

FABIO LUIZ ZANATTA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM GASEIFICADOR DE BIOMASSA E
ESTUDO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM RESÍDUOS
AGRÍCOLAS E DA AVICULTURA**

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

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011**

FABIO LUIZ ZANATTA

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM GASEIFICADOR DE BIOMASSA E
ESTUDO DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM RESÍDUOS
AGRÍCOLAS E DA AVICULTURA**

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

APROVADA: 06 de maio de 2011.

Prof^ª. Cecília de Fátima Souza
(Co-orientador)

Prof. Roberto Precci Lopes

Prof. Paulo Marcos de Barros
Monteiro

Prof. Samuel Martin

Prof. Jadir Nogueira da Silva
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

À DEUS.

À Universidade Federal de Viçosa – UFV, em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola, bem como a todos os funcionários que nos acolhem com amizade e boa vontade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsas de estudos.

Ao Leibniz Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB) pelo acolhimento durante o intercâmbio.

Ao professor Jadir Nogueira da Silva, pelo incentivo, orientação, ensinamentos, exemplo e confiança.

Ao Pesquisador Dr. Volkhard Scholz, do ATB, pelos sábios e valiosos ensinamentos, pela amizade e confiança.

Aos professores co-orientadores Ilda de Fátima Ferreira Tinôco, Cecília de Fátima Souza, Márcio Arêdes Martins, pelo apoio e pelas sábias e oportunas sugestões.

Aos Professores Juarez de Souza e Silva e Adílio Flauzino de Lacerda Filho e ao Dr. Sérgio Maurício Lopes Donzeles pelas valiosas sugestões, apoio e principalmente amizade.

À Professora Angela Pinto Maestrini, pelo interesse gerado pela área de ensino e pesquisa, fundamental na escolha da profissão.

À Daniela, sempre presente, agradeço pelo amor, convivência, paciência e principalmente compreensão, além das sugestões sempre pertinentes e companheirismo.

À família, Chico, Nira e Edi, base de tudo, que sempre depositam amor, confiança, segurança, e os mais verdadeiros desejos de felicidades, além dos conselhos e orientações.

Aos amigos Samuel, Jofran, Conceição, Neiton, Akemi, Marcus, Svetlana, Cássio, Juliane, Douglas, Carlos, Daniel, Flávio, Irene, Maria Clara, Débora, Paulinho, Edney, Edinei, Reginaldo, Ampessam, Ivanildo, Marcelo, Michel e João Guilherme presentes em todos os momentos, pela ajuda constante, amizade, pelos conselhos e principalmente pelo convívio amigo.

Aos coados André, Jocleita, Eber, Washington, Tininha, David, Marcelo, Silvane, Lucas, Mateus, Donda, Franceline e Sara pelos prazerosos almoços e tardes de domingo, pela amizade e bons conselhos.

Ao pessoal que passou pela República Tchê, Adelião, Cláudia, Sufiati, Índia, Beno, Marcelo, André, Galon e família, Clério, Steferson, Fabrizio e Letícia, pela amizade, companheirismo, ajuda e conselhos.

Aos amigos e colegas da área de Energia, Armazenamento e do núcleo de estudos do Ambiagro, sempre presentes, agradeço pela excelente companhia, amizade e apoio.

Aos funcionários e colaboradores da área de armazenamento, em especial ao Sebastião, Edson, José Eustáquio, Hamilton, Geraldo e Carlos, pelo auxílio e disponibilidade.

E a todos aqueles (familiares, amigos, professores, colegas...) que desde o princípio vem contribuindo de alguma forma para a realização de meus objetivos, à todos muito obrigado.

BIOGRAFIA

FÁBIO LUIZ ZANATTA, filho de Luiz Valdir Zanatta e Ivanira Zanatta, nasceu em 12/09/1981, na cidade de Tapejara, Estado do Rio Grande do Sul.

Em março de 2000, ingressou no Curso de Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Pelotas – UFPel, RS, concluindo em março de 2005.

Nesse mesmo período iniciou o curso de Pós-Graduação (Mestrado) em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa - UFV, MG, com concentração na área de Construções Rurais e Ambiente, defendendo a dissertação em Fevereiro de 2007.

Em março de 2007 iniciou o Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola pela mesma Universidade (UFV), com período sanduíche no Leibniz-Institut für Agrartechnik Potsdam-Bornim e.V. (ATB), de abril a novembro de 2010, finalizando o doutoramento em maio de 2011.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO	vii
ABSTRACT.....	ix
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	3
CAPITULO 1. Desenvolvimento e avaliação de um sistema de gaseificação de biomassa para aquecimento de aviários e secagem de produtos agrícolas.....	5
1.1 INTRODUÇÃO.....	5
1.2 REVISÃO DE LITERATURA.....	6
1.3 OBJETIVOS.....	11
1.3.1 Objetivo geral.....	11
1.3.2 Objetivos específicos	11
1.4 MATERIAL E MÉTODOS.....	11
1.4.1 Dimensionamento do gaseificador e do combustor de gases.....	11
1.4.2 Construção do gaseificador	18
1.4.3 Sistema de controle da temperatura (automação).....	24
1.4.4 Determinação da Umidade	26
1.4.5 Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI) da madeira.....	26
1.4.6 Poder Calorífico Inferior (PCI _g) do gás de síntese	27
1.4.7 Temperatura, umidade relativa, vazão e energia elétrica	28
1.4.8 Análise dos gases.....	29
1.4.9 Eficiência térmica e global do sistema	29
1.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31

1.5.1 Dimensionamento	31
1.5.2 Umidade, Poder Calorífico e Cinzas	33
1.5.3 Desempenho do sistema	34
1.5.4 Problemas encontrados na operação do gaseificador de biomassa e sugestões para trabalhos futuros.....	52
1.6 CONCLUSÕES.....	53
1.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

CAPÍTULO 2. Produção de metano usando cama de aviário com vistas a suprir as necessidades energéticas do período de aquecimento na produção de frangos de corte

2.1 INTRODUÇÃO.....	56
2.2 REVISÃO DE LITERATURA.....	57
2.2.1 O processo de biodigestão anaeróbia.....	57
2.2.2 O Biogás	59
2.2.3 Biodigestores	60
2.2.4 Substratos	61
2.2 OBJETIVOS.....	62
2.2.1 Objetivo geral.....	62
2.2.2 Objetivos específicos	63
2.3 MATERIAL E MÉTODOS.....	63
2.3.1 Local do experimento e caracterização dos substratos	63
2.3.2 Descrição do sistema utilizado.....	65
2.3.3 Preparo dos substratos	66
2.3.4 Determinação da produção e qualidade do biogás	67
2.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	67
2.4.1 Caracterização dos substratos.....	67
2.4.2 Produção de biogás	69
2.4.3 Análise da demanda de energia para o período de aquecimento de frangos de corte e potencial de geração de energia em aviários.....	76
2.5 CONCLUSÕES.....	82
2.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83

RESUMO

ZANATTA, Fábio Luiz, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Maio de 2011.
Desenvolvimento e avaliação de um gaseificador de biomassa e estudo do potencial de produção de biogás com resíduos agrícolas e da avicultura.
Orientador: Jadir Nogueira da Silva. Co-orientadores: Ilda de Fátima Ferreira Tinôco, Cecília de Fátima Souza, Marcio Arêdes Martins e Volkhard Scholz.

Com o objetivo de desenvolver soluções alternativas para aquecimento de ar, que pode ser usado para o condicionamento térmico de aviários, secagem de produtos agrícolas e desidratação de frutas, foram estudadas a gaseificação de biomassa e a biodigestão anaeróbia de cama de aviário, esterco de galinhas, palha de trigo e silagem de centeio. O trabalho encontra-se dividido em dois capítulos, sendo que no primeiro foi desenvolvido e avaliado um gaseificador de biomassa de fluxo contracorrente, com automação, alimentado com lenha de eucalipto de diferentes dimensões (tocos com 15, 50 e 100 cm de comprimento, além de chips). O gaseificador foi dimensionado e então construído e avaliado na Área de Armazenamento do DEA/UFV. Foram estudados: perfil de temperatura no interior do gaseificador, a composição do gás de síntese, a concentração de CO no ar quente de saída do ventilador, o fator de ar e a eficiência global do sistema. De acordo com os resultados obtidos, o melhor PCI médio do gás de síntese (5,66 MJ/m³) foi observado na avaliação dos tocos de lenha de eucalipto com 15 cm de comprimento. Os chips de lenha de eucalipto apresentaram a menor concentração média de CO no ar quente na saída do ventilador (197,7 ppm) e a melhor eficiência global do sistema (95,4%). O gaseificador foi capaz de gerar gás de síntese utilizando lenha com as diferentes dimensões estudadas. O sistema automático funcionou perfeitamente, e o uso do ar quente gerado em aplicações diretas deve ser feito respeitando-se os limites máximos de concentração de CO para a atividade avícola. No segundo capítulo foi pesquisado o potencial de produção de

biogás utilizando cama de aviário e combinações entre a cama de aviário, palha de trigo, esterco de galinhas e silagem de centeio, com vistas a substituir as fontes convencionais de energia no aquecimento do ambiente interno de aviários. A pesquisa com biogás foi realizada no laboratório “Biogastechnikum” do ATB em Potsdam na Alemanha, de Maio a Novembro de 2010, de acordo com a norma Alemã VDI 4630. Foram montados três experimentos em batelada. De acordo com os resultados encontrados, a maior produção média de biogás e metano foi com palha de trigo, com produção de $518,44 \text{ l}_{\text{Nbiogás}}/\text{kg}_{\text{ST}}$ e $272,73 \text{ l}_{\text{Nmetano}}/\text{kg}_{\text{ST}}$, respectivamente. Das combinações testadas, a mistura de 74% de ST da cama de aviário e 26% de ST da palha de trigo proporcionou bons resultados de produção de biogás ($419,77 \text{ l}_{\text{Nbiogás}}/\text{kg}_{\text{ST}}$ e $244,83 \text{ l}_{\text{Nmetano}}/\text{kg}_{\text{ST}}$). Pela análise do consumo e custo dos combustíveis GLP e lenha, usados no aquecimento de aviários, observou-se que a substituição destes pelo uso de biogás é viável. De acordo com os resultados, foi possível concluir que a produção de biogás a partir da cama de aviário, esterco de galinhas, palha de trigo e suas combinações é viável. Observou-se também que, quanto maior a proporção de palha de trigo na mistura, maior a produção de biogás. Além disso, concluiu-se que apenas 25% da cama produzida em um aviário de 18000 aves seria suficiente para gerar a energia necessária no período de aquecimento dos pintainhos, restando até 75% da cama de frangos para outras finalidades.

ABSTRACT

ZANATTA, Fábio Luiz, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May of 2011.

Development and evaluation of a biomass gasifier and investigation of biogas production potential with agricultural and poultry wastes. Adviser: Jadir Nogueira da Silva. Co-Advisers: Ilda de Fátima Ferreira Tinôco, Cecília de Fátima Souza, Marcio Arêdes Martins and Volkhard Scholz.

