANG et al., 2008), aquecimento de instalações agropecuárias (ZANATTA et al., 2008), secagem de produtos agrícolas (SILVA et al., 2004), produção de etanol (RAJAGOPALAN et al., 2002; YOUNESI et al., 2005) e síntese de produtos químicos e produção de hidrogênio (SONI et al., 2009; WU e WILLIAMS, 2009).

Este trabalho teve como objetivo realizar a caracterização (qualitativa e quantitativa) referente à gaseificação de resíduos da produção de eucalipto e café, em gaseificador comercial de pequena escala de fluxo concorrente, assim como realizar os balanços de massa e energia do processo. A caracterização qualitativa refere-se à composição do gás de síntese quanto à concentração de CO , H_2 , CH_4 , CO_2 , enquanto a caracterização quantitativa refere-se ao volume e poder calorífico do gás produzido e consumo de biomassa.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O processo de gaseificação foi realizado no Laboratório de Energia Alternativa, do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. Foram utilizados resíduos da produção madeireira sob a forma de cavacos de eucalipto (formato aproximado a um cubo de lados iguais a 2,2 cm e 0,3 cm de espessura aproximadamente), proveniente do Departamento de Engenharia Florestal, e resíduos da produção agrícola do café, sob a forma de palha (formato aproximado a uma

semi-elipsóide oca, com maior dimensão igual a 0,9 cm e dimensão inferior igual a 0,5 cm aproximadamente) e lenha (formato aproximado a um cilindro com diâmetro igual a 2,3 cm e altura igual a 3,5 cm aproximadamente), proveniente do Departamento de Engenharia Agrícola.

3.2.1 Reator e componentes secundários

O sistema de gaseificação utilizado neste trabalho consistiu de um reator de fluxo concorrente modelo GEK-Allpowerlabs acoplado aos componentes secundários: ciclone, filtro, queimador, ejetor Venturi, compressor, bomba peristáltica e condensador (Figura 3.1).

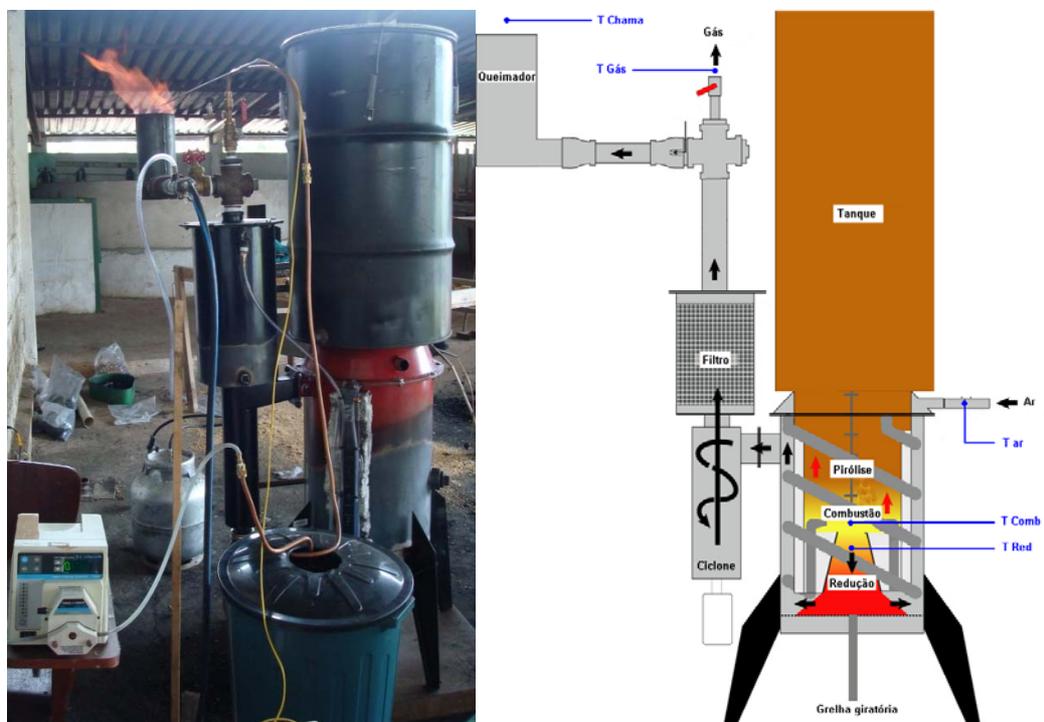


Figura 3.1 - Sistema de gaseificação - gaseificador com os componentes secundários e esquematização do processo.

O reator foi confeccionado em chapas de aço e isolado com manta de fibra cerâmica. Geometricamente o reator é constituído de três cilindros concêntricos, onde no cilindro interno ocorrem as reações termoquímicas. O cilindro do meio é preenchido com material isolante e o cilindro externo completa o corpo do gaseificador funcionando como um espaço para transporte do gás produzido até o ciclone.

O gás de síntese transporta particulados (cinzas e carbono não reagido), os quais são fisicamente separados por meio de um ciclone. Após passar pelo ciclone, o gás atravessa um filtro de carvão e palha de aço, no intuito de diminuir a concentração de alcatrão remanescente. O gás a ser analisado foi succionado por uma bomba peristáltica e seguiu para o condensador de alcatrão antes de chegar ao analisador.

O injetor tipo Venturi foi acoplado a um compressor de 2 cv e instalado após o filtro. Este provoca uma queda de pressão que por sua vez é responsável pelo arraste dos gases do sistema. O controle da pressão no reator ocorre por meio da abertura e fechamento da válvula do ar comprimido no injetor tipo Venturi.

3.2.2 Combustíveis

Foram utilizados resíduos de eucalipto sob a forma de cavacos, proveniente do Departamento de Engenharia Florestal, e resíduos da produção agrícola do café, sob a forma de palha e lenha, proveniente do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa. O processo de gaseificação destas biomassas foi iniciado com ignição de carvão vegetal. A Tabela 3.1 mostra as características químicas das biomassas utilizadas neste experimento, determinadas de acordo com as normas da ABNT - NBR8112/83.

Tabela 3.1 – Análise imediata, composição elementar e poder calorífico superior das biomassas

	Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	C. Fixo (%)	C (%)	H (%)	O (%)	PCS (MJ/kg)
Carvão vegetal	6,00	16,35	1,31	76,33	-	-	-	29,53
Lenha de cafeeiro	9,61	85,73	0,94	13,33	47,50	6,01	44,86	18,07
Lenha de eucalipto	9,74	90,55	0,44	9,02	46,94	6,08	45,84	17,30
Palha de café	9,22	81,87	1,71	16,42	47,71	5,93	43,96	18,56

O poder calorífico e a composição elementar foram respectivamente baseados na metodologia proposta por Parikh et al. 2005 Parikh et al. 2007.

3.2.3 Análise do gás de síntese

O material particulado foi separado do gás de síntese por meio de um ciclone acoplado ao reator. O gás seguiu então para um filtro preenchido com pequenos pedaços de carvão e lã de aço, para diminuição da concentração de condensáveis. Após

filtragem, o gás foi resfriado em uma serpentina mergulhada em um tanque com água fria (aproximadamente 20°C), para condensação do alcatrão. O gás foi succionado por uma bomba peristáltica e analisado quanto à concentração de H₂, CO, CH₄, CO₂, e poder calorífico superior, em analisador comercial Wuhan Cubic Optoelectronics, modelo Gasboard 3300 (Figura 3.2). O erro estimado dos sensores é menor que 2% e o tempo de resposta do equipamento é da ordem de 10 segundos.



Figura 3.2 - Sistema de monitoramento da composição química do gás de síntese.

3.2.4 Operação do sistema e instrumentação

O reator foi preenchido com carvão vegetal, com dimensão máxima de 2 cm, até atingir a altura dos cinco bicos injetores de ar na região de combustão, e complementado com a biomassa a ser estudada. Em seguida o reator foi selado, fechado e pesado para iniciar o processo de ignição (Figura 3.3).



Figura 3.3 - Detalhes das zonas de combustão e redução.

Antes de iniciar o processo de ignição foi aberta a válvula do ar pressurizado no sistema Venturi, garantindo um vácuo de aproximadamente 6 cm de coluna d'água no reator, para facilitar a ignição na região de combustão.

Foi introduzido 3 ml de combustível líquido (mistura de Diesel e álcool) no reator, e com uma chama piloto de GLP dava-se a ignição do gaseificador. Após alguns minutos observou-se a saída do gás no combustor, o qual foi devidamente queimado para evitar contaminação do ambiente de trabalho.

A cada 15 minutos foram coletados dados de temperatura e umidade do ar (termohigrômetro Instrutherm Mod. HT260); temperatura da zona de combustão, zona de redução, gás de síntese e chama (termopares tipo K); pressão no reator e no filtro (coluna d'água); vazão de entrada de ar (Anemômetro fio quente Instrutherm Mod. TAFR 180); vazão de saída do gás de síntese (Anemômetro de pás Instrutherm Mod. THVR 650); peso do reator (balança industrial Toledo – capacidade 500 kg); e composição e poder calorífico do gás (Analisador Wuhan Cubic Mod. Gasboard 3300). Ao final de cada experimento, o reator teve suas cinzas coletadas e quantificadas.

3.2.5 Balanço de massa

Aplicando a Lei de Conservação das Massas para o processo de gaseificação, tem-se (Equação 3.14):

$$\frac{dm_{v.c.}}{dt} = \sum m_g - \sum m_s \quad (3.14)$$

em que:

m_g = massa que entra no volume de controle, e m_s = massa que sai do volume de controle.

A variação de massa dentro do volume de controle durante o intervalo de tempo Δt é igual ao somatório da massa que entra menos o somatório da massa que sai do volume de controle.

Para volumes de controle em regime permanente o balanço de massa pode ser representado pela equação 3.15.

$$\sum m_g = \sum m_s \quad (3.15)$$

em que

$$\sum m_g = m_b + m_a \quad (3.16)$$

$$\sum m_g = m_g + m_{cz} + \text{perdas} \quad (3.17)$$

m_b , m_a , m_g e m_{cz} significam massa inicial de biomassa, massa do ar, massa do gás de síntese e massa de cinzas respectivamente.

3.2.6 Balanço de Energia

O balanço de energia foi estabelecido considerando o gaseificador como um volume de controle em regime permanente, onde a taxa de transferência de energia na forma de calor e trabalho não varia no tempo. Como não há teoricamente acumulação de massa dentro do volume de controle e o sistema analisado não realiza trabalho, o princípio da conservação de energia (Primeiro Princípio da Termodinâmica), aplicado ao processo de gaseificação pode ser representado pela diferença do somatório das energias (entalpia) das variáveis de entrada e das variáveis de saída.

$$\sum E_g = \sum E_s \quad (3.18)$$

em que

$$\sum E_g = E_b + E_a \quad (3.19)$$

$$\sum E_g = E_g + \text{Perdas} \quad (3.20)$$

E_b , E_a e E_g significam as energias contidas na biomassa, no ar e no gás de síntese respectivamente.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.3.1 Gaseificação de cavacos de eucalipto

O processo de gaseificação dos cavacos de eucalipto ocorreu durante três dias consecutivos, totalizando três testes com duração média de 4 horas cada. Foram utilizados em média de 24 kg de cavacos de eucalipto (Figura 3.4.) em cada teste, os quais permaneceram sob terreiros cobertos durante todo o período do experimento.