In order to develop alternatives for heating air, which can be used for the thermal conditioning of poultry houses, drying of agricultural products and dehydration of fruits, the biomass gasification and anaerobic digestion of poultry litter, chicken manure, wheat straw and rye silage were studied. The work is divided into two chapters, the first being the development and evaluation of an automated updraft biomass gasifier, supplied with eucalyptus firewood of different sizes (logs measuring 15, 50 and 100 cm in length, and eucalyptus firewood chips). The gasifier was designed and then built and evaluated in Agricultural Storage Area of the DEA/UFV. Factor studies was temperature profile inside the gasifier, synthesis gas composition, CO concentration in the hot air from the fan outlet, air factor and overall system efficiency. According to the results, the best average of HHV (higher heating value) measured in the synthesis gas ($5.66 \text{ MJ} / \text{m}^3$) was observed when using eucalyptus logs measuring 15 cm in length. The eucalyptus firewood chips had the lowest average concentration of CO in the warm air fan outlet (197.7 ppm) and the best overall system efficiency (95.4%). The gasifier was capable of generating synthesis gas using firewood with different studied dimensions. The automatic system worked perfectly, and the use of hot air generated in direct applications must respect the maximum CO concentration for poultry activities. The second chapter investigated the potential biogas production using poultry litter and combinations of poultry litter, wheat straw, chicken manure and rye silage, with the objective of replacing conventional sources of energy in poultry heating systems. The study was conducted in the biogas laboratory "Biogastechnikum" of the ATB in Potsdam-Germany, from May to November of 2010, according to German Standard

VDI 4630. Three experiments were set up in batches. According to results, the highest average production of biogas and methane was with wheat straw, obtaining a production of $518.44 \text{ l}_{\text{Nbiogas}}/\text{kg}_{\text{TS}}$ and $272.73 \text{ l}_{\text{Nmethane}}/\text{kg}_{\text{TS}}$, respectively. Regarding the combinations tested, the mixture of 74% TS of poultry litter and 26% of TS of wheat straw provided good results of biogas production ($419.77 \text{ l}_{\text{Nbiogas}}/\text{kg}_{\text{TS}}$ and $244.83 \text{ l}_{\text{Nmethane}}/\text{kg}_{\text{ST}}$). From the analysis of consumption and costs of LPG and firewood fuels, used for the heating of poultry houses, it was observed that these may be replaced by biogas. According to results, it was concluded that biogas production from poultry litter, chicken manure, wheat straw and their combination is feasible. It was also observed that the higher proportion of wheat straw in the mix resulted greater biogas production. Moreover, it was concluded that only 25% of the poultry litter produced in an aviary with 18,000 birds would be sufficient to generate the energy needed for poultry house heating, where 75% of poultry litter would remain for other purposes.

INTRODUÇÃO GERAL

A atividade avícola é uma das mais importantes do setor agropecuário Brasileiro, responsável por grande geração de emprego e renda no meio rural. Desde 2004 o Brasil é líder nas exportações mundiais de carne de frango. Entre os fatores que levaram a conquistar essa posição estão a qualidade e a sanidade do produto brasileiro (THOMAS et al, 2007).

No Brasil, segundo estudo do Ministério da Agricultura sobre as tendências do setor agropecuário para os próximos dez anos, haverá uma expansão de 44,7% na produção de carnes, sendo que o aumento relativo mais expressivo se dará na carne de frango (BRASIL, 2007).

Em escala mundial, a produção de carne de frangos de corte foi à atividade agropecuária que mais cresceu nas últimas duas décadas, sendo que no Brasil especificamente a produção saltou de 2,356 milhões de toneladas em 1990 para 12,312 milhões de toneladas em 2010 (AVISITE, 2011). Dessa forma, estima-se que o crescimento da avicultura brasileira continue intenso, assim como a responsabilidade frente às questões de sustentabilidade da produção, com foco nos aspectos sociais, na preservação ambiental, no bem estar animal, na segurança alimentar e na qualidade do produto que chega à mesa do consumidor (BELLAVÉR, 2007).

Com isso, torna-se evidente a importância da indústria avícola para a economia nacional, onde deve-se trabalhar para manter os bons índices do setor, criando alternativas para melhorar a qualidade, diminuindo os custos e promovendo um desenvolvimento sustentável da cadeia sem agredir o meio ambiente.

Diante disso, busca-se criar alternativas para realizar o aquecimento dos aviários, visto que em torno de 15 a 30% dos custos totais de produção de frangos para o produtor integrado, são atribuídos ao processo de aquecimento do aviário, dependendo da região, tipo de equipamento e época do ano (UBA, 2008).

Isso se explica pelo fato que nos primeiros dias de vida o sistema termorregulador dos pintainhos não está totalmente desenvolvido, sendo necessário dar condições de conforto para que mantenham a temperatura corporal ideal. Por isso, apenas algumas horas

de estresse por frio podem levar a desuniformidade do lote, atraso no crescimento, queda nos consumos de água, de ração e no ganho de peso (Silvestinni, 2001 citado por FERREIRA, 2004). Desse modo, a avicultura comercial brasileira adotou o aquecimento artificial dos aviários até a segunda ou terceira semana de vida das aves, dependendo das condições climáticas.

Para realizar o aquecimento das instalações, os produtores brasileiros utilizam como combustível principalmente lenha e gás liquefeito de petróleo (GLP). O aquecimento pode ser central, geralmente quando se usa fornalha a lenha onde todo o ambiente do aviário é aquecido, ou localizado, quando se aquece áreas específicas dentro do aviário, utilizando-se para isto campânulas a GLP.

A forma de aquecimento pode ser direta, quando o calor da queima do combustível é aproveitado de forma integral, ou indireta, quando se usa algum tipo de trocador de calor. A quantidade de energia envolvida no aquecimento de aviários depende do tamanho da instalação e da quantidade de aves alojadas, além da qualidade do isolamento térmico, manejo das cortinas e condições climáticas locais (ZANATTA et al, 2009).

Na tentativa de utilizar formas não convencionais de aquecimento, aquecedores de diferentes formas foram sendo criados e utilizados pelos criadores com o objetivo de fornecer calor as aves nas primeiras semanas de vida e, com isso, propiciar o conforto térmico necessário ao bom desenvolvimento da criação, de modo que sejam, cada vez mais, eficientes e funcionais. Em pesquisas realizadas na área, BREWER e DUNN (1975) estudaram o potencial de conversão e utilização de energia solar na produção de frangos. REECE (1981) dimensionou, construiu e testou um sistema de aquecimento combinando energia solar com os sistemas convencionais de aquecimento para aves a base de propano. SUMMERS (1985) pesquisou o aquecimento do piso fazendo circular água quente no interior de tubos de polietileno instalados sob a cama. LUCAS JR e SANTOS (2000) realizaram estudos sobre a viabilidade do uso de biogás gerado pelos resíduos avícolas para aquecimento de instalações para aves. WIMBERLY (2003) desenvolveu uma fornalha para operar com cavacos de madeira (chips), pellets, cama de aviário e serragem de forma totalmente automatizada. FERREIRA (2004) desenvolveu uma fornalha de fogo direto a base de carvão vegetal para realizar o aquecimento de aves. ZANATTA (2007) testou o uso de gaseificador de biomassa, alimentado com lenha de eucalipto, no aquecimento do ambiente interno de um aviário comercial, obtendo até 35% de economia de lenha com a manutenção dos índices de produção.

Com base no exposto, é de suma importância o desenvolvimento de alternativas às formas tradicionais de aquecimento de ambientes, com o objetivo de inserir cada vez mais energias renováveis no setor avícola, além da busca pela diminuição dos custos associados ao aquecimento de aviários.

Desta forma, nessa pesquisa o objetivo foi desenvolver soluções alternativas para a realização de aquecimento de ar, que pode ser utilizado para o aquecimento do ambiente interno de aviários, além de atividades como a secagem de produtos agrícolas e desidratação de frutas. Para isso, foram estudadas a gaseificação de biomassa e a biodigestão anaeróbia.

Assim, no primeiro capítulo deste trabalho, tem-se o desenvolvimento e avaliação de um gaseificador de biomassa, de fluxo contracorrente, alimentado por lenha de eucalipto, com a combustão adjacente dos gases gerados pela gaseificação, gerando assim ar quente para operações agroindustriais.

Já no segundo capítulo, foi estudada a biodigestão anaeróbia da cama de aviário e dos componentes que constituem a cama (palha de trigo e o esterco de galinhas), além da misturas desses componentes, com o objetivo de produzir biogás a partir dos resíduos da atividade avícola, podendo este ser usado para a geração de ar quente para o aquecimento dos próprios aviários, além de outras formas de aproveitamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AVISITE, Estatísticas e preços. Disponível em: <<http://www.avisite.com.br/>>. Acesso em 08/04/2011.

BELLAVER, C. Visão do produtor de rações sobre a qualidade dos grãos destinados à produção de carne de frangos. 2003. Disponível em: <http://www.cnpsa.embrapa.br/sgc/sgc_artigos/artigos_k1j39s5j.html>. Acesso em 19/01/2007.

BRASIL, 2007 – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Projeções do Agronegócio: Mundial e Brasil até 2016/2017. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>. Acesso em 22/01/2007.

BREWER, R. N. e DUNN, J. R. Potential for conversion and utilization of solar energy in poultry production. **Nat. Sci. Found. Rep.** 74-23987/PR/74/4. 1975.

FERREIRA, W. P. M. **Avaliação de uma fornalha a carvão vegetal para aquecimento de aviário.** 2004. 137 p. Tese (Doutorado Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

LUCAS JR, J. e SANTOS, T. M. B. Aproveitamento de resíduos da indústria avícola para produção de biogás. In: Simpósio sobre resíduos da produção avícola. **Anais...** Concórdia, 2000. 27-43p.

- REECE, F. N. Use of solar energy in poultry production. **Poultry Science**. v.60. p911-916. 1981.
- SUMMERS, A. J. El calentamiento de piso reduce los costos de cria. **Indústria avícola**, v.23, n.7, 1985, p.26-29.
- THOMAS, J. A.; SULZBACH, T. M.; HOFER, E. Avicultura: uma alternativa de renda ao setor agropecuário. **Ciências Sociais Aplicadas em Revista**. V.7 Nº13. P65-82.2007.
- UBA – União Brasileira de Avicultura. Estatísticas. Disponível em: <<http://www.uba.org.br/estatisticas> >. Acesso em 01/12/2008.
- ZANATTA, F. L. Gaseificador de biomassa no aquecimento de aviários e sua relação com conforto térmico, qualidade do ar e desempenho produtivo de frangos de corte. 2007, 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2007.
- ZANATTA, F. L.; SILVA, J. N. da; TINÔCO, I. de F. F.; MARTIN, S.; BEZERRA, M. da C. T. Consumo de energia e custos no aquecimento de aviários. SIMCRA 2009. **Anais...** Campina Grande-PB. 2009.
- WIMBERLY, J. Commercialization of Biomass Direct-fired Heating Systems. Final Report. Foundation for Organic Resources Management. 75p. 2003. Disponível em: <<http://biomass2.com/furnaces/CVP%20final%20report.pdf>>. Acesso em 19/01/2009.

CAPITULO 1. Desenvolvimento e avaliação de um sistema de gaseificação de biomassa para aquecimento de aviários e secagem de produtos agrícolas

1.1 INTRODUÇÃO

Em virtude do aquecimento global, muitas medidas estão sendo tomadas a fim de amenizar e diminuir as possíveis causas desse fenômeno. Todos estão buscando formas alternativas de energia, que venham substituir os combustíveis fósseis, principais emissores de carbono na atmosfera e que contribuem significativamente para o efeito estufa e, conseqüentemente, para o aquecimento global.

Uma das principais formas encontradas para a redução das emissões de gases que contribuem com o efeito estufa consiste em substituir as fontes não renováveis de energia por fontes renováveis, como o uso de resíduos, energia solar e biocombustíveis.

Energias renováveis podem também ser obtidas através de processos termoquímicos (caracterizam-se por temperaturas elevadas) compreendendo desde a combustão mais simples até sofisticados processos de pirólise para eventual produção de combustíveis líquidos, onde a madeira (lenha) é o principal combustível usado (NOGUEIRA et al. 2000).

O clima tropical, a grande extensão territorial e a vantagem de uma árvore crescer em média cinco vezes mais rápido em países de clima tropical ou subtropical do que em países com clima temperado ou frio, fazem do Brasil, país este com grande extensão territorial, um local adequado para utilizar a biomassa na produção de energia. Além disso, durante o crescimento, as árvores podem seqüestrar até 12 ton de carbono/ano/ha, dependendo da densidade de plantio, podendo assim, o reflorestamento trazer renda extra com a comercialização de créditos de carbono (CARBONO BRASIL, 2007).

Além dessas preocupações, a eficiência energética dos processos deve ser levada em conta, pois sistemas energeticamente mais eficientes geram menos poluição e tem menor custo. A eficiência energética pode ser entendida como a diminuição dos custos e eliminação de desperdícios sem perda da qualidade de produtos e serviços. Uma ferramenta fundamental para atingir este objetivo é a implementação de programas e políticas de conservação e uso racional da energia, a serem estabelecidos através da introdução de novas tecnologias e mudanças de hábitos de consumo.

Nesse contexto, a gaseificação da biomassa torna-se uma interessante alternativa, pois, dentre as técnicas de conversão de energia que utilizam a biomassa, a gaseificação

apresenta muitas vantagens devido a conversão da mesma em um gás combustível, o que a torna um processo mais eficiente em relação aos demais quando o objetivo é a geração de ar quente livre de impurezas, necessário em várias operações das atividades agroindustriais.

Assim, a utilização de reatores para gaseificação de biomassa, acoplados a combustores do gás produzido, para aquecimento de galpões avícolas é uma alternativa ao aquecimento de aviários, na cadeia produtiva de frangos de corte, suprimindo as necessidades mencionadas anteriormente. A utilização do sistema de gaseificação se baseia na hipótese desta tecnologia poder representar, ao avicultor, redução no custo de produção, comparativamente aos sistemas tradicionais de aquecimento de galpões avícolas, aliando-se a eficiência energética dos gaseificadores com o custo reduzido do combustível utilizado.

Testes realizados em aviários com aquecimento feito por gaseificador de biomassa indicam uma economia de combustível (lenha de eucalipto) de até 35% em comparação as fornalhas de fogo indireto, tradicionalmente utilizado. Além da economia de lenha, foi também observado bom desempenho produtivo das aves (ZANATTA, 2007).

Além do uso em aviários, outra forma de aproveitar o calor gerado pela gaseificação é com a secagem de produtos agrícolas, tradicional tarefa agrícola que demanda grandes quantidades de calor para extrair a água em excesso contida nos grãos e sementes após a colheita.

Para o aquecimento do ar utilizado na secagem de produtos agrícolas, normalmente são utilizados dispositivos como as fornalhas que queimam lenha e os queimadores de gás. No Brasil, as fornalhas a fogo indireto têm sido as mais usadas pelos cafeicultores na secagem do café. Estas fornalhas produzem ar quente próprio para a secagem, visto que o ar é isento de impurezas e odores, porém apresentam baixa eficiência térmica e, muitas vezes, danos térmicos às grelhas e aos trocadores de calor. Já as fornalhas a fogo direto, mais usadas para a secagem de grãos como soja e milho, apresentam a vantagem de ser de fácil construção e apresentarem maior eficiência térmica, porém o ar quente para secagem pode conter partículas e odores, os quais podem alterar a qualidade final do produto (principalmente o café), desvalorizando o produto (MARTIN, 2005).

1.2 REVISÃO DE LITERATURA

A gaseificação é definida como a conversão da biomassa ou de qualquer combustível sólido, em gás energético, através da oxidação parcial a temperaturas elevadas. Segundo CORTEZ e LORA (1997), gaseificação é o aquecimento da biomassa na presença de oxidante (ar ou O₂) em quantidades menores do que a estequiométrica,

obtendo-se um gás combustível composto de CO, H₂, CH₄ e outros. Deste gás, utilizando-se catalizadores, pode-se obter adicionalmente metano, metanol, hidrogênio e amônia.

A tecnologia da conversão de material orgânico em gás combustível teve origem nas últimas décadas do século XVIII, sendo a forma mais antiga chamada de destilação seca, ou seja, o aquecimento do combustível em uma retorta com atmosfera isenta de oxigênio. Outro método de gaseificação, desenvolvido nessa época, foi o chamado gaseificador a contracorrente, projetado por Bishoff em 1839. Este desenho foi modificado por Siemens em 1857 e utilizado por toda Europa pelos 100 anos seguintes. No final do século passado muito esforços foram direcionados ao desenvolvimento de gaseificadores, o que levou ao aprimoramento da gaseificação e ao rápido crescimento da indústria de manufatura de gás nos países em industrialização, conseqüentemente, a larga utilização do carvão na área industrial. Porém, com o surgimento das linhas de distribuição de gás natural e a substituição em larga escala por combustíveis derivados do petróleo, os sistemas de gaseificação foram esquecidos. Renascendo na 2ª Guerra Mundial, devido à escassez de combustíveis líquidos na Europa, nessa época foram desenvolvidas técnicas de conversão de motores de ignição para operarem com gases combustíveis e pequenos gaseificadores, chamados de gasogênios. Com o fim da 2ª Guerra Mundial, eles voltaram ao esquecimento, com exceção de alguns países em desenvolvimento. Sendo assim, a gaseificação do carvão é uma tecnologia já desenvolvida comercialmente, principalmente, em países europeus com boa oferta de carvão e escassez de petróleo.

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

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

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

técnica do uso de briquetes de casca de eucalipto para aquecimento de ar, em um reator de gaseificação de fluxo concorrente acoplado a uma câmara para combustão dos gases produzidos, concluindo que o processo de gaseificação/combustão usando apenas briquetes de cascas de eucalipto ou a mistura destes com lenha, com um fator de ar médio de 43% é capaz de gerar ar quente, limpo, isento de fumaças e impurezas, com uma eficiência global maior que 70%. ZANATTA (2007) avaliou o efeito de dois diferentes sistemas de aquecimento de galpões avícolas, sendo um convencional com fornalha a lenha e outro com um gaseificador/combustor de biomassa, quanto ao conforto térmico, qualidade do ar e desempenho produtivo de frangos de corte. Observou que o sistema de aquecimento com gaseificador de biomassa atingiu seu propósito e apresentou melhores resultados que a fornalha à lenha tradicional.

Entre os estudos que visam o desenvolvimento de sistemas de co-geração com gaseificação pode-se citar WANDER (2001), que estudou duas alternativas que atendem as condições de sustentabilidade, por serem renováveis, e o atendimento em pequena escala, fator predominante para que se possam viabilizar pequenos empreendimentos em locais de difícil acesso e baixa densidade demográfica. Foi realizada a gaseificação do resíduo das pequenas serrarias, com a utilização do gás produzido num motor de combustão interna e um equipamento auxiliar que pode ser usado em conjunto com o fogão a lenha para aquecer água nas residências, liberando energia elétrica para outras cargas mais nobres e diminuindo os níveis de queda de tensão principalmente no horário de ponta.

A gaseificação apresenta uma série de vantagens, em comparação com a combustão direta (LORA et al. 1997), destacando-se entre elas:

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

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

- a tecnologia é mais complicada que a queima direta e deve-se ter uma especial atenção com aspectos de segurança, uma vez que o gás produzido é tóxico;
- a instalação dos gaseificadores deve ser feita de forma a evitar vazamentos e em locais bem ventilados;
- considerar a redução de eficiência do sistema de gaseificação, que ocorre devido à perda de calor e ao consumo de energia nos ventiladores; e
- instalações de pequena escala têm uma má reputação por apresentarem falhas freqüentes. A maioria dos problemas ocorre no manuseio do combustível e na limpeza dos gases.

No que diz respeito aos gaseificadores estes podem ser classificados, segundo (CORTEZ & LORA, 1997), de acordo com os seguintes fatores:

Pressão de trabalho:

- baixa pressão (atmosférica); e
- pressurizados (até 3 Mpa).

Poder calorífico do gás produzido:

- gás de baixo poder calorífico (até 5 MJ/Nm³);
- gás de médio poder calorífico (de 5 a 10 MJ/Nm³); e
- gás de alto poder calorífico (de 10 a 40 MJ/Nm³).

Tipo de agente de gaseificação:

- ar;
- vapor de água;
- oxigênio; e
- hidrogênio.

Quanto à direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gasificação:

- concorrente;
- contracorrente;
- fluxo cruzado; e
- leito fluidizado.

Os gaseificadores contracorrente (*updraft*) são os mais simples. A entrada de ar fica na parte de baixo do gaseificador, com o fluxo ascendente de gás e contrário ao fluxo de combustível que é introduzido pela parte superior e descende pela ação da força gravitacional, conforme é consumido (CORTEZ & LORA, 1997). Estes gaseificadores tendem a ter uma eficiência térmica alta, pelo fato dos gases provenientes da zona de combustão pré-aquecerem a carga de combustível ao passar por ela. Tendo a simplicidade como principal característica, possui, no entanto a desvantagem de produzir um gás extremamente impuro. Nenhum dos alcatrões e outros produtos de pirólise são craqueados

na zona de combustão, já que são levados pelo fluxo de gases para cima do gaseificador e podem causar incrustações nas tubulações. Alguns gaseificadores, particularmente de grande porte, possuem uma câmara na parte superior, acima do topo do combustível, a fim de reduzir a velocidade do gás e permitir a condensação de voláteis dentro do gaseificador.

Convém ressaltar o fato que o gás produzido normalmente contém grandes quantidades de alcatrões e voláteis, o que impede sua utilização direta em motores de combustão interna e o restringe para usos onde é simplesmente queimado (aquecimento direto).

Os fatores que afetam a composição dos gases são:

- temperatura;
- pressão;
- umidade do combustível;
- teor de oxigênio no agente gaseificador;
- vapor d'água;
- tipo de combustível.

As reações ocorrem em diferentes zonas do gaseificador. A altura de cada uma dessas zonas depende de um série de fatores, entre eles da matéria prima utilizada (CORTEZ & LORA, 1997). As zonas dos gaseificadores são:

- Zona de combustão: a temperatura varia de 1000 a 1300 °C; ocorrem as reações de oxidação do C em altas temperaturas e em contato com o O₂; há também produção de calor para manter as reações;
- Zona de redução: temperaturas variando entre 1000 a 700 °C; em suma nessa zona tem-se: redução do CO₂ em contato com o C em altas temperaturas; dissociação do CO₂; dissociação do vapor d água pelo C; redução da água pelo CO; hidrogenação do C formando hidrocarbonetos leves (metano);
- Zona de pirólise: decomposição térmica que ocorre entre 280 e 450°C. A secagem e pirólise da biomassa (com liberação da água, dos voláteis e do alcatrão) ocorre em 3 fases:
 - evaporação da água;
 - decomposição de carboidratos;
 - produção de alcatrão e ácidos leves;

Os produtos são:

- gases não condensáveis;
- carvão vegetal; e
- condensado: alcatrão e ácidos.