Figura 3.4 - Cavacos de eucalipto.

Agente de gaseificação

O agente de gaseificação utilizado foi o ar ambiente, o qual foi monitorado quanto à temperatura e umidade relativa durante todo o experimento, cujos valores em função do tempo podem ser observados nas Figuras 3.5, 3.6 e 3.7, referentes aos testes T1, T2 e T3, respectivamente.

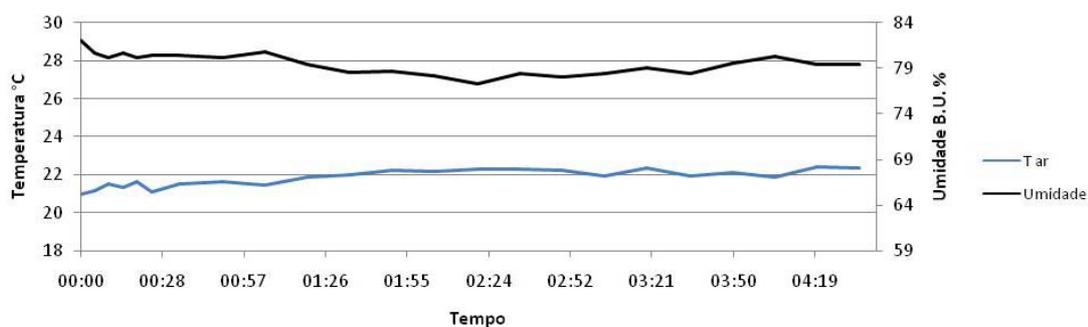


Figura 3.5 - Temperatura e umidade do agente gaseificante durante o teste 1 com cavacos de eucalipto.

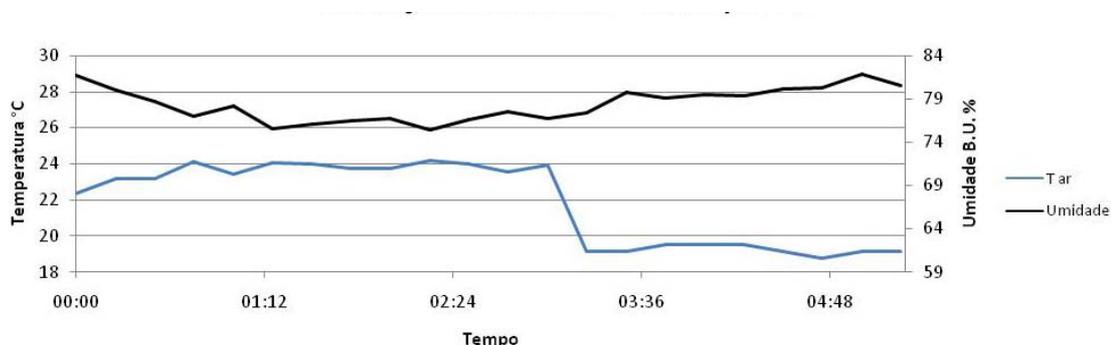


Figura 3.6 - Temperatura e umidade do agente gaseificante durante o teste 2 com cavacos de eucalipto.

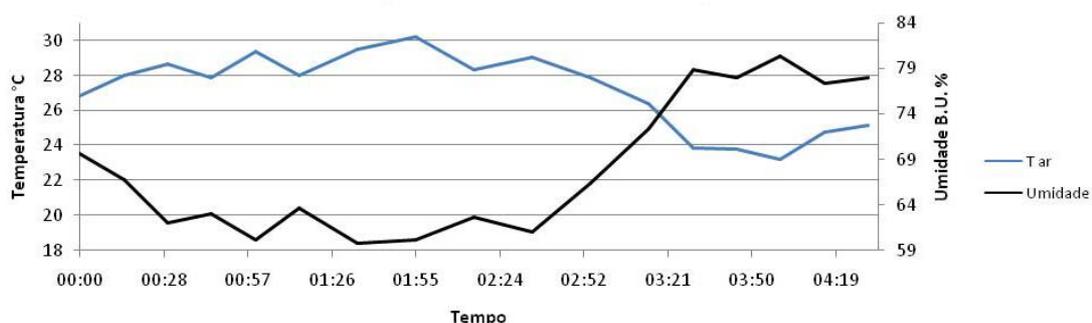


Figura 3.7 - Temperatura e umidade do agente gaseificante durante o teste 3 com cavacos de eucalipto.

Os testes 1 e 2 foram realizados durante dias chuvosos, o que conferiu ao agente gaseificante menores temperaturas e maiores índices de umidade relativa.

A vazão média de entrada de ar para os três testes foi $0,0018275 \text{ Nm}^3 \text{ s}^{-1}$. Levando em consideração um tempo médio de 287 minutos para cada teste, e a densidade do ar igual $1,205 \text{ kg Nm}^{-3}$, obteve-se um consumo médio de $31,47 \text{ Nm}^3$ (ou $37,92 \text{ kg}$) de ar, ou seja, $7,93 \text{ kg ar h}^{-1}$.

Condições de operação do reator

O reator operou de forma satisfatória durante todo o período de teste, mantendo-se pressão negativa no seu interior entre 3 e 10 cm de coluna de água, conferindo ar suficiente para manter as zonas de combustão e gaseificação ativas.

As Figuras 3.8, 3.9 e 3.10 representam graficamente os valores da pressão no reator e no filtro em função do tempo de gaseificação nos três testes distintos.

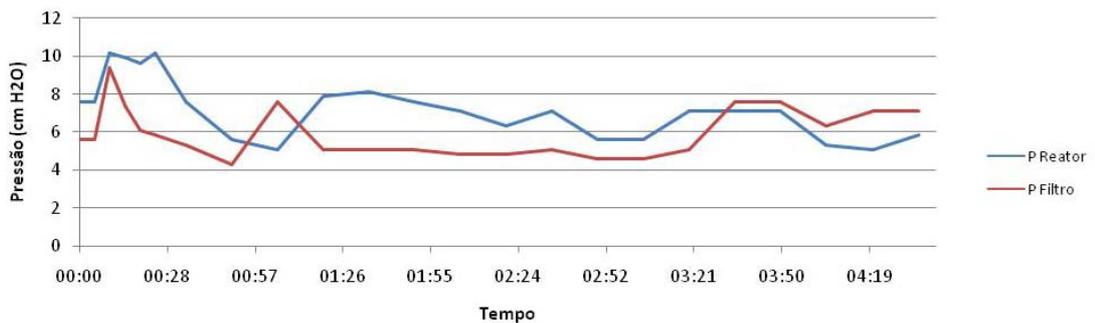


Figura 3.8 - Pressão negativa no reator e no filtro durante o tempo do teste 1 com cavacos de eucalipto.

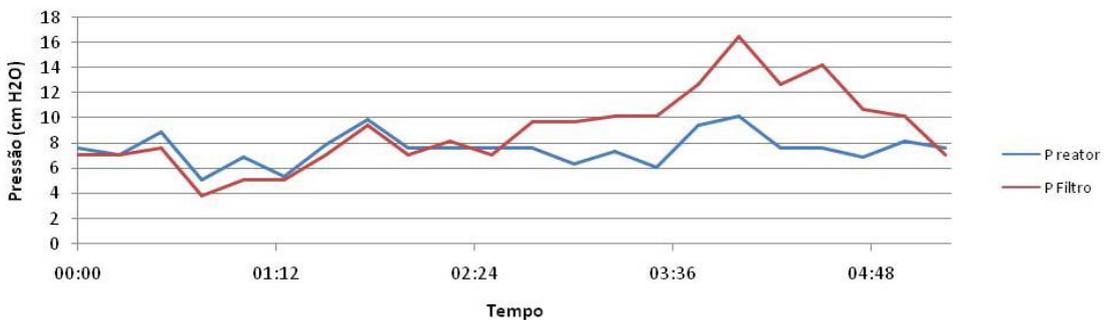


Figura 3.9 - Pressão negativa no reator e no filtro durante o tempo do teste 2 com cavacos de eucalipto.

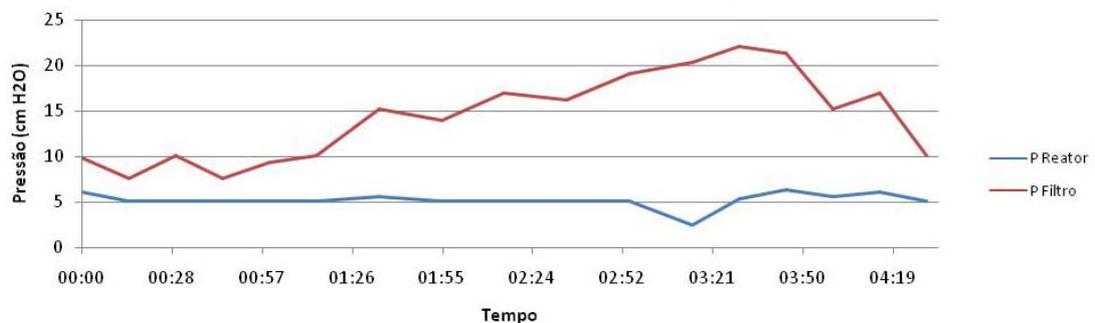


Figura 3.10 - Pressão negativa no reator e no filtro durante o tempo do teste 3 com cavacos de eucalipto.

Podemos observar que o comportamento da pressão no reator e no filtro foi totalmente aleatório, com pressão máxima de 10 cm de coluna d'água no reator e 16 cm de coluna d'água no filtro. Isto se dá devido à diminuição das partículas na zona de redução e conseqüente obstrução à passagem do gás no reator, e saturação de alcatrão no filtro, o que também impede a passagem do gás com sentido ao analisador. Estas obstruções ocorrem de forma espontânea, o que torna o controle da pressão no filtro e no reator uma tarefa complexa.

Temperatura de reação

Observou-se que as temperaturas da zona de combustão e da zona de gaseificação estavam condizentes com a teoria, mantendo-se a temperatura da zona de combustão sempre superior à temperatura da zona de gaseificação, condição está imprescindível para que as reações endotérmicas da gaseificação e pirólise possam acontecer.

Nas Figuras 3.11, 3.12 e 3.13 observa-se os valores das temperaturas das zonas de combustão e gaseificação em função do tempo de testes.

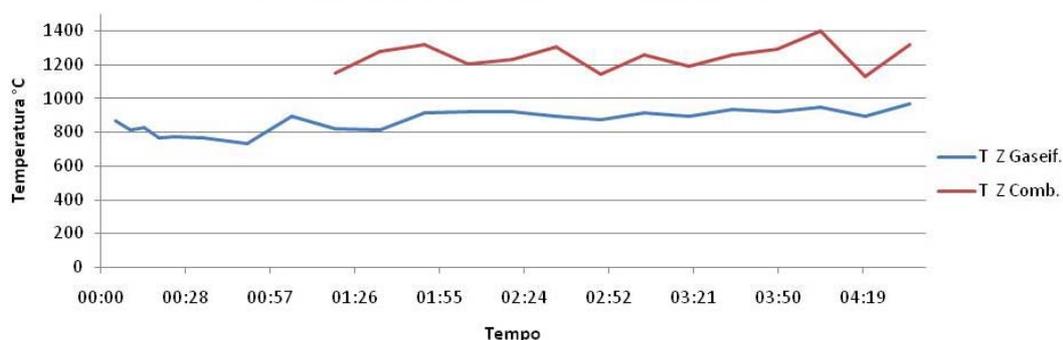


Figura 3.11 - Temperatura da zona de combustão e da zona de gaseificação durante o teste 1 com cavacos de eucalipto.

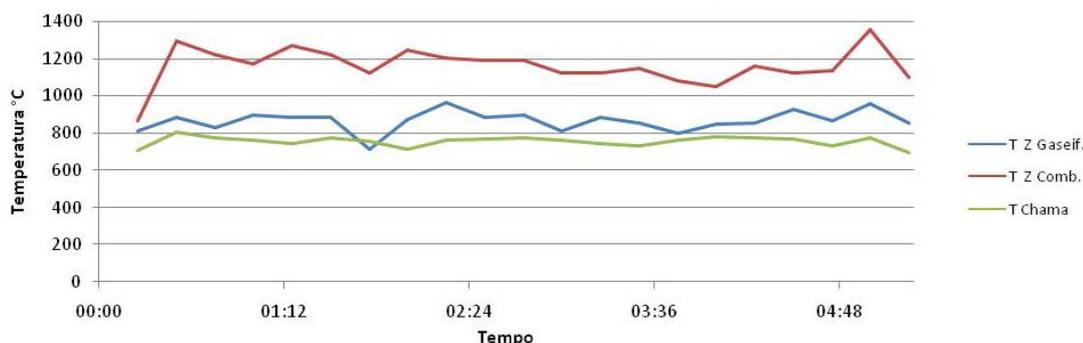


Figura 3.12 - Temperatura da zona de combustão, zona de gaseificação e da chama durante o teste 2 com cavacos de eucalipto.

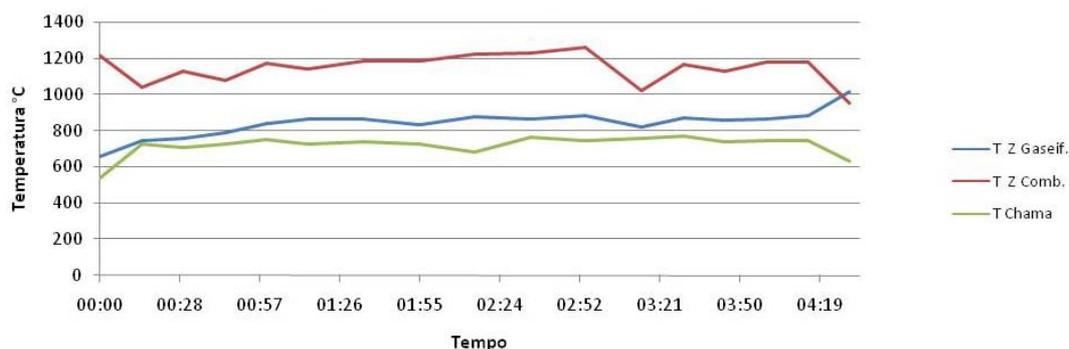


Figura 3.13 - Temperatura da zona de combustão, zona de gaseificação e da chama durante o teste 3 com cavacos de eucalipto.

Nos testes 2 e 3 foi também monitorada a temperatura da chama do gás produzido. Observa-se um comportamento similar em ambos os testes, mostrando a temperatura da chama ligeiramente inferior às temperaturas da zona de gaseificação. A temperatura da chama é função do poder calorífico do gás, que por sua vez está relacionado à composição do gás em combustão no instante da medição.

Consumo de biomassa

Na Figura 3.14, pode-se observar as curvas de consumo da biomassa em função do tempo de gaseificação nos três testes.

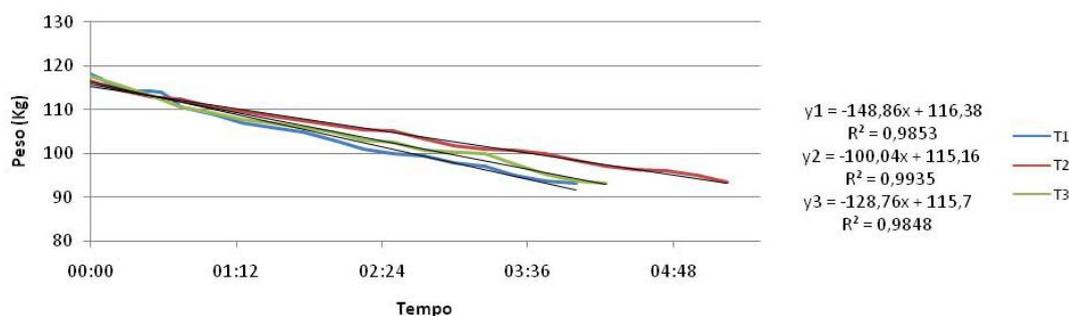


Figura 3.14 - Representação do consumo de cavaco de eucalipto em função do tempo de gaseificação nos testes T1, T2 e T3.

A taxa de consumo de combustível variou durante os três testes, observando-se média de $5,06 \text{ kg h}^{-1}$. Observa-se um comportamento linear para a taxa de consumo dos cavacos de eucaliptos nos três testes, o que pode ser representado por equações lineares, com coeficiente de determinação superior a 0,98 (Figura 3.14).

Análise do gás

O gás produzido durante o processo de gaseificação nos três testes foi monitorado quanto à composição, e pode ser analisado nas Figuras 3.15, 3.16 e 3.17. A estatística do teste foi realizada considerando apenas a região de estabilidade, uma vez que o início do teste configura o tempo de aquecimento do sistema, e o término do teste apresenta pouca carga de biomassa, sendo as duas últimas regiões não representativas para a caracterização do gás.

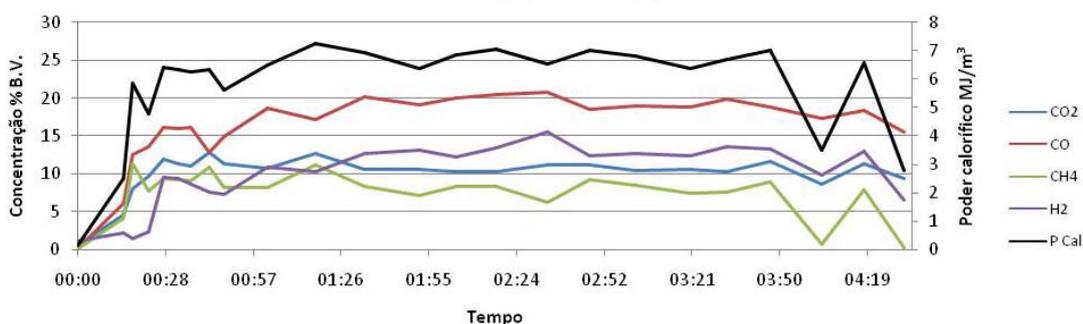


Figura 3.15 - Comportamento da composição do gás e poder calorífico em função do tempo de gaseificação durante o teste 1 com eucalipto.

No teste 1, observou-se composição regular do gás produzido entre 1 hora e 30 minutos e 3 horas e 50 minutos após início do experimento. Tal fato, no entanto, não alterou sua característica como combustível, uma vez que o gás entrou em combustão 2 minutos após a ignição do reator permanecendo nesta condição até o final do experimento. Observa-se na Tabela 3.2 os resultados da análise estatística do teste 1.

Tabela 3.2 - Análise estatística da composição e do poder calorífico do gás produzido durante o teste 1 da gaseificação com cavacos de eucalipto

	CO ₂ %Vol.	CO %Vol.	CH ₄ %Vol.	H ₂ %Vol.	P.Cal. MJ/m ³
Mediana	10,61	19,01	8,35	12,69	6,83
Média	10,87	19,28	8,29	12,72	6,79
Máxima	12,69	20,76	11,13	15,56	7,27
Desvio Padrão	0,69	1,02	1,22	1,33	0,29
Variância	0,47	1,05	1,49	1,76	0,08
C.V.	6,35	5,25	14,70	10,45	1,18

Observou-se no gás produzido predominância de monóxido de carbono, com média de 19,28% em volume, seguido pelas concentrações de hidrogênio (12,72%), dióxido de carbono (10,87%) e metano (8,29%). O poder calorífico médio do gás foi de 6,79 MJ m⁻³.

A Figura 3.16 apresenta a composição do gás de síntese durante o teste 2, da gaseificação de cavacos de eucalipto.

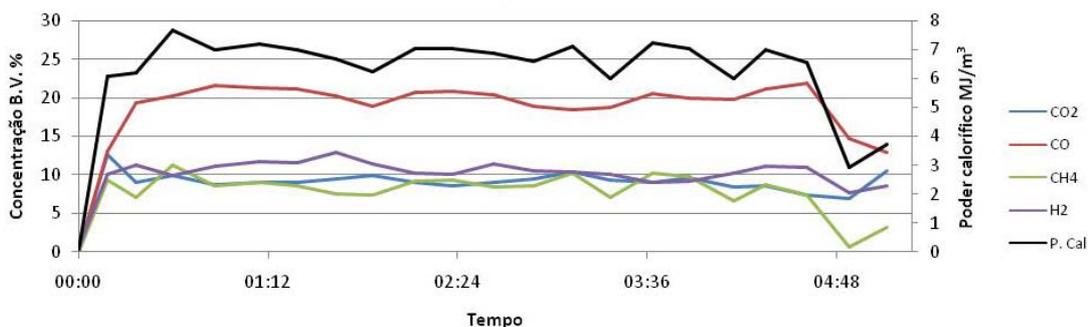


Figura 3.16 - Comportamento da composição do gás e poder calorífico em função do tempo de gaseificação durante o teste 2 com eucalipto.

No teste 2, observou-se a composição regular do gás produzido entre 22 minutos e 4 horas e 10 minutos após o início do experimento. O gás entrou em combustão 5 minutos após a ignição do reator permanecendo nesta condição até o final do experimento. Observa-se na Tabela 3.3 os resultados da análise estatística do teste 2.

Tabela 3.3 - Análise estatística da composição e do poder calorífico do gás produzido durante o teste 2 da gaseificação com cavacos de eucalipto

	CO2 %Vol.	CO %Vol.	CH4 %Vol.	H2 %Vol.	P.Cal. MJ/m ³
Mediana	8,98	20,37	8,56	10,75	6,99
Média	9,08	20,24	8,60	10,74	6,81
Máxima	10,34	21,83	11,24	12,95	7,66
Desvio Padrão	0,67	1,04	1,26	0,96	0,46
Variância	0,45	1,08	1,60	0,93	0,21
C.V.	7,38	5,14	14,65	8,94	6,75

Observa-se no gás produzido predominância de monóxido de carbono, com média de 20,24% em volume, seguido pelas concentrações de hidrogênio (10,74%), dióxido de carbono (9,08%) e metano (8,60%). O poder calorífico médio do gás foi 6,81 MJ m⁻³.