A gaseificação de lenha com ar produz gás combustível com poder calorífico inferior, entre 800 e 1800 kcal/Nm³. Nos processos de gaseificação autotérmicos a conversão do

carbono em gás é superior a 90%. Na gaseificação da lenha, tipicamente 70 a 75% de sua energia química é recuperada como energia química do gás, 10 a 20% é convertida em calor sensível do gás e 5 a 10% é perdida com calor e carbono removidos do sistema.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Projetar, construir e analisar tecnicamente, um gaseificador automatizado de biomassa, de fluxo contracorrente (*updraft*), ao qual será acoplada uma câmara de combustão dos gases produzidos visando geração de ar quente e limpo, para o aquecimento de aviários e secagem de produtos agrícolas.

1.3.2 Objetivos específicos

(i) desenvolver um gaseificador de fluxo concorrente e um combustor para a queima imediata dos gases produzidos e a automação do sistema;

(ii) realizar balanços de massa e energia visando à otimização do sistema construído na geração de ar quente;

(iii) desenvolver um sistema de controle automático das entradas de ar primário e secundário e da temperatura de saída do ar quente; e

(iv) realizar análise técnica do sistema proposto.

1.4 MATERIAL E MÉTODOS

1.4.1 Dimensionamento do gaseificador e do combustor de gases

De acordo com o estudo preliminar realizado com os avicultores de granja comercial, optou-se por desenvolver um gaseificador de fluxo contracorrente, em forma de canal, para que pudesse usar lenha de diversos tamanhos e aproveitar a força da gravidade para a movimentação do combustível no interior do gaseificador, facilitar o abastecimento e ter uma vida útil da grelha aumentada, problema esse observado nos testes com gaseificador de fluxo concorrente.

Assim, para o dimensionamento do reator, foram necessários estudos prévios sobre o comburente e o combustível a ser utilizado no processo de gaseificação. Além disso, foi necessário calcular a energia gasta no aquecimento de um aviário com dimensões de 100 m de comprimento, 12 m de largura e 2,7 m de altura, capaz de abrigar em torno de 15.000 aves.

Dessa forma, foram computados dados médios do tempo de aquecimento, consumo de lenha, massa específica da lenha, eficiência média de fornalhas usadas para o aquecimento de aviários. A partir desses dados, pode-se estimar o consumo médio diário e horário de energia para o aquecimento de aviários (Quadro 01).

Quadro 01. Dados e cálculos para a energia necessária ao aquecimento do aviário

Tempo de aquecimento	dias	21
Consumo médio de lenha diário	m ³ /dia	21
PCI _u	(kJ/kg)	13.489,2
Densidade da lenha	(kg/m ³)	450
Eficiência média das fornalhas a lenha	(%)	50
Energia Total	(kJ)	63736470
Energia gasta por dia	(kJ/dia)	3035070
Tempo médio de aquecimento diário	(h/dia)	10
Energia gasta por hora (considerando 10 horas funcionamento do aquecimento por dia)	(kJ/h)	303.507
Taxa de energia gasta	(W)	84,31

Utilizou-se como comburente o ar ambiente, devido ao fato da maioria dos processos industriais de combustão utilizarem o mesmo como fonte de oxigênio. No Quadro 02, é apresentada a composição em base volumétrica utilizada.

Quadro 02. Composição do ar ambiente, em % de volume e massa

Elemento	Volume (%)	Massa (%)
O ₂	21,0	23,2
N ₂	79,0	76,8

Fonte: VAN WYLEN et al. (2003).

Foram estimadas as condições críticas de trabalho, referentes ao comburente, sendo a temperatura do ar ambiente (Ta) crítica de 10 °C, a umidade relativa (UR) crítica de 70 % e a pressão total (Pt) a pressão atmosférica ao nível do mar (101,325 kPa). Utilizou-se o programa Grapsi (MELO et al., 2004) e determinaram-se as propriedades psicrométricas do ar ambiente (exceto entalpia). Foram feitas as devidas correções para o cálculo da massa específica do ar úmido, empregando-se a Equação 01.

$$Me_u = \frac{1 + W_a}{V e_s} \quad (01)$$

em que

Me_u = massa específica do ar úmido, em kg/m;

W_a = razão de mistura do ar úmido, em kg/kg; e

Ve_s = volume específico do ar seco, em m³/kg.

O valor da entalpia do ar ambiente seco (h_a) para a temperatura de 10 °C (283,15 K) foi extraído da tabela das propriedades termodinâmicas do ar (VAN WYLEN et al., 2003), em quilo Joule por quilograma de ar seco, havendo, portanto, necessidade de transformá-la para a unidade de ar úmido, conforme Equação 02.

$$h_u = h_a + w_a h_{va} \quad (02)$$

em que

h_u = entalpia do ar ambiente úmido, em kJ/kg;

h_a = entalpia do ar ambiente seco, em kJ/kg; e

h_{va} = entalpia de vaporização da água, extraída de tabelas termodinâmicas, em função da pressão e temperatura crítica, em kJ/kg.

O combustível utilizado para o dimensionamento do reator foi lenha de eucalipto, com massa específica estimada em 450 kg.m⁻³ (SANTOS, 2003) e umidade estimada em 20 % base úmida. A composição elementar da lenha de eucalipto, por unidade de massa, foi estimada, conforme VLASSOV (2001) (Quadro 3).

Quadro 3. Estimativa da composição química elementar típica da lenha de eucalipto, base seca, em unidade de massa e volume.

Unidade	C(%)	H(%)	O(%)	N(%)	Umidade (%)
Massa	47,50	6,00	44,00	1,00	0,0 (b.s.)
Volume	3,96	6,00	2,75	0,07	0,0 (b.s.)
Massa	38	4,8	35,2	0,8	20,0 (b.u.)

Fonte: VLASSOV (2001).

Com esta composição elementar em unidade de massa e de acordo com a fórmula de Mendeleev, citadas por VLASSOV (2001), calculou-se o poder calorífico inferior (PCI) e o poder calorífico inferior úmido (PCI_u), considerado o de trabalho, de acordo com as Equações 03 e 04, respectivamente.

$$PCI = 339C + 1030H - 109(O - S) \quad (03)$$

em que

- PCI = poder calorífico inferior do combustível sólido, kJ/kg;
C = porcentagem da fração de carbono na massa de trabalho do combustível;
H = porcentagem da fração de hidrogênio na massa de trabalho do combustível;
O = porcentagem da fração de oxigênio na massa de trabalho do combustível;
S = porcentagem da fração de enxofre na massa de trabalho do combustível;

$$PCI_u = 339C + 1030H - 109(O - S) - 25W \quad (04)$$

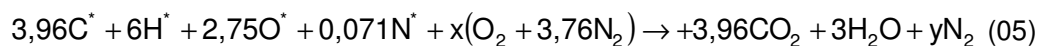
em que

- PCI_u = poder calorífico inferior úmido do combustível sólido, kJ/kg;
W = porcentagem da fração de umidade na massa de trabalho do combustível.

Após a realização das estimativas de poder calorífico do combustível, efetuou-se o cálculo do ar teórico (estequiométrico). Este cálculo foi feito com base na análise elementar do combustível e por meio de cálculos estequiométricos da combustão.

Determinou-se a relação N₂/O₂ do ar ambiente, em unidade de volume (Quadro 02), obtendo 79/21 = 3,76.

Considerando uma massa de 100 kg de lenha de eucalipto (base seca), a estequiometria da reação de combustão pode ser escrita como (Equação 05):



em que

- C * = número de moles de carbono no combustível, em 100 kg de lenha (base seca);
H * = número de moles de hidrogênio no combustível, em 100 kg de lenha (base seca);
O * = número de moles de oxigênio no combustível, em 100 kg de lenha (base seca);
N * = número de moles de nitrogênio no combustível, em 100 kg de lenha (base seca);
x = número de moléculas de O₂ necessárias para a combustão estequiométrica do combustível; e
y = número de moléculas de N₂ necessárias para a combustão estequiométrica do combustível.

Com base nos princípios e leis da termodinâmica para um sistema em regime permanente e, conforme, a disposição dos equipamentos no sistema realizou-se os balanços de massa e energia para o sistema como um todo e para o gaseificador e combustor. Na Figura 01 é representado o volume de controle do sistema de gaseificação/combustão dos gases adjacentes. No dimensionamento não foi considerada a necessidade de utilização de chama piloto (com a utilização de GLP ou carvão vegetal) nem a possibilidade de acrescentar ar frio ao ar quente gerado pelo processo (câmara de mistura), antes da passagem pelo ventilador.

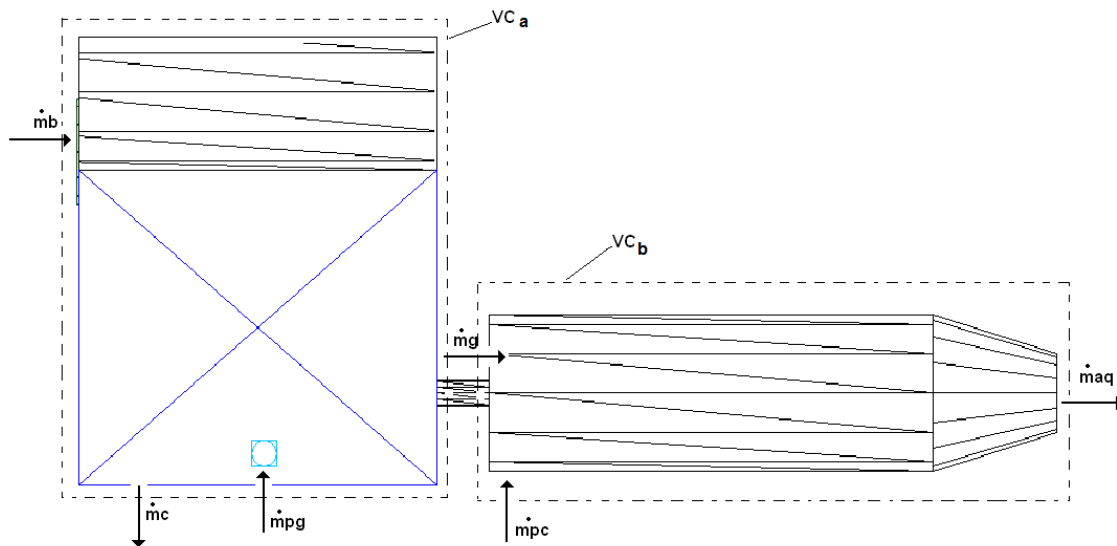


Figura 01. Gaseificador de biomassa; (VCa) volume de controle do gaseificador; (VCb) volume de controle do combustor de gases.

Utilizando o volume de controle apresentado na Figura 01, pode-se equacionar o balanço de massa do gaseificador conforme a Equação 06 e do combustor de gases na Equação 07:

$$\dot{m}_{pg} + \dot{m}_b = \dot{m}_c + \dot{m}_g \quad (06)$$

em que

\dot{m}_{pg} = vazão mássica de ar primário no gaseificador, em kg/h;

\dot{m}_b = vazão mássica de lenha, em kg/h;

\dot{m}_c = vazão mássica das cinzas, em kg/h; e

\dot{m}_g = vazão mássica de gás, em kg/h.

$$\dot{m}_g + \dot{m}_{pc} = \dot{m}_{aq} \quad (07)$$

em que

\dot{m}_{pc} = vazão mássica de ar primário no combustor, em kg/h;

\dot{m}_{aq} = vazão mássica de ar quente na saída do combustor, em kg/h.

Para o balanço de energia, foi desconsiderada a energia utilizada por dispositivos eletromecânicos, sendo descrito o balanço de energia do gaseificador por meio da Equação 08.

$$\dot{m}_{p(a)} h_u + \dot{m}_b PCI_u = Q_{v.c.} + \dot{m}_c PCI_c + \dot{m}_g PCI_g \quad (08)$$

em que

$\dot{m}_{p(a)}$ = vazão mássica de ar primário no reator, em kg/h;

h_u = entalpia do ar ambiente úmido, em kJ/kg;

\dot{m}_b = vazão mássica de lenha, em kg/h;

PCI_u = poder calorífico inferior úmido, em kJ/kg;

$Q_{v.c.}$ = taxa de transferência de calor entre o sistema e o meio, kJ/h;

\dot{m}_c = vazão mássica das cinzas, em kg/h;

PCI_c = poder calorífico inferior das cinzas, em kJ/kg;

\dot{m}_g = vazão mássica do gás combustível produzido no reator, em kg/h;

PCI_g = poder calorífico inferior do gás produzido no reator, em kg/h.

Para o combustor, o balanço de energia (Equação 09) é definido como:

$$\dot{m}_g PCI_g + \dot{m}_{pc} h_u = Q_{v.c.} + \dot{m}_{aq} h_{aq} \quad (09)$$

em que

\dot{m}_{pc} = vazão mássica de ar primário no combustor, em kg/h;

h_{aq} = entalpia do ar quente, em kJ/kg.

Estimou-se a potência requerida conjunto gaseificador/combustor em 303.507 kJ/h, valor este aproximado para as fornalhas de pequeno porte usadas no aquecimento de aviários, e a eficiência do combustor de gases de 80% e do gaseificador de 88%. Estes valores de eficiência foram levados em conta a partir de dados da literatura e devido às características construtivas do sistema.

Empregando a Equação 10, calculou-se a taxa de energia total de saída do combustor e do gaseificador. Sabendo a energia de saída necessária e desconsiderando-se

o poder calorífico das cinzas, por meio do balanço de energia do combustor (Equação 09) e do gaseificador (Equação 08), calculou-se a massa real de ar e de combustível a ser consumida, por hora, considerando-se o fator de ar igual a 35% (fator de ar dentro da faixa de 20 e 40% da quantidade estequiométrica, recomendada para a gaseificação). Por meio do balanço de massa do reator (Equação 06), calculou-se a vazão mássica de gás produzido, considerando que as cinzas correspondem a 1,5% da massa do combustível seco. A massa específica média do gás combustível foi estimada em 1,3 kg/m³. Como a energia de saída do reator está toda concentrada no gás, pode-se calcular o poder calorífico inferior do gás úmido, em unidade de volume e em unidade de massa. O poder calorífico do gás foi calculado de acordo com a Equação 16 (VLASSOV, 2001) a partir da composição química elementar dos gases de um gaseificador contracorrente (Quadro 04), de acordo com CORTEZ et al. (2008).

$$\eta = \frac{\dot{Q}_s}{\dot{Q}_e} \quad (10)$$

em que

- η = eficiência do reator, em decimal;
- \dot{Q}_s = taxa de energia total de saída do reator, em kJ/h; e
- \dot{Q}_e = taxa de energia de entrada do reator, em kJ/h.

Estimou-se a velocidade mínima do gás, ao passar pela grelha, como sendo um valor próximo ao de entrada de ar primário no reator, utilizando-se como referência 0,5 m/s. Como se tem a vazão em m³/h do gás combustível produzido no reator, determinou-se a abertura requerida na grelha. Adotou-se a proporção de superfície aberta em relação à superfície total da grelha de 20 %, a fim de calcular a área total necessária da grelha, o que equivale também à área da base do reator projetado.

O dimensionamento da grelha foi feito em função da velocidade de escoamento do ar pelos interstícios da grelha.

NUBER (1975) propõe o dimensionamento de grelha com base no consumo de ar necessário à combustão de 1,0 kg de combustível, considerando o escoamento do ar com certa velocidade pelos interstícios da grelha, segundo a Equação 11:

$$S_l = \frac{\dot{m}_{cb} V_{ar}}{v \cdot 3600} \quad (11)$$

em que

- S_l = superfície livre da grelha, isto é, seção total de todos os espaços entre as barras que compõem a grelha, m²;
- \dot{m}_{cb} = consumo de combustível, kg/h;

V_{ar}^t = volume teórico de ar necessário à queima de 1 kg de combustível, m³; e

V = velocidade de escoamento do ar, m/s.

Para o cálculo da superfície total, S_t , da grelha, utiliza-se a Equação 12 abaixo, na qual m varia de ¼ a ½ para carvão e 1/7 a 1/5 para madeira:

$$m = \frac{S_l}{S_t} \quad (12)$$

em que

m = razão entre a superfície livre da grelha e a área total, adimensional;

S_t = área total da grelha, m².

Para o cálculo da quantidade de ar estequiométrica necessária para a queima do gás, foi considerada a composição média do gás resultante do gaseificador (Quadro 04) aplicado à Equação 13 de VLASSOV (2001).

$$V_{ar}^o = 0,0476 \left[0,5 \times CO + 0,5 \times H_2 + 1,5 \times H_2S + \sum (m+n/4) \times C_m H_n - O_2 \right] \quad (13)$$

em que

V_{ar}^o = Volume teórico de ar, m³ar/m³gás.

O valor obtido foi multiplicado por 1,1 por ser este o coeficiente de excesso de ar recomendado por VLASSOV (2001) para a queima de combustíveis gasosos.

Quadro 04. Composição química elementar do gás de um gaseificador contracorrente, base seca (% volumétrica)

H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂	PCI
11	24	9	3	53	5,5 MJ/ Nm ³

Fonte: Bridgwater (1991) citado por CORTEZ et al. (2008).

O combustor de gases foi dimensionado de acordo com a metodologia descrita por LOPES (2002) para câmaras de combustão, sendo usado o valor de termotensão volumétrica de 350 kW/m³.

1.4.2 Construção do gaseificador

Após o dimensionamento do gaseificador de biomassa e do combustor de gases, foram desenhados os componentes do conjunto, demonstrados nas Figuras 02 e 03, a seguir.

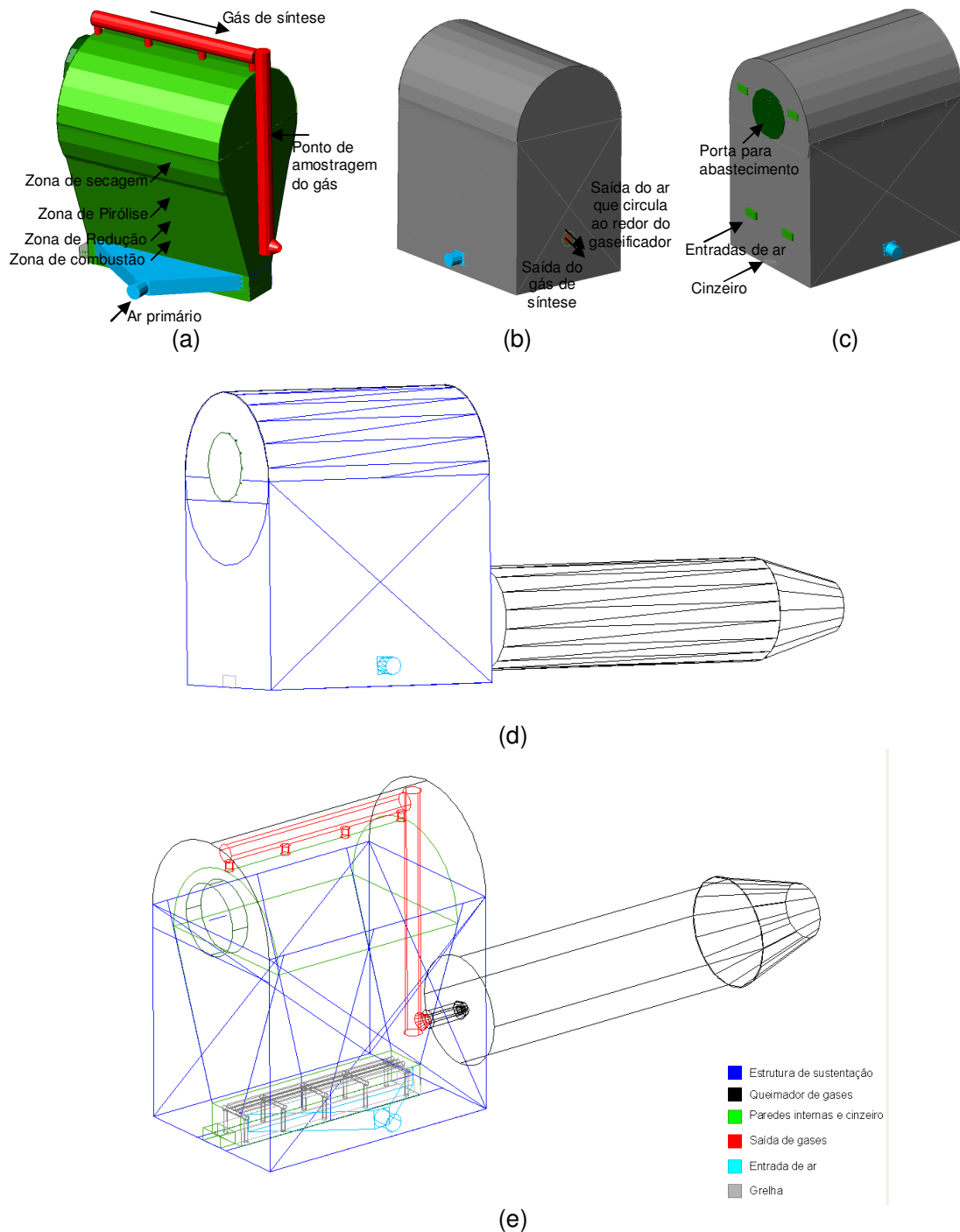


Figura 02. Gaseificador de biomassa, (a, b, c e d) perspectiva do conjunto gerador de calor; (e) visão dos componentes do conjunto gerador de calor.