No teste 3, observa-se composição regular no gás produzido entre 55 minutos e 4 horas e 15 minutos após ignição do reator, e assim como no teste 2, a concentração de dióxido de carbono e metano encontra-se instável durante o experimento (Figura 3.17).

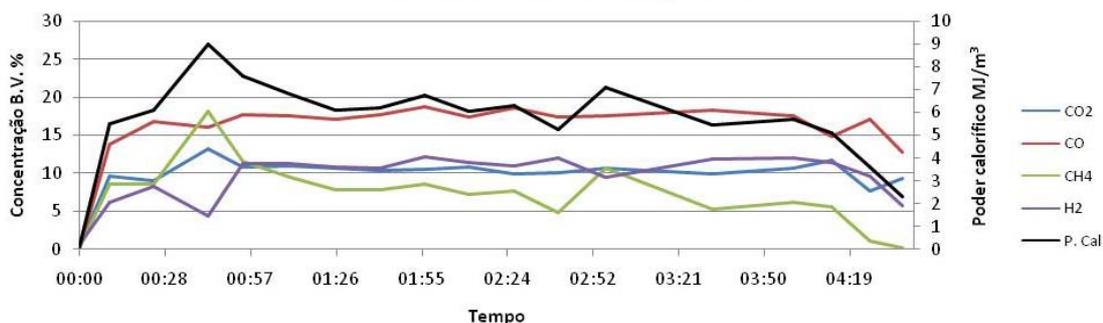


Figura 3.17 - Comportamento da composição do gás e poder calorífico em função do tempo de gaseificação durante o teste 3 com eucalipto.

O gás entrou em combustão 3 minutos após a ignição do reator permanecendo nesta condição até o final do experimento. Observa-se na Tabela 3.4 os resultados da análise estatística do teste 3.

Tabela 3.4 - Análise estatística da composição e do poder calorífico do gás produzido durante o teste 3 da gaseificação com eucalipto

	CO2 %Vol.	CO %Vol.	CH4 %Vol.	H2 %Vol.	P. Cal. MJ/m ³
Mediana	10,62	17,55	7,69	11,31	6,17
Média Aritmética	10,59	17,55	7,72	11,28	6,21
Máxima	11,69	18,81	11,59	12,17	7,62
Desvio Padrão	0,50	0,99	2,12	0,76	0,77
Variância	0,25	0,98	4,51	0,58	0,59
C.V.	4,72	5,64	27,46	6,74	12,40

Observou-se predominância de monóxido de carbono no gás produzido, com média de 17,55% em volume, seguido pelas concentrações de hidrogênio (11,28%), dióxido de carbono (10,59%), e metano (7,72%). O poder calorífico médio do gás foi 6,21 MJ m⁻³.

Pode-se observar que nos três testes, apesar de condições climáticas e condições de operação do gaseificador distintas, o gás de síntese produzido tinha composição química bastante similar (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 - Análise estatística da composição e poder calorífico dos três testes de gaseificação com cavacos de eucalipto

	CO ₂ %Vol.	CO %Vol.	CH ₄ %Vol.	H ₂ %Vol.	P.Cal. MJ/m ³
Teste 1	10,87	19,28	8,29	12,72	6,79
Teste 2	9,08	20,24	8,60	10,74	6,81
Teste 3	10,59	17,55	7,72	11,28	6,21
Média	10,18	19,02	8,20	11,58	6,60
Desvio	0,97	1,36	0,45	1,02	0,34
Variância	0,93	1,86	0,20	1,05	0,12
C.V.	9,52	7,15	5,49	8,81	5,15

A predominância do monóxido de carbono no gás de síntese da gaseificação dos cavacos de eucalipto pode estar relacionada à reação de Boudouard (Equação 1.4), que quando mantida sob elevada temperatura tem seu equilíbrio voltado para a produção do monóxido em detrimento do dióxido de carbono.

A vazão média de gás de síntese produzido durante os três testes foi 0,006109 Nm³ s⁻¹. A densidade média do gás produzido (0,9148 kg m⁻³) foi calculada com base na composição média do gás de síntese e na densidade média dos componentes deste gás, assumindo o comportamento de um gás ideal (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 - Massa específica dos componentes do gás de síntese (kg/m³)

	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	N ₂
Eucalipto T1 (79,51 °C)	1,5586	0,9918	0,5668	0,0708	0,9918
Eucalipto T2 (67,33 °C)	1,5759	1,0029	0,5731	0,0716	1,0029
Eucalipto T3 (67,23 °C)	1,5764	1,0032	0,5732	0,0717	1,0032
Média	1,5703	0,9993	0,5710	0,0714	0,9993
Desvio	0,0101	0,0065	0,0037	0,0005	0,0065

A concentração volumétrica restante foi considerada relativa ao nitrogênio N₂, desprezando os pequenos traços de outros gases. Foi adotada a pressão atmosférica da cidade de Viçosa-MG (0,97 atm) e a temperatura média do gás em cada teste.

3.3.2 Gaseificação da palha de café

O processo de gaseificação da palha de café durou 3 horas. A biomassa, Figura 3.18, foi previamente peneirada para retirar excesso de particulados finos, provenientes do processo de descascamento. Não foi utilizado o tanque de armazenamento de

biomassa sobre o reator, devido a massa específica e granulometria fina da biomassa favorecer a formação de túnel “caminho preferencial” dificultando a passagem da biomassa no gaseificador. Desta forma, a alimentação da biomassa foi realizada manualmente à medida que se observava a diminuição da zona de secagem.



Figura 3.18 - Palha de café.

Agente de gaseificação

O agente de gaseificação utilizado foi o ar ambiente, o qual foi monitorado quanto à temperatura e umidade relativa durante todo o experimento, cujos valores em função do tempo podem ser observados na Figura 3.19.

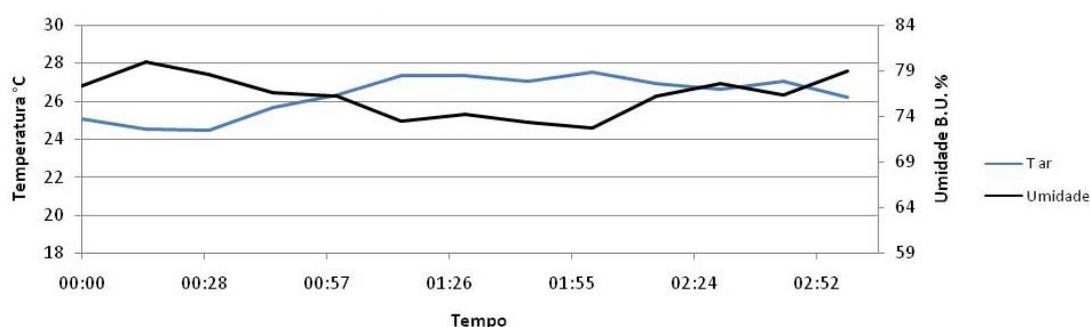


Figura 3.19 - Temperatura e umidade do agente gaseificante (ar) durante gaseificação da palha do café.

A temperatura média do ar ambiente, agente gaseificante foi de 26,3 °C, enquanto a umidade relativa média foi 76,3 %.

A vazão média de entrada de ar foi $0,0012397 \text{ Nm}^3 \text{ s}^{-1}$. Levando em consideração o tempo de experimento de 180 minutos e a densidade do ar igual $1,205 \text{ kg Nm}^{-3}$, obteve-se um consumo de $13,39 \text{ Nm}^3$ ($16,13 \text{ kg}$) de ar.

Condições de operação do reator

A Figura 3.20 apresenta graficamente os valores da pressão no reator e no filtro em função do tempo de gaseificação.

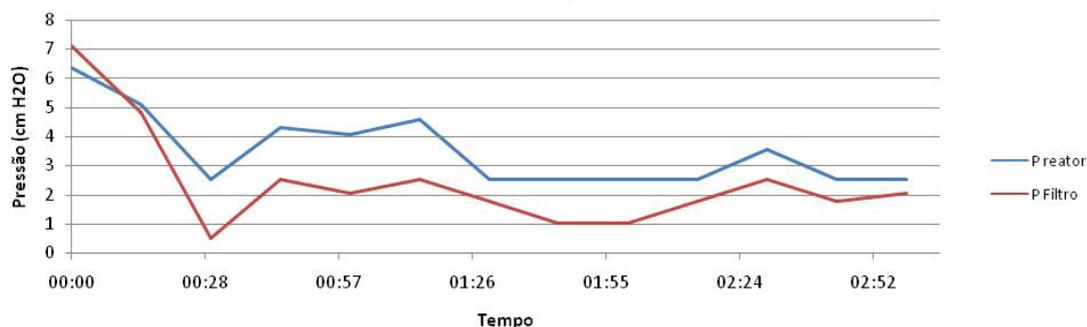


Figura 3.20 - Pressão negativa no reator e no filtro durante a gaseificação da palha de café.

O reator operou de forma satisfatória durante todo o período de gaseificação. A pressão negativa no reator manteve-se entre 2 e 7 cm de coluna de água, conferindo ar suficiente para manter as zonas de combustão e gaseificação ativas.

Temperatura de reação

As temperaturas da zona de combustão e da zona de gaseificação apresentaram-se instáveis durante o experimento, dificultando o processo de formação do gás de síntese, que ocorre quando a temperatura da zona de combustão está elevada o suficiente para fornecer energia às reações endotérmicas da gaseificação e da pirólise.

Na Figura 3.21 observa-se o comportamento da temperatura da zona de combustão, zona de gaseificação e da chama, em função do tempo de teste.

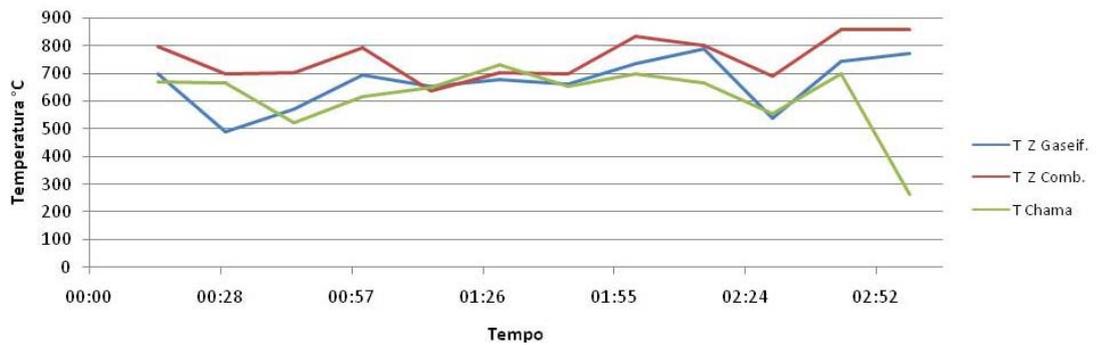


Figura 3.21 - Temperatura da zona de combustão, zona de gaseificação e da chama durante a gaseificação da palha de café.

A temperatura da chama foi monitorada, atingindo temperatura máxima de 731°C, apresentando comportamento instável comparado à temperatura da zona de gaseificação.

Consumo de biomassa

Na Figura 3.22, pode-se observar a curva de consumo da biomassa em função do tempo de gaseificação.

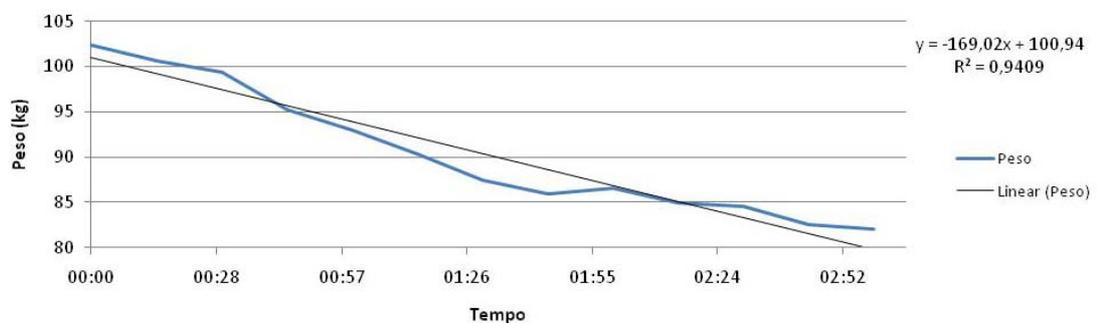


Figura 3.22 - Representação do consumo de palha de café em função do tempo de gaseificação.

Foram utilizados 20,4 kg de palha de café, e a taxa de consumo foi 6,81 kg h⁻¹. Observa-se um comportamento tendencioso, que pode ser representado por uma equação linear, com coeficiente de determinação superior a 0,94.

Análise do gás

O gás produzido durante o processo de gaseificação foi monitorado quanto a composição e ao poder calorífico, e pode ser analisado na Figura 3.23.

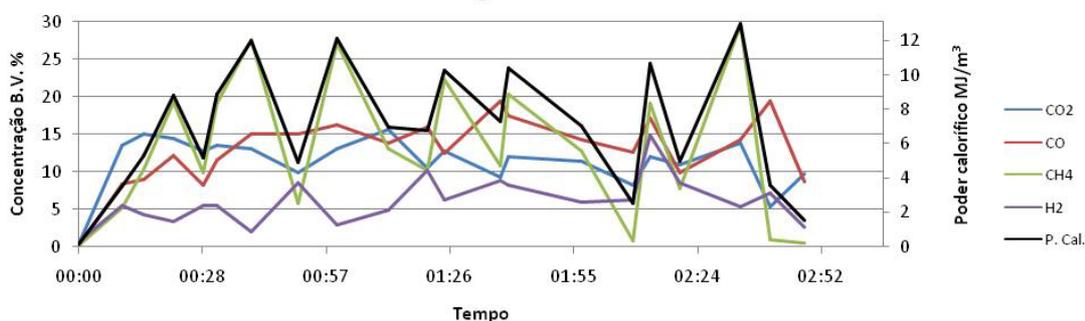


Figura 3.23 - Comportamento da composição do gás e poder calorífico em função do tempo de gaseificação durante o teste com palha de café.

Observa-se composição instável no gás de síntese durante todo o tempo do experimento, alternando a sua composição principal entre metano, monóxido de carbono e dióxido de carbono. O gás entrou em combustão 15 minutos após a ignição do reator, permanecendo nesta condição até o final do experimento. Para efeito de cálculo, foram extraídos o período inicial (primeiros 20 minutos) e final (últimos 20 minutos) do experimento. Pode-se analisar na Tabela 3.7 os resultados da análise estatística da gaseificação da palha de café.

Tabela 3.7 - Análise estatística da composição e do poder calorífico do gás produzido durante a gaseificação da palha de café

	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	P. Cal.
Mediana	12,36	14,11	12,87	6,11	7,17
Média Aritmética	12,14	13,81	14,77	6,64	7,76
Máxima	15,59	19,52	27,58	14,95	12,10
Desvio Padrão	2,06	3,18	7,63	3,20	2,82
Variância	4,23	10,08	58,16	10,25	7,93
C.V.	16,97	23,03	51,66	48,19	36,34

Observa-se no gás produzido predominância de metano, com média de 14,77% em volume, seguido pelas concentrações de monóxido de carbono (13,81%), dióxido de carbono (12,14%) e hidrogênio (6,64%). O poder calorífico médio do gás foi 7,76 MJ m⁻³.

A predominância do metano pode ter ocorrido à medida que hidrogênio reagia com o carbono aquecido, de acordo com a reação exotérmica de formação de metano (Equação 1.6), o que também explica a baixa concentração de hidrogênio no gás produzido.

A vazão de gás de síntese produzido foi $0,003533 \text{ Nm}^3 \text{ s}^{-1}$. Levando em consideração o tempo de experimento de 180 minutos, obteve-se uma produção de $38,15 \text{ Nm}^3$. A densidade do gás foi calculada com base na composição do gás de síntese, assumindo o comportamento de um gás ideal. A concentração volumétrica restante foi considerada relativa ao nitrogênio N_2 , desprezando os pequenos traços de outros gases. Foi adotada a pressão atmosférica da cidade de Viçosa-MG ($0,97 \text{ atm}$) e a temperatura média do gás ($56,75^\circ\text{C}$).

A densidade do gás de síntese da palha de café foi de $0,899 \text{ kg m}^{-3}$, o que implica em uma produção mássica de $34,28 \text{ kg}$, ou seja, uma produção de $11,44 \text{ kg h}^{-1}$.

3.3.3 Gaseificação da lenha de cafeeiro

O processo de gaseificação da lenha de cafeeiro durou 4 horas e 15 minutos. A lenha do cafeeiro foi cortada manualmente e mantida sob terreiro suspenso e protegido durante todo o período de testes (Figura 3.24).



Figura 3.24 - Lenha de cafeeiro

Agente de gaseificação

O agente de gaseificação utilizado foi o ar ambiente, o qual foi monitorado quanto à temperatura e umidade relativa durante todo o experimento, cujos valores em função do tempo podem ser observados na Figura 3.25.

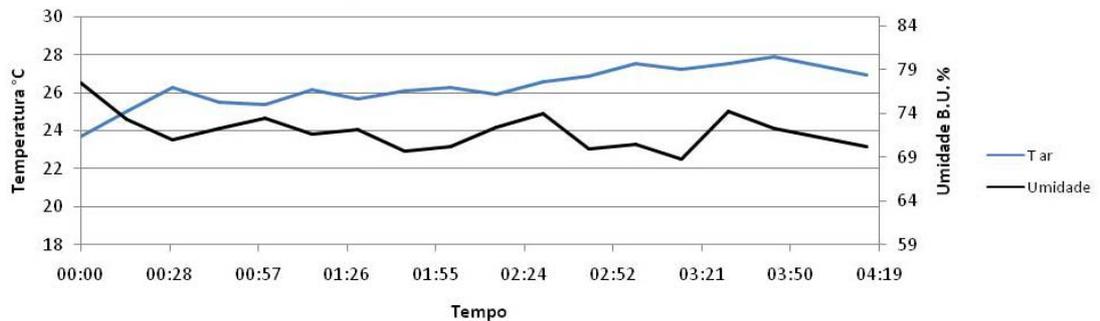


Figura 3.25 - Temperatura e umidade do ar (agente gaseificante) durante o tempo de gaseificação da lenha oriundo de cafeeiro.

A temperatura média do agente gaseificante foi de 26,3 °C, enquanto a umidade relativa média foi 71,9 % em base úmida.

A vazão média de entrada de ar foi 0,0020278 Nm³ s⁻¹. Levando em consideração o tempo de experimento de 255 minutos, e a densidade do ar igual 1,205 kg Nm⁻³, obteve-se um consumo de 31,03 Nm³ (ou 37,39 kg) de ar.

Condições de operação do reator

A Figura 3.26 apresenta graficamente os valores da pressão no reator e no filtro em função do tempo de gaseificação.

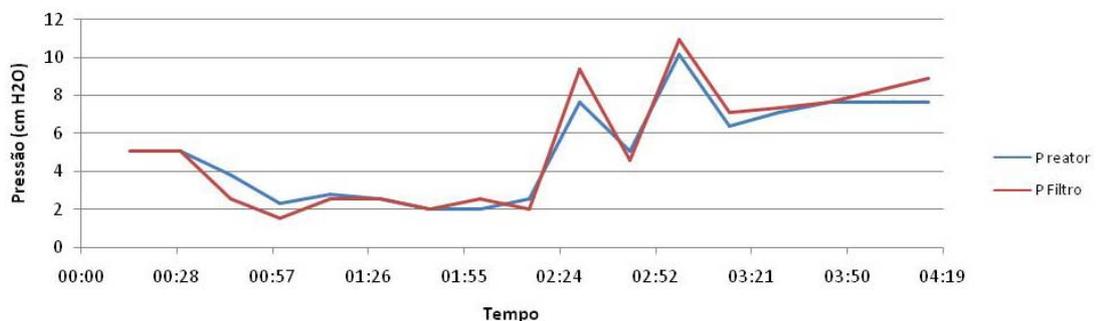


Figura 3.26 - Pressão negativa no reator e no filtro durante a gaseificação da lenha do cafeeiro.

O reator funcionou de forma satisfatória porém necessitou de reparo no filtro duas horas após a ignição do reator. A pressão negativa no reator manteve-se entre 1 e 9 cm de coluna de água, conferindo ar suficiente para manter as zonas de combustão e gaseificação ativas.

Temperatura de reação

As temperaturas da zona de combustão e da zona de gaseificação apresentaram-se instáveis durante a primeira hora de experimento, dificultando o processo de formação do gás de síntese. Após a primeira hora de experimento as zonas de combustão e gaseificação apresentaram comportamento regular, mantendo a temperatura da zona de combustão sempre superior à temperatura da zona de gaseificação, condição esta imprescindível para que as reações endotérmicas da gaseificação e pirólise possam acontecer.

Na figura 3.27 observa-se o comportamento da temperatura da zona de combustão, zona de gaseificação e da chama, em função do tempo de teste.

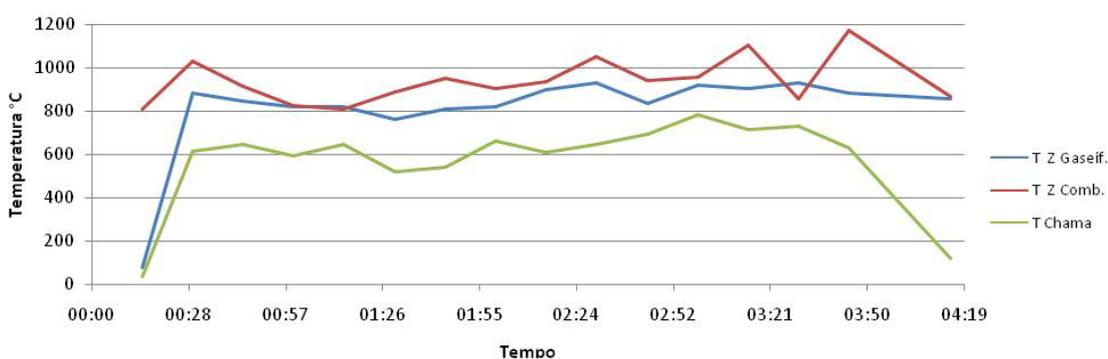


Figura 3.27 - Temperatura da zona de combustão, zona de gaseificação e da chama durante a gaseificação da lenha do cafeeiro.