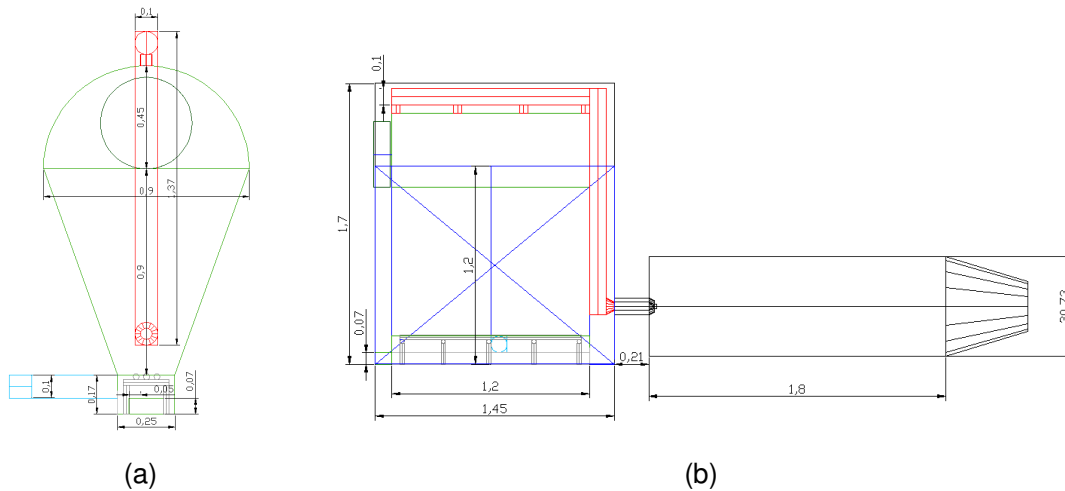


Figura 03. Dimensões (m) para o gaseificador de biomassa e o combustor de gases, (a) corte frontal e (b) corte lateral.

Em seguida, os desenhos foram encaminhados a uma indústria metalúrgica para a construção do gaseificador de biomassa. Vale ressaltar que as medidas reais podem apresentar pequenas variações em relação ao desenho, em função da construção.

As Figuras 04 e 05 ilustram as etapas de construção do gaseificador de biomassa, do combustor e algumas peças que compõem o sistema.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Figura 04. Etapas da construção do gaseificador. a) Estrutura de sustentação; b) corpo do combustor de gases; c) e d) Bocal do queimador de gases; e) e f) encaixes da porta e da grelha do gaseificador.

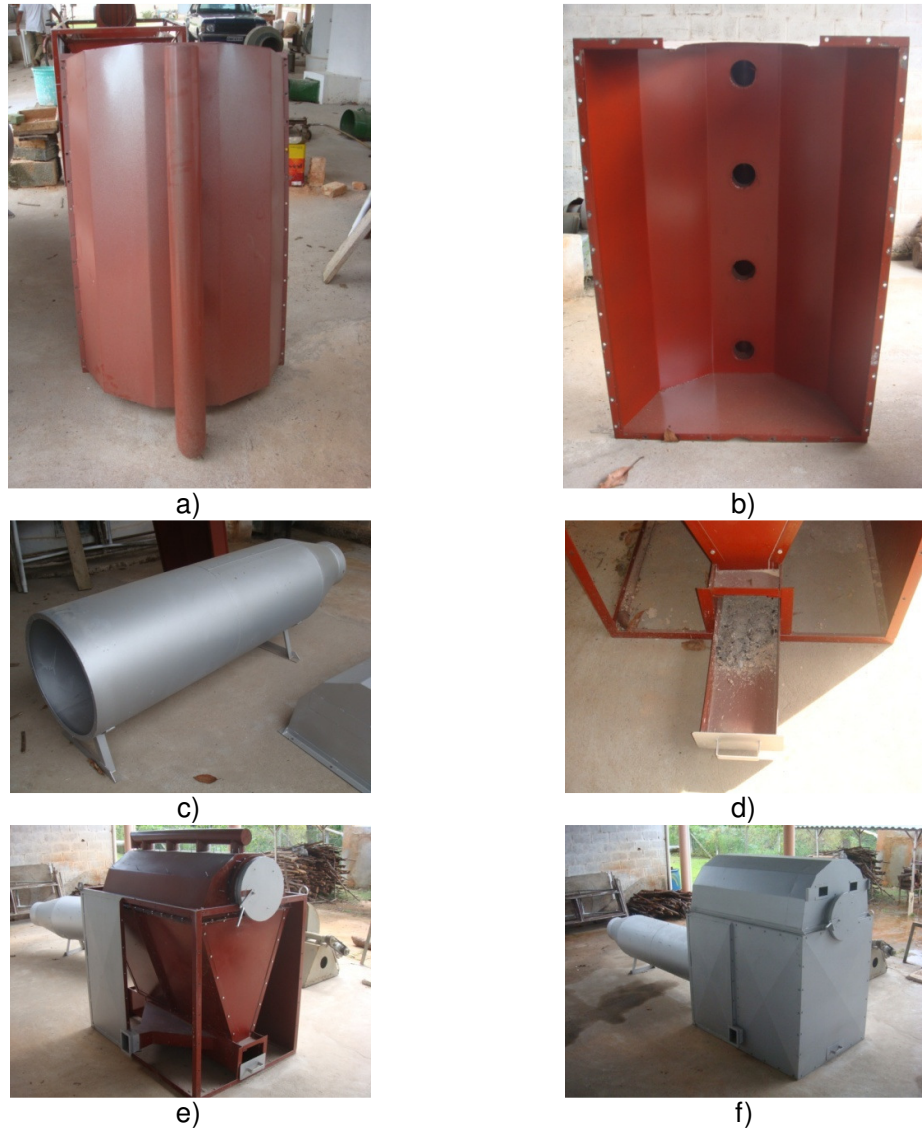


Figura 05. Algumas peças que compõem o gaseificador; a) e b) tampa do gaseificador; c) combustor de gases; d) cinzeiro; e) e f) gaseificador montado.

Após a construção do gaseificador, o mesmo foi revestido internamente com tijolos refratários, assentados com argamassa refratária. Nas laterais, onde o ângulo de inclinação é de 90° foram feitas lajes de concreto refratário para suportar o calor, além dos impactos da lenha durante o carregamento. Nas partes onde não existe impacto optou-se pelo revestimento com fibra cerâmica, pois tem a vantagem de ser leve, se moldar de acordo com a superfície onde será instalada e por suportar temperaturas de até 1.260°C (Figura 06).

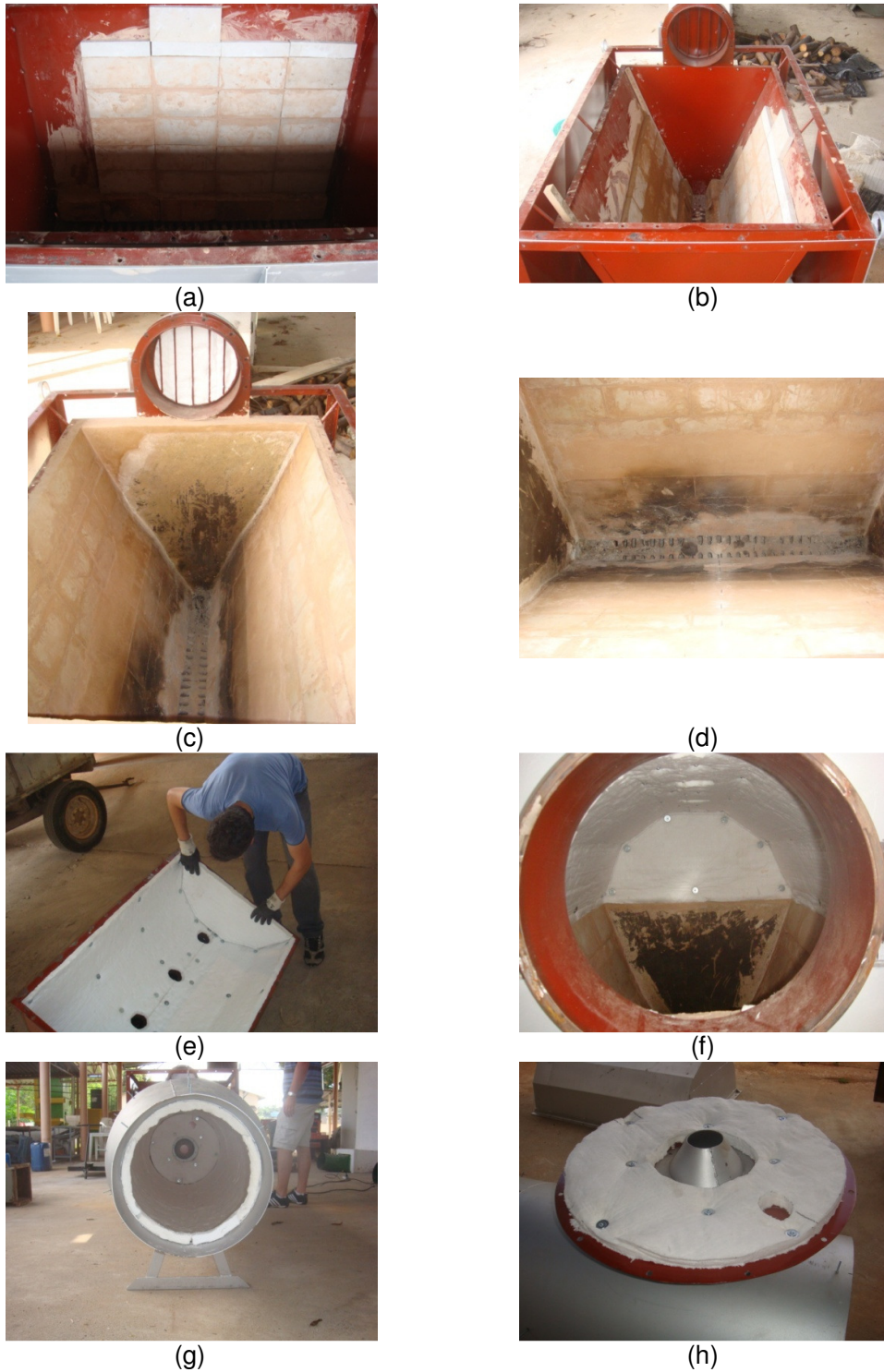


Figura 06. Etapas do revestimento refratário e isolante térmico do gaseificador. a), b), c) e d) revestimento com tijolos e concreto refratário; e) e f) cobertura do reator com manta de fibra cerâmica, g) e h) revestimento da câmara de combustão com manta isolante de fibra cerâmica.

Em seguida ao revestimento do gaseificador foi realizada a instalação de termopares para a aquisição de dados de temperatura (Figura 07). Os sensores utilizados foram sondas

termométricas tipo K, com revestimento de aço 310 para suportar altas temperaturas. Para a instalação dessas, foram perfuradas as paredes do equipamento até a ponta dos sensores atingirem o interior do reator de gaseificação. A temperatura da zona de combustão foi medida a 10 cm de altura da grelha, da zona de redução a 20 cm, da zona de pirólise a 40 cm e da zona de secagem a 80 cm de altura da grelha. Além disso, para a medida da temperatura de passagem do gás de síntese, foi feita a instalação de uma sonda tipo K a aproximadamente 50 cm de altura da saída do gás na câmara de combustão (mesmo ponto de amostragem do gás). A temperatura entre a chama e a parede na câmara de combustão foi medida com a instalação de uma sonda tipo K a 20 cm de distância da parede.



Figura 07. Instalação de termopares no gaseificador; a) visão da lateral externa; b) ponta dos termopares no lado interno do gaseificador.

Após todas as etapas da construção, o gaseificador foi montado e procedeu-se a queima de uma pequena quantidade de madeira a fim de fazer a secagem final do material refratário e evitar futuras trincas nas paredes.

1.4.3 Sistema de controle da temperatura (automação)

Visto que a temperatura do ar de saída no combustor depende quantidade de gases gerados pelo gaseificador, optou-se por construir um sistema que controlasse a geração de gás do gaseificador, através da dosagem de ar primário no reator.

Para tanto, ligou-se um inversor de freqüência no ventilador de forma a controlar a velocidade do ventilador e, com isso, controlar a entrada de ar no gaseificador pela oscilação na pressão exercida pelo ventilador.

Ao inversor de freqüência foi instalado um sistema composto por um microcontrolador com sensores de temperatura instalados dentro do ambiente a ser aquecido, de forma que o controle da velocidade do ventilador fosse feito de acordo com a

temperatura do interior da instalação onde os sensores de temperatura estavam posicionados.

Assim, por exemplo, se a temperatura desejada no interior da instalação é de 32°C e a temperatura lida pelos sensores for menor, o sistema de controle fará com que a velocidade do ventilador aumente gradativamente, de modo que mais ar entre no gaseificador, aumentando a quantidade de gás gerado e de energia, de acordo com os resultados encontrados por SANTOS (2008). O sistema foi projetado para fazer a verificação da necessidade de aumentar ou diminuir a temperatura e, com isso, diminuir ou aumentar a velocidade do ventilador. Por motivos de segurança, a frequência mínima do motor do ventilador foi fixada em 35 Hz e a máxima em 65 Hz.

O motor utilizado para a movimentação do ventilador foi da marca EBERLE, modelo B100, com 5 CV de potência, de quatro pólos, 1730 rpm, 60 Hz, fator de potência de 0,81 e rendimento de 84,5%. O ventilador usado foi caracterizado quanto à vazão e pressão estática, sendo as curvas características apresentadas na Figura 08.

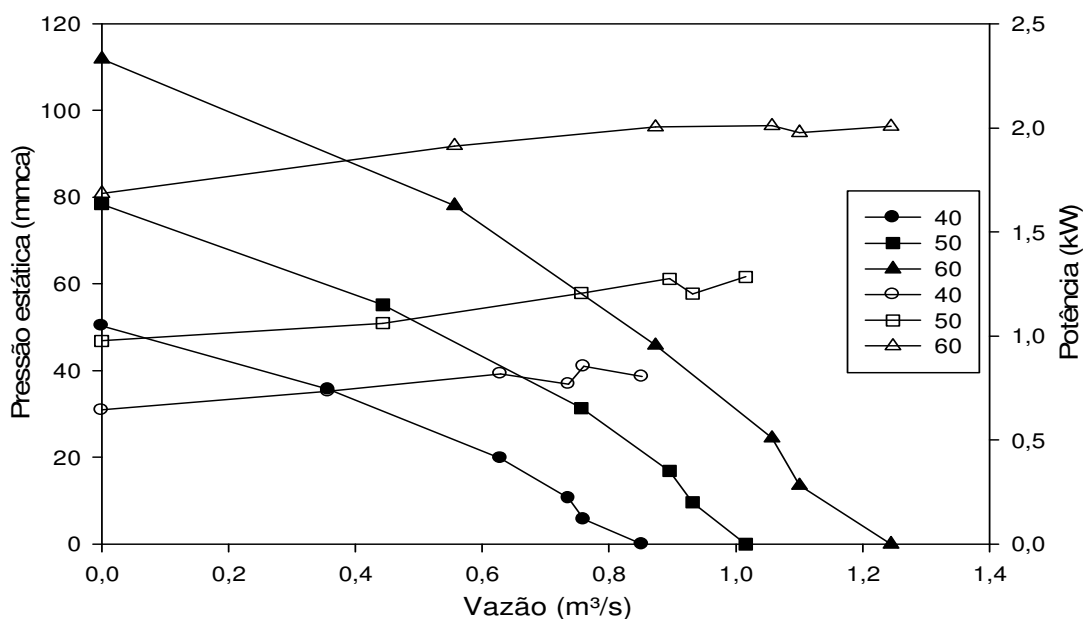


Figura 08. Curvas características do ventilador utilizando, para as frequências de operação de 40, 50 e 60 Hz.

Na Figura 09 é apresentado o esquema de funcionamento do sistema automático, atuando sobre a velocidade do ventilador. Para tanto, foi confeccionada uma curva característica relacionando a temperatura média no interior da instalação estudada com a velocidade de trabalho do ventilador.

A partir do conhecimento desses dados, procedeu-se a programação do sistema e montagem dos componentes.

Para a fabricação do sistema de controle automático foram usados sensores de temperatura, cabos para dados e energia, microcontrolador PIC, fonte e inversor de frequência, que foram conectados ao sistema de gaseificação construído.

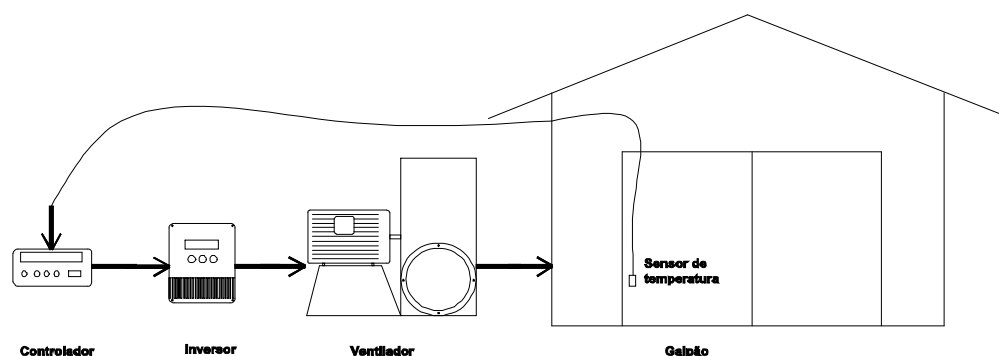


Figura 09. Esquema de funcionamento do sistema de controle da temperatura.

Para a montagem do sistema de controle automático foi necessário o auxílio de profissional da área de automação (Figura 10).



(a)



(b)

Figura 10. Sistema de controle automático desenvolvido. (a) inversor de frequência e (b) controlador com sensores de temperatura.

1.4.4 Determinação da Umidade

A umidade da madeira utilizada no experimento foi determinada pelo método da estufa, a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ até que a diferença entre as pesagens fosse inferior a 0,2%, segunda a norma NBR 8112/83.

1.4.5 Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI) da madeira

As análises para a determinação do poder calorífico superior (PCS) da madeira foram realizadas no Laboratório de Energia da Madeira, no Departamento de Engenharia Florestal da UFV, segundo as normas ASTM D-2015-66, utilizando-se para isso uma bomba calorimétrica. Já as determinações do poder calorífico inferior (PCI) da madeira seca foi determinado analiticamente a partir da Equação 14 (BAZZO, 1995 e CHANDRA e PAYNE,

1986), subtraindo-se do PCS a entalpia de vaporização da água devido ao vapor d'água formado na reação do hidrogênio com o oxigênio.

$$PCI = PCS - h_v(9H_2) \quad (14)$$

em que

- PCI = poder calorífico inferior, kJ/kg;
- PCS = poder calorífico superior, kJ/kg;
- h_v = entalpia de vaporização da água, kJ/kg de água na temperatura de referência de 25 °C; e
- H_2 = vapor d'água formado pela combustão do hidrogênio.

O poder calorífico inferior da madeira úmida (PCI_u), que refere-se a energia útil, foi calculado pela Equação 15, levando-se em conta a umidade presente no combustível (CAMARGO, 1990).

$$PCI_u = PCS(1 - U_{bu}) - h_v[9H_2(1 - U_{bu}) + U_{bu}] \quad (15)$$

em que

- PCI_u = poder calorífico inferior úmido, kJ/kg; e
- U_{bu} = fração de água na madeira, kg/kg.

1.4.6 Poder Calorífico Inferior (PCI_g) do gás de síntese

O poder calorífico do gás de síntese foi calculado de acordo com Equação 16, adaptada de VLASSOV (2001).

$$PCI_g = 108H_2 + 126CO + 358CH_4 \quad (16)$$

em que

- PCI_g = poder calorífico inferior do gás de síntese, kJ/m³;
- H_2 = porcentagem volumétrica do hidrogênio no gás de síntese, m³/m³;
- CO = porcentagem volumétrica do monóxido de carbono no gás de síntese, m³/m³; e
- CH₄ = porcentagem volumétrica do metano no gás de síntese, m³/m³;

1.4.7 Temperatura, umidade relativa, vazão e energia elétrica

Os dados de temperatura do gaseificador e do ar de saída foram coletados por um sistema de aquisição de dados, composto por 4 módulos seriais ligados a um computador programado para registrar os valores a cada minuto.

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar ambiente, velocidade do ar, energia elétrica consumida, composição do gás de síntese e quantidade de CO no ar quente de exaustão foram coletados a cada 20 minutos nas primeiras duas horas de experimento e a cada 30 minutos no decorrer dos testes.

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar ambiente foram coletados fazendo-se uso um termohigrômetro digital, modelo Instrutemp HT-270.

As leituras de velocidade do ar primário do gaseificador foram realizadas com anemômetro de fio quente, devido às baixas velocidades registradas, modelo TAFR-180 da Instrutherm. Já as leituras de velocidade do ar primário e secundário, além do ar quente de saída do combustor foram realizadas com anemômetro de pás, modelo TAVR-650 da Instrutherm.

As vazões de ar foram calculadas multiplicando-se a velocidade pela área de abertura de cada entrada ou saída de ar.

A potência elétrica consumida foi medida através de um wattímetro digital, de acordo com as instruções do manual de usuário. O modelo de aparelho utilizado foi Minipa ET-4090. Na Figura 11 são apresentados os equipamentos usados no experimento.

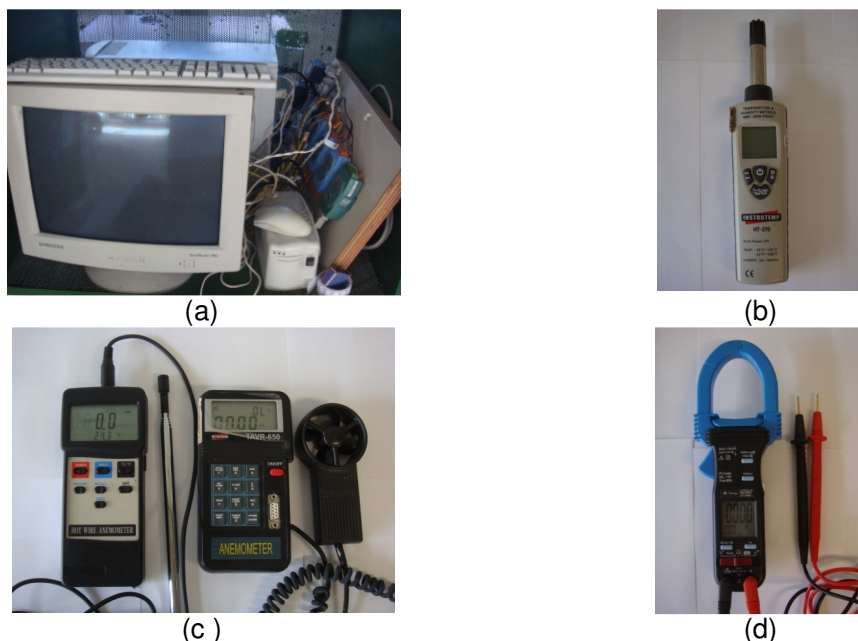


Figura 11. Equipamentos utilizados no experimento: (a) sistema de aquisição de dados de temperatura; (b) termohigrômetro; (c) anemômetros de fio quente e pás; e (d) wattímetro.