A temperatura da chama foi monitorada, atingindo temperatura máxima de 783°C, permanecendo inferior à temperatura da zona de gaseificação durante o experimento.

Consumo de biomassa

Na Figura 3.28, pode-se observar a curva de consumo da biomassa em função do tempo de gaseificação.

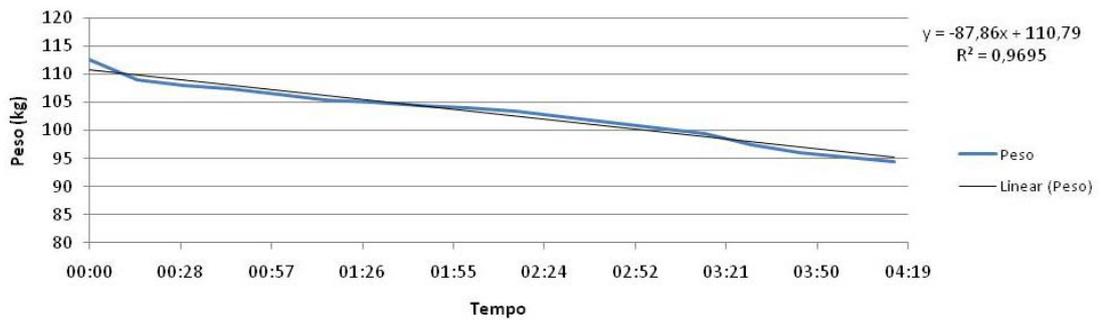


Figura 3.28 - Representação do consumo de biomassa em função do tempo de gaseificação.

A taxa de consumo de combustível foi $4,24 \text{ kg h}^{-1}$. Observa-se um comportamento tendencioso, que pode ser representado por uma equação linear, com coeficiente de determinação superior a 0,96 (Figura 4.28).

Análise do gás

A Figura 3.29 apresenta graficamente a composição e o poder calorífico do gás produzido durante o processo de gaseificação.

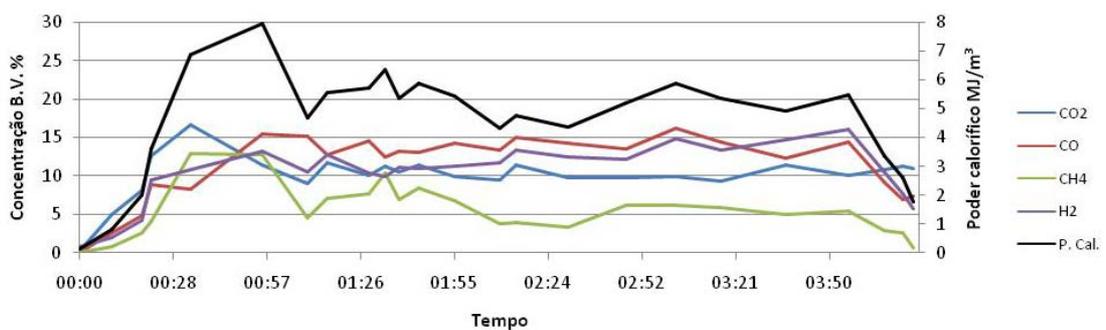


Figura 3.29 - Comportamento da composição do gás e poder calorífico em função do tempo de gaseificação durante o teste com lenha de cafeeiro.

O gás de síntese apresenta composição regular entre 1 hora e 3 horas e 50 minutos após início do experimento. Houve dificuldade para iniciar a combustão do gás, o qual ocorreu 44 minutos após a ignição do reator, permanecendo nesta condição até o final do experimento. Observa-se na Tabela 3.8 os resultados da análise estatística da gaseificação da lenha do cafeeiro.

Tabela 3.8 - Análise estatística da composição e do poder calorífico do gás produzido durante a gaseificação da lenha do cafeeiro

	CO ₂	CO	CH ₄	H ₂	P. Cal.
Mediana	10,03	14,29	6,13	12,32	5,41
Média Aritmética	10,39	14,03	6,51	12,42	5,45
Máxima	11,75	16,28	12,76	16,02	7,97
Desvio Padrão	0,89	1,14	2,48	1,76	0,88
Variância	0,79	1,29	6,15	3,10	0,77
C.V.	8,56	8,13	38,10	14,17	16,15

O gás produzido apresentou predominância de monóxido de carbono, com média de 14,03% em volume, seguido pelas concentrações de hidrogênio (12,42%), dióxido de carbono (10,39%) e metano (6,51%). O poder calorífico médio do gás foi 5,45 MJ/m³. Assim como na gaseificação dos cavacos de eucalipto, este comportamento pode estar relacionado à reação de Boudouard (Equação 1.4).

A vazão de gás de síntese produzido foi 0,004164 Nm³ s⁻¹. Levando em consideração o tempo de experimento de 255 minutos, foi obtida uma produção de 63,70 Nm³. A densidade do gás foi calculada com base na composição do gás de síntese, assumindo o comportamento de um gás ideal. A concentração volumétrica restante foi considerada relativa ao nitrogênio N₂, desprezando os pequenos traços de outros gases. Foi adotada a pressão atmosférica da cidade de Viçosa-MG (0,97 atm) e a temperatura média do gás (71,94 °C).

A densidade do gás de síntese da lenha de cafeeiro foi 0,858 kg m⁻³, o que implica em uma produção mássica de 54,68 kg.

3.4 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA E RAZÃO DE EQUIVALÊNCIA (Φ)

O balanço de massa das biomassas foi determinado a partir dos dados relacionados na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Balanço de massa e eficiência de conversão

	Entrada (kg)			Saida (kg)			Φ	Conv.
	Biom.	Ar	Total	Gás	Cinzas	Total		
Eucalipto T1	24,80	35,01	59,81	56,80	0,1895	56,99	0,22	0,9528

Eucalipto T2	23,10	46,02	69,12	67,68	0,2348	67,91	0,31	0,9826
Eucalipto T3	24,20	33,20	57,40	48,15	0,2122	48,36	0,21	0,8425
Palha de café	20,40	16,13	36,53	34,28	1,1390	35,42	0,12	0,9696
Lenha de cafeeiro	18,00	37,39	55,39	54,68	0,5015	55,10	0,32	0,9962

A razão de equivalência (Φ), que indica a quantidade de ar consumido para a gaseificação de 1 kg de biomassa, apresentou-se entre 0,21 e 0,32 para as gaseificações sem reabastecimento, e 0,12 para a gaseificação da palha de café.

A conversão de biomassa em gás de síntese esteve entre 84 e 99%, o que demonstra que o sistema de gaseificação operou regularmente, e o processo de gaseificação foi realizado de forma satisfatória.

O balanço de energia foi determinado a partir dos valores de poder calorífico da biomassa e do gás de síntese, bem como da entalpia do ar durante os testes. Os dados de entalpia do ar foram obtidos por meio de carta psicométrica, relacionando a temperatura e a umidade relativa média do ar durante o experimento (Tabela 3.10).

Tabela 3.10 - Balanço de energia e eficiência de conversão

	Entrada (MJ kg ⁻¹)			Saída (MJ kg ⁻¹)	
	Biomassa	Ar	Total	Gás de Síntese	Conversão
Eucalipto T1	17,30	0,2954	17,60	7,54	0,4285
Eucalipto T2	17,30	0,2954	17,60	7,42	0,4217
Eucalipto T3	17,30	0,3007	17,60	6,71	0,3812
Palha de café	18,56	0,2999	18,86	8,63	0,4576
Lenha de cafeeiro	18,07	0,2999	18,37	6,39	0,3479

A eficiência de conversão de energia é dada pela razão entre o PCS do gás de síntese e o PCS da biomassa mais entalpia do ar. Para as biomassas analisadas encontrou-se uma eficiência de conversão de energia entre 34,79% (Lenha de cafeeiro) e 45,76% (Palha de café).

3.5 CONCLUSÕES

O processo de gaseificação dos resíduos da produção madeireira sob a forma de cavacos de eucalipto e resíduos da produção de café sob a forma de palha e lenha obteve desempenho satisfatório tanto quanto à operação do sistema, quanto aos resultados qualitativos e quantitativos.

As condições climáticas e as condições de operação do reator utilizado no processo de gaseificação não afetaram a qualidade final do gás de síntese produzido, como constatado nos testes de gaseificação de cavacos de eucalipto.

Biomassas diferentes resultaram em gás de síntese diferentes:

A gaseificação da palha de café apresentou o gás de síntese com o maior poder calorífico ($7,76 \text{ MJ m}^{-3}$) com predomínio de metano (14,77%); no entanto, a composição deste gás no decorrer do processo foi o mais instável, e a operação do sistema de gaseificação foi a mais difícil devido à alimentação manual de biomassa.

Observou-se, na gaseificação da lenha de cafeeiro, menor poder calorífico do gás gerado ($5,45 \text{ MJ m}^{-3}$), com predominância de monóxido de carbono (14,03%). Observou-se composição regular no gás de síntese, porém encontrou-se problemas para estabilizar a temperatura nas zonas de combustão e gaseificação, o que acarreta um mal fornecimento de energia para as zonas de redução e pirólise, prejudicando por sua vez a formação de um gás de síntese de melhor qualidade.

A gaseificação dos cavacos de eucalipto apresentou um poder calorífico médio de ($6,60 \text{ MJ m}^{-3}$), com predominância de monóxido de carbono (19,02%). Observou-se uma composição regular, e melhor desempenho operacional entre as biomassas.

Ao comparar os gráficos de temperatura de reação e da composição do gás de síntese das respectivas biomassas, observa-se que a estabilidade da composição do gás acontece quando as temperaturas das zonas de combustão e gaseificação encontram-se elevadas (aproximadamente 700°C) e estáveis. A temperatura da zona de combustão deve sempre ser maior que a temperatura da zona de gaseificação, uma vez que a zona de gaseificação é basicamente endotérmica, e sua principal reação, a reação de Boudouard, é o caminho principal para a formação de monóxido de carbono, componente principal do gás de síntese proveniente da gaseificação dos cavacos de eucalipto e da lenha do cafeeiro.

A eficiência de conversão termoquímica de biomassa em energia foi satisfatória, apontando para o fato de que todos os resíduos estudados podem ser usados como fonte de energia para o processo de gaseificação.

3.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 8112/83 - Carvão Vegetal, Análise Imediata**. 6p.
- BERGGREN M., LJUNGGREN E., JOHNSON F., 2008. Biomass co-firing potentials for electricity generation in Poland-matching supply and co-firing opportunities. **Biomass and Bioenergy** v 32 p 865-879.
- CZERNIK S., FRENCH R. J. 2006. Production of Hydrogen from Plastics by Pyrolysis and Catalytic Steam Reform. **Energy Fuel**, v.20, p.754-758.
- HIGMAN, C., VAN DER BURGT M. 2008. **Gasification**. Gulf Professional Publishing, Second Edition, 456p.
- LORA E. S., ANDRADE R. V. 2009. Biomass as energy source in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.13, p.777-788.
- PARIKH L, CHANNIWALA S. A., GHOSAL G. K. 2005. A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. **Fuel**, V.84, p. 487-494.
- PARIKH L, CHANNIWALA S. A., GHOSAL G. K. 2007. A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. **Fuel**, V.86, p. 1710-1719.
- RAJAGOPALAN S., DATAR R. P., LEWIS R. S. 2002. Formation of ethanol from carbon monoxide via a new microbial catalyst. **Biomass and Bioenergy**. V 23 p 487 – 493.
- REED T. B., DAS A. 1988. **Handbook of downdraft gasifier engine systems**. Golden, Colo. : Solar Technical Information Program, Solar Energy Research Institute, 140 p.
- SILVA J. N., CARDOSO SOBRINHO J., SAIKI E. T. 2004. Utilização de biomassa na secagem de produtos agrícolas via gaseificação com combustão adjacente dos gases produzidos. **Engenharia Agrícola**, v.24, n.2, doi: 10.1590/S0100-69162004000200020 .
- SONI C. G., WANG Z., DALAI A. K., PUGSLEY T., FONSTAD T. 2009. Hydrogen production via gasification of meat and bone meal in two-stage fixed bed reactor system. **Fuel**, v.88, p. 920-925.
- WANG L., WELLER C. L., JONES D. D., HANNA M. A. 2008. Contemporary issues in thermal gasification of biomass and its application to electricity and fuel production. **Biomass and Bioenergy**. v 32 p 573-581.
- WU C., WILLIAMS P. T. 2009. Hydrogen production by steam gasification of polypropylene with various nickel catalysts. **Applied Catalysis B: Environmental**, v.87, p.152-161.

YOUNESI H., NAJAFPOUR G., MOHAMED A. R. 2005. Ethanol and acetate production from synthesis gas via fermentation processes using anaerobic bacterium, *Clostridium ljungdahlii*. **Biochemical Engineering Journal**, v.27, p.110-119.

ZANATTA F. L., SILVA J. N., TINÔCO I. F. F., OLIVEIRA FILHO D., MARTIN S. 2008. Avaliação do conforto térmico em aviário aquecido com gaseificador de biomassa. **Engenharia na Agricultura**, v. 16, p.270-284.

CONCLUSÕES GERAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

CONCLUSÃO GERAL

Este estudo foi desenvolvido com a finalidade de analisar o potencial de resíduos agrícolas e florestais, em particular resíduos de produção madeireira e cafeeira, no intuito de converter termoquimicamente a energia contida nesta biomassa em um gás combustível por meio do processo de gaseificação.

Inicialmente as biomassas foram analisadas, caracterizadas e quantificadas, objetivando a determinação do potencial energético enquanto combustível sólido. Estes resíduos apresentaram caracterização compatível para utilização via gaseificação, e possuem capacidade de produzir anualmente cerca de 183 PJ de energia, o que corresponde a 11,7% do total da energia elétrica consumida no Brasil em 2007, não considerando a eficiência do processo de conversão energética a ser adotado. Desta forma, fica clara a necessidade de avaliar o processo de gaseificação, como uma alternativa de aproveitamento desta imensa fonte renovável de energia.

O processo de gaseificação ocorreu de forma satisfatória para todos os resíduos analisados, no entanto a gaseificação dos cavacos de eucalipto apresentou melhor desempenho de operação do sistema e menor instabilidade quanto à composição do gás de síntese.

SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

As sugestões seguintes são propostas para aprimorar o estudo realizado neste trabalho:

- i. Estudar os riscos de exposição humana aos gases tóxicos durante o processo gaseificação, monitorando-se a concentração dos mesmos nas vizinhanças do gaseificador;
- ii. Analisar os resíduos do processo de gaseificação (carbono e cinzas) como fonte de nutrientes para correção do solo;
- iii. Analisar os aspectos da produção de alcatrão durante a gaseificação de biomassas;
- iv. Adaptar o sistema de gaseificação e analisar o desempenho do gás de síntese como combustível para geração de energia elétrica;



ANEXOS

Tabela A1 - Dados referentes à gaseificação de cavacos de eucalipto Teste 1

Tempo	Peso kg	T ar °C	Umidade % b.u.	T gás °C	T Z Gas. °C	T Z Comb. °C	P Reator cmH ₂ O	P Filtro cmH ₂ O	Vaz. Ar m ³ /s	Vaz. Gas m ³ /s	Vaz. Comp. m ³ /s	CO ₂ %	CO %	CH ₄ %	H ₂ %	P. Calor. MJ/m ³
00:00	118	20,97	82,09				7,62	5,588	0,00417	0,01923	0,00667	0,62	0,1	0,08	1,18	0,16887
00:05	117	21,17	80,63	52	865		7,62	5,588	0,00311	0,02149	0,00625	4,67	6,11	4,13	2,26	2,499096
00:10	115,7	21,5	80,24	70	812		10,16	9,398	0,00240	0,01923	0,00667	8,08	12,56	11,41	1,48	5,843752
00:15	115,1	21,34	80,69	65	824		9,906	7,366	0,00269	0,01357	0,00542	11,94	16,06	9,36	9,56	6,422907
00:20	114,3	21,64	80,16	40	763		9,652	6,096	0,00099	0,00565	0,00417	11,38	16,03	9,23	9,4	6,355147
00:25	114,2	21,09	80,38	50	775		10,16	5,842	0,00099		0,00417	11,05	16,06	9,14	8,7	6,250977
00:35	114,1	21,53	80,49	44	768		7,62	5,334	0,00099		0,00417	12,81	12,87	10,85	7,6	6,343155
00:50	113,9	21,61	80,16	38	734		5,588	4,318	0,00071		0,00375	11,32	14,93	8,21	7,35	5,628398
01:05	112,3	21,48	80,78	51	892		5,08	7,62	0,00170	0,00792	0,00458	10,68	18,72	8,22	10,9	6,491145
01:20	110,6	21,85	79,41	50	821	1150	7,874	5,08	0,00170	0,00565	0,00458	12,69	17,12	11,13	10,3	7,274518
01:35	108,9	21,99	78,56	77	815	1280	8,128	5,08	0,00170	0,00679	0,00500	10,56	20,14	8,38	12,7	6,926815
01:50	107	22,24	78,69	78	912	1316	7,62	5,08	0,00177	0,00679	0,00583	10,6	19,07	7,16	13,1	6,396787
02:05	105,8	22,18	78,17	88	918	1205	7,112	4,826	0,00191	0,00792	0,00458	10,37	20,06	8,32	12,3	6,85086
02:20	104,8	22,28	77,26	90	918	1233	6,35	4,826	0,00156	0,00565	0,00500	10,32	20,52	8,38	13,4	7,048301
02:35	103	22,28	78,45	87	895	1305	7,112	5,08	0,00156	0,00792	0,00542	11,13	20,76	6,26	15,6	6,551854
02:50	101	22,25	78,1	72	872	1140	5,588	4,572	0,00141	0,00565		11,14	18,58	9,3	12,4	7,026601
03:05	100	21,96	78,45	76	916	1260	5,588	4,572	0,00163	0,00792	0,00500	10,43	18,95	8,46	12,7	6,800889
03:20	99,4	22,34	79,02	75	896	1193	7,112	5,08	0,00156	0,00792	0,00542	10,61	18,82	7,38	12,4	6,36748
03:35	97,9	21,96	78,42	89	933	1255	7,112	7,62	0,00156	0,00792	0,00583	10,37	19,87	7,53	13,6	6,685821
03:50	97	22,12	79,56	89	923	1290	7,112	7,62	0,00148	0,00565		11,57	18,77	8,95	13,3	7,018936
04:05	95	21,85	80,3	92	945	1401	5,334	6,35	0,00156	0,00565	0,00542	8,68	17,26	0,75	9,92	3,521698
04:20	93,8	22,44	79,43	82	895	1130	5,08	7,112	0,00156	0,00679	0,00542	11,29	18,43	7,97	13	6,593826
04:35	93,2	22,37	79,37	110	967	1320	5,842	7,112	0,00184	0,00565		9,41	15,47	0,31	6,5	2,768008

Os dados da composição e poder calorífico do gás de síntese desta tabela referem-se aos valores correspondentes ao respectivo tempo de teste. Para efeitos de cálculo, foram utilizados todos os dados de monitoramento do gás de síntese durante o tempo do teste. Espaços em branco indicam dados não coletados.

Tabela A2 - Dados referentes à gaseificação de cavacos de eucalipto Teste 2

Tempo	Peso kg	T ar °C	Umidade % b.u.	T gás °C	T Z Gas. °C	T Z Comb. °C	T Chama °C	P Reator cmH ₂ O	P Filtro cmH ₂ O	Vaz. Ar m ³ /s	Vaz. Gas m ³ /s	Vaz. Comp. m ³ /s	CO ₂ %	CO %	CH ₄ %	H ₂ %	P. Calor. MJ/m ³
00:00	116,6	22,34	81,73					7,62	7,112	0,00127	0,00860	0,00500	0,43	0,07	0,07	0,68	0,10746
00:15	114,5	23,19	79,97	59	813	868	707	7,112	7,112	0,00085	0,01583	0,00583	12,58	13,13	9,29	10,04	6,079498
00:30	113	23,16	78,68	59	886	1297	803	8,89	7,62	0,00304	0,04524	0,00417	8,97	19,3	7,11	11,33	6,215541
00:45	112,5	24,1	77,04	64	826	1221	773	5,08	3,81	0,00198		0,00375	9,97	20,24	11,2	9,92	7,664938
01:00	110,5	23,41	78,13	62	895	1170	763	6,858	5,08	0,00184	0,00565	0,00292	8,67	21,65	8,53	11,14	7,00178
01:15	109,6	24,05	75,59	51	881	1270	745	5,334	5,08	0,00198	0,00418	0,00333	9	21,32	9,05	11,77	7,214892
01:30	108,4	23,99	76,07	65	886	1218	772	7,874	7,112	0,00198	0,00430	0,00375	8,95	21,14	8,59	11,51	6,998879
01:45	107,5	23,77	76,47	62	710	1122	758	9,906	9,398	0,00212	0,00667	0,00458	9,4	20,27	7,6	12,95	6,689088
02:00	106,5	23,74	76,75	64	874	1244	712	7,62	7,112	0,00177	0,00475	0,00333	9,94	18,91	7,34	11,4	6,256426
02:15	105,4	24,18	75,36	77	963	1200	761	7,62	8,128	0,00198	0,00679	0,00417	8,96	20,76	9,22	10,26	7,042022
02:30	105	23,98	76,53	75	886	1190	765	7,62	7,112	0,00226	0,00746	0,00500	8,61	20,84	9,25	10,12	7,047772
02:45	103,2	23,58	77,55	73	899	1190	771	7,62	9,652	0,00226	0,00486	0,00417	8,98	20,47	8,49	11,45	6,871847
03:00	101,8	23,92	76,72	73	810	1124	763	6,35	9,652	0,00212	0,00543	0,00500	9,4	18,91	8,51	10,56	6,585783
03:15	101	19,14	77,38	64	883	1120	742	7,366	10,16	0,00198	0,00633	0,00417	10,34	18,39	10,2	10,44	7,128338
03:30	100,8	19,14	79,77	63	852	1150	728	6,096	10,16	0,00184		0,00500	9,32	18,78	7,04	10,04	5,985317
03:45	100	19,51	79,11	70	800	1080	762	9,398	12,7	0,00254	0,00882	0,00625	8,95	20,59	10,2	8,99	7,228029
04:00	98,3	19,51	79,44	70	846	1047	783	10,16	16,51	0,00240	0,00803	0,00625	9,57	19,91	9,79	9,21	7,025857
04:15	97,2	19,51	79,4	74	852	1157	771	7,62	12,7	0,00198	0,00385		8,49	19,82	6,67	10,19	6,000047
04:30	96,3	19,14	80,17	62	927	1125	769	7,62	14,224	0,00212	0,00599	0,00500	8,53	21,12	8,67	11,08	6,978613
04:45	96	18,77	80,25	69	867	1132	732	6,858	10,668	0,00191		0,00458	7,35	21,83	7,33	10,94	6,572007
05:00	95,1	19,14	81,84	95	957	1357	771	8,128	10,16	0,00247	0,00385		7	14,67	0,66	7,69	2,921216
05:15	93,5	19,14	80,48	63	853	1100	695	7,62	7,112	0,00177	0,00385		10,45	12,91	3,25	8,54	3,720754

Os dados da composição e poder calorífico do gás de síntese desta tabela referem-se aos valores correspondentes ao respectivo tempo de teste. Para efeitos de cálculo, foram utilizados todos os dados de monitoramento do gás de síntese durante o tempo do teste. Espaços em branco indicam dados não coletados.