1.4.8 Análise dos gases

O gás de síntese gerado pelo gaseificador foi succionado por uma bomba peristáltica em um ponto entre o gaseificador e o combustor de gases. Com a pressão exercida pela bomba, o gás atravessava um filtro com lã de vidro e lã de aço para diminuição da concentração de condensáveis e particulados, sendo após encaminhado para análise em analisador comercial da marca Wuhan Cubic Optoeletronics, modelo Gasboard 3300. O gás foi analisado quanto à concentração de H_2 , CO , CH_4 , CO_2 . O erro estimado dos sensores é menor que 2% e o tempo de resposta do equipamento é da ordem de 10 segundos.

A análise da concentração de CO no ar quente de saída foi realizada com um aparelho da marca TESTO, modelo 330, equipado com sensores de oxigênio e monóxido de carbono, fazendo também leituras de dióxido de carbono por diferença.

1.4.9 Eficiência térmica e global do sistema

Na Figura 12 são apresentados os fatores considerados para os cálculos da eficiência térmica e global.

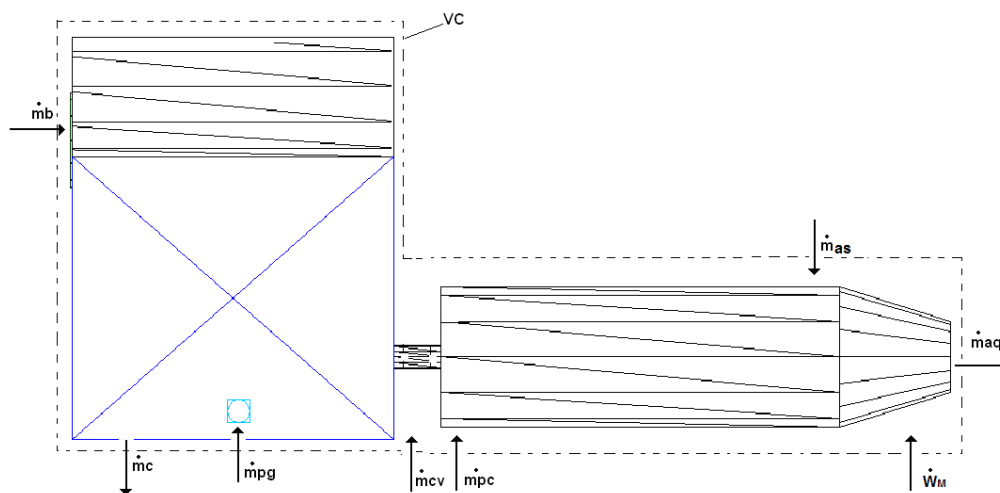


Figura 12. Volume de controle considerado para os cálculos de eficiência térmica e global do sistema como um todo.

A eficiência térmica do sistema como um todo foi calculada de acordo com a Equação 17, considerando que o sistema operava em regime permanente, que a combustão do gás produzido foi completa, que a quantidade de partículas de carbono arrastadas ou presentes nas cinzas foi desprezível e que a vazão mássica do ar que entra no volume de controle é a diferença entre a vazão mássica do ar de saída e a vazão dos combustíveis. Adicionalmente, foi considerada a quantidade de carvão vegetal utilizada como chama piloto no início e final da gaseificação.

$$\eta_t = \frac{\dot{m}_{as}(h_{uas} - h_u)}{\dot{m}_L PCI_{uL} + \dot{m}_{cv} PCI_{ucv}} 100 \quad (17)$$

em que

- η_t = eficiência térmica, %;
- \dot{m}_{as} = vazão mássica do ar de saída, kg/s;
- h_{uas} = entalpia do ar de saída, kJ/kg; e
- h_u = entalpia do ar ambiente, kJ/kg;
- \dot{m}_L = vazão mássica de lenha, kg/s;
- PCI_{uL} = poder calorífico inferior úmido da lenha, kJ/kg;
- \dot{m}_{cv} = vazão mássica de carvão vegetal para chama piloto, kg/s; e
- PCI_{ucv} = poder calorífico inferior úmido do carvão vegetal, kJ/s.

A eficiência global foi calculada de acordo com a equação 18

$$\eta_g = \frac{\dot{m}_{as} h_{uas}}{(\dot{m}_{pg} + \dot{m}_{pc} + \dot{m}_{as}) h_u + \dot{m}_L PCI_{uL} + \dot{m}_{cv} PCI_{ucv} + \dot{W}_M} 100 \quad (18)$$

em que

- η_g = eficiência global, %;
- \dot{m}_{pg} = vazão mássica do ar primário do gaseificador, kg/s; e
- \dot{m}_{pc} = vazão mássica do ar primário do combustor, kg/s; e
- \dot{m}_{as} = vazão mássica do ar secundário do combustor, kg/s; e
- \dot{w}_M = energia usada pelo motor elétrico, kJ/s.

1.5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

1.5.1 Dimensionamento

De acordo com os dados utilizados para o dimensionamento, os resultados encontrados com os cálculos são apresentados no Quadro 05.

Quadro 05. Dados e resultados do dimensionamento do gaseificador e câmara de combustão dos gases de síntese

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Temperatura crítica do ar	Ta	°C	10
Umidade Relativa crítica	UR	%	70
Pressão atmosférica		kPa	101,33
Razão de mistura do ar úmido	Wa	g/kg _{ar seco}	0,00532
Volume específico do ar seco	Ve _s	m ³ /kg	0,81
Massa específica do ar úmido	Me _u	kg/m ³	1,24
Entalpia do ar seco a 10°C	há	kJ/kg	283,6
Entalpia do ar ambiente úmido	hu	kJ/kg	297,00
Entalpia de vaporização da água	hva	kJ/kg	2.519,7
N ₂ no ar		% volumétrica	79
O ₂ no ar		% volumétrica	21
Massa específica do combustível		kg/m ³	450
Umidade do combustível		% b.u.	20
Poder calorífico inferior (VLASSOV, 2001)	PCI	kJ/kg	17.486,5
Poder calorífico inferior úmido	PCI _u	kJ/kg	13.489,2
Taxa de energia total de saída do combustor	Qsc	kJ/h	303.507
Taxa de energia total de saída do reator	Qs	kJ/h	354.850
Eficiência do reator	η	decimal	0,88
Massa de lenha por hora de operação	mb	kg/h	28,57
Fator de ar para a gaseificação	FA	%	35
Vazão mássica de ar primário no gaseificador		kg _{ar} /kg _{combustível}	59,97
Massa de cinzas em relação ao combustível		%	1,5
Massa específica média do gás combustível		kg/m ³	1,3
Vazão mássica de gás produzido no gaseificador		kg/h	87,27
Vazão volumétrica de gás produzido no gaseificador		m ³ /h	67,13
Poder calorífico inferior do gás úmido		kJ/m ³	5.286
Poder calorífico inferior do gás úmido		kJ/kg	4.066,15
Velocidade mínima do gás na grelha		m/s	0,5
Superfície aberta em relação a superfície total da grelha		%	20
Fator de ar do combustor	FA _c	decimal	1,1
Vazão de ar teórico para a combustão do gás	m _{au}	m ³ /m ³	1,12
Vazão de ar real para a combustão do gás		m ³ /m ³	1,23
Área total da grelha		m ²	0,135
Área livre		m ²	0,027
Comprimento da grelha		m	1,2
Largura da grelha		m	0,11

Após o dimensionamento, construção e instrumentação do sistema foi realizada a primeira tentativa de gasificação de lenha de eucalipto com o gaseificador de biomassa. Porém, os resultados apresentados não foram satisfatórios. Devido a uma série de

vazamentos de ar na base da grelha, a quantidade de ar que entrava no gaseificador era muito superior à quantidade estequiométrica calculada, fazendo com que houvesse a propagação de chamas no interior do reator, havendo a combustão da lenha ao invés da gasificação. Não havia a formação de gases e por isso não foi possível queimá-los no combustor.

Além disso, foi observada a dificuldade de controlar a quantidade de ar que entrava no gaseificador, seja para realizar a gaseificação da madeira, seja para realizar a combustão do gás produzido, fazendo com que modificações fossem realizadas.

Após o primeiro teste, foram realizados ajustes para controlar os vazamentos de ar e permitir a dosagem adequada para a combustão do gás de síntese. Para isso, os pequenos orifícios existentes no reator foram obstruídos com solda e, em alguns casos, com adesivo especial para altas temperaturas. Além disso, foram construídas duas câmaras (caixas) de alvenaria entre o reator e o combustor e entre o combustor e o ventilador com entradas de ar maiores. Assim, a primeira câmara possui aberturas maiores que as existentes originalmente no combustor, proporcionando a entrada de maior quantidade de ar para servir de comburente do gás de síntese. Já a segunda caixa serviu para permitir a mistura de ar frio ao ar quente proveniente da combustão, diminuindo a temperatura final do ar que chegava ao ventilador e também a sucção de ar na primeira câmara, diminuindo a velocidade dos gases no interior do combustor (Figura 13).



Figura 13. Detalhe das câmaras em alvenaria que ligam o reator à câmara de combustão e a câmara de combustão com o ventilador.

A partir das modificações realizadas o sistema funcionou como no esperado, produzindo gases no reator e queimando-os na câmara de combustão.

1.5.2 Umidade, Poder Calorífico e Cinzas

Os produtos usados para a combustão no gaseificador de biomassa foram tocos de lenha de eucalipto nas dimensões de 15, 50 e 100 cm de comprimento, além de chips de lenha de eucalipto.

A lenha foi transportada até a Área de Armazenamento do DEA, onde foi fracionada (Figura 14) de acordo com as dimensões previstas na pesquisa. Depois disso, foi armazenada nos galpões até a data de uso.

A massa específica da lenha antes da fragmentação, com comprimento em torno de 1m, foi determinada usando-se um cesto de barras de ferro com dimensões de 1,1x1,1x0,87m. A lenha foi pesada e posteriormente foi feita amostragem em cinco pontos para a determinação da umidade da lenha. A massa específica média da lenha antes da fragmentação foi de 355,91 kg/m³ e a umidade média foi de 23,56 % em base úmida.



Figura 14. Lenha fracionada na dimensão de 15 cm de comprimento.

Os resultados de Umidade, Poder Calorífico Superior, Poder Calorífico Inferior e cinzas estão apresentados no Quadro 06.

Quadro 06. Dados de Umidade, PCS, PCI e cinzas das lenhas utilizadas durante o experimento

	Comp. cm	PCS kcal/kg	Cinzas %	Umidade % b