Tabela A3 - Dados referentes à gaseificação de cavacos de eucalipto Teste 3

Tempo	Peso kg	T ar °C	Umidade % b.u.	T gás °C	T Z Gas. °C	T Z Comb. °C	T Chama °C	P Reator cmH₂O	P Filtro cmH₂O	Vaz. Ar m³/s	Vaz. Gas m³/s	Vaz. Comp. m³/s	CO₂ %	CO %	CH₄ %	H₂ %	P. Calor. MJ/m³
00:00	117,5	26,84	69,58	48	655	1214	540	6,096	9,906	0,00297	0,01685	0,00667	0,41	0,07	0,14	0,71	0,135837
00:15	115,5	28,02	66,8	52	745	1042	726	5,08	7,62	0,00219	0,01776	0,00667	9,56	13,77	8,64	6,18	5,509832
00:30	113,2	28,63	62	55	759	1130	704	5,08	10,16	0,00177	0,00837	0,00667	9,08	16,79	8,59	8,26	6,098155
00:45	110,6	27,88	63,02	63	791	1077	727	5,08	7,62	0,00177	0,00735	0,00583	13,16	16	18,2	4,36	9,016936
01:00	109,3	29,4	60,16	65	840	1169	750	5,08	9,398	0,00170	0,00826	0,00542	10,86	17,77	11,6	11,24	7,621225
01:15	107,8	28,01	63,7	61	865	1140	724	5,08	10,16	0,00148		0,00583	10,96	17,49	9,45	11,26	6,819577
01:35	107	29,48	59,83	57	861	1181	735	5,588	15,24	0,00170		0,00708	10,6	17,18	7,76	10,81	6,124937
01:55	106	30,2	60,11	62	835	1183	725	5,08	13,97	0,00148	0,00724	0,00667	10,43	17,68	7,88	10,63	6,211741
02:15	104,8	28,36	62,66	61	879	1220	683	5,08	17,018	0,00134	0,00758	0,00708	10,57	18,81	8,57	12,17	6,768672
02:35	103	29,02	61,04	64	863	1225	765	5,08	16,256	0,00170	0,01040	0,00667	10,84	17,48	7,25	11,46	6,049943
02:55	102,4	27,89	66,39	58	883	1260	745	5,08	19,05	0,00141		0,00708	10,03	17,35	4,85	12,06	5,236557
03:15	100,8	26,4	72,4	64	818	1018	758	2,54	20,32	0,00120	0,01040	0,00792	10,63	17,56	10,7	9,45	7,092457
03:30	100	23,83	78,92	60	871	1163	770	5,334	22,098	0,00120		0,00792	9,91	18,26	5,24	11,8	5,463463
03:45	97,5	23,76	77,94	70	857	1126	740	6,35	21,336	0,00170		0,00833	10,65	17,54	6,12	12,07	5,717675
04:00	95,2	23,21	80,4	58	863	1176	745	5,588	15,24	0,00156	0,00882	0,00708	11,69	14,84	5,56	11,35	5,097699
04:15	93,8	24,75	77,42	95	882	1175	744	6,096	17,018	0,00177	0,00724	0,00708	7,66	17,16	1,08	9,61	3,594064
04:30	93,3	25,14	78,03	150	1017	950	633	5,08	10,16	0,00198		0,00583	9,3	12,82	0,22	5,75	2,319875

Os dados da composição e poder calorífico do gás de síntese desta tabela referem-se aos valores correspondentes ao respectivo tempo de teste. Para efeitos de cálculo, foram utilizados todos os dados de monitoramento do gás de síntese durante o tempo do teste.

Espaços em branco indicam dados não coletados.

Tabela A4 - Dados referentes à gaseificação de palha de café

Tempo	Peso kg	T ar °C	Umidade % b.u.	T gás °C	T Z Gas. °C	T Z Comb. °C	T Chama °C	P Reator cmH ₂ O	P Filtro cmH ₂ O	Vaz. Ar m ³ /s	Vaz. Gas m ³ /s	Vaz. Comp. m ³ /s	CO ₂ %	CO %	CH ₄ %	H ₂ %	P. Calor. MJ/m ³
00:00	83,3	25,04	77,35					6,35	7,112	0,00360	0,01052	0,00750	0,36	0,1	0,13	0,7	0,134956
00:15	81,5	24,53	79,9	44	697	797	670	5,08	4,826	0,00134		0,00417	15,01	9,05	10,29	4,28	5,300734
00:30	82,6	24,49	78,6	46	489	698	665	2,54	0,508	0,00071	0,00430	0,00208	13,49	11,6	19,1	5,49	8,917146
00:45	82,1	25,65	76,63	46	573	702	524	4,318	2,54	0,00078		0,00375	13,06	15,11	27,58	1,99	12,02737
01:00	82,8	26,31	76,18	57	694	792	618	4,064	2,032	0,00064		0,00667	13,1	16,25	27,11	2,92	12,10311
01:15	82,6	27,33	73,48	67	654	635	648	4,572	2,54	0,00078		0,00333	15,59	13,85	13,03	4,9	6,957996
01:30	82	27,35	74,26	62	679	703	731	2,54	1,778	0,00092		0,00250	12,73	12,47	22,29	6,23	10,25249
01:45	81,8	27,07	73,36	59	661	698	655	2,54	1,016	0,00106	0,00679	0,00250	11,96	17,53	20,3	8,24	10,39434
02:00	83	27,51	72,75	70	736	832	698	2,54	1,016	0,00148		0,00208	11,36	14,36	12,7	5,99	7,021711
02:15	82,5	26,9	76,19	60	790	800	665	2,54	1,778	0,00120	0,00611	0,00208	11,98	17,16	19,19	14,95	10,6741
02:30	84	26,6	77,61	61	537	690	553	3,556	2,54	0,00078		0,00292	13,89	14,29	29,57	5,4	13,00684
02:45	82,5	27,02	76,37	65	745	857	700	2,54	1,778	0,00134		0,00208	5,28	19,48	0,97	7,15	3,581819
03:00	82	26,19	79	44	774	860	265	2,54	2,032	0,00148		0,00250	9,72	8,63	0,49	2,6	1,547122

Os dados da composição e poder calorífico do gás de síntese desta tabela referem-se aos valores correspondentes ao respectivo tempo de teste. Para efeitos de cálculo, foram utilizados todos os dados de monitoramento do gás de síntese durante o tempo do teste.

Espaços em branco indicam dados não coletados.

Tabela A5 - Dados referentes à gaseificação de lenha de cafeeiro

Tempo	Peso kg	T ar °C	Umidade % b.u.	T gás °C	T Z Gas. °C	T Z Comb. °C	T Chama °C	P Reator cmH ₂ O	P Filtro cmH ₂ O	Vaz. Ar m ³ /s	Vaz. Gas m ³ /s	Vaz. Comp. m ³ /s	CO ₂ %	CO %	CH ₄ %	H ₂ %	P. Calor. MJ/m ³
00:00	112,5	23,71	77,45									0,00833	0,16	0,03	0,1	0,75	0,120743
00:15	109	25,03	73,25	36	80,4	812	36	5,08	5,08	0,00318		0,00667	12,64	8,84	4,07	9,48	3,602621
00:30	108	26,28	70,92	43	885	1030	615	5,08	5,08	0,00170		0,00333	16,69	8,25	12,95	10,88	6,868029
00:45	107,5	25,51	72,21	53	846	918	645	3,81	2,54	0,00148		0,00292	11,41	15,45	12,76	13,25	7,965471
01:00	106,5	25,38	73,44	45	823	826	595	2,29	1,52	0,00156		0,00417	11,75	12,77	7,14	12,77	5,556995
01:15	105,5	26,16	71,59	53	819	813	650	2,79	2,54	0,00163		0,00333	11,21	12,46	10,33	9,87	6,349934
01:30	105	25,7	72,11	50	763	891	519	2,54	2,54	0,00177		0,00375	11,38	13,09	8,45	10,94	5,870069
01:45	104,5	26,09	69,63	53	813	955	543	2,03	2,03	0,00134		0,00375	9,93	14,33	6,73	11,27	5,444753
02:00	104	26,3	70,16	52	820	906	666	2,03	2,54	0,00156		0,00333	11,36	15,04	3,95	13,34	4,75988
02:15	103,5	25,93	72,38	57	902	938	610	2,54	2,03	0,00156		0,00542	9,73	14,24	3,35	12,53	4,355839
02:30	102,5	26,56	73,98	62	930	1053	645	7,62	9,40	0,00269	0,01007	0,00333	9,84	13,48	6,12	12,11	5,209104
02:45	101,5	26,88	69,91	61	837	945	697	5,08	4,57	0,00177		0,00708	9,93	16,28	6,13	14,84	5,861419
03:00	100,5	27,52	70,51	85	920	960	783	10,16	10,92	0,00283		0,00583	9,37	14,45	5,83	13,33	5,359342
03:15	99,5	27,22	68,73	90	905	1105	714	6,35	7,11	0,00205		0,00625	11,4	12,29	4,94	14,68	4,91277
03:30	97,5	27,52	74,19	94	930	860	730	7,11	7,37	0,00226	0,01040	0,00542	10,02	14,38	5,39	16,02	5,483184
03:45	96	27,9	72,24	90	882	1172	630	7,62	7,62	0,00247	0,00679	0,00583	10,75	9,13	2,96	10,56	3,35738
04:15	94,5	26,91	70,25	70	857	867	122	7,62	8,89	0,00262		0,00833	11,01	7,31	0,58	5,71	1,748753

Os dados da composição e poder calorífico do gás de síntese desta tabela referem-se aos valores correspondentes ao respectivo tempo de teste. Para efeitos de cálculo, foram utilizados todos os dados de monitoramento do gás de síntese durante o tempo do teste.

Espaços em branco indicam dados não coletados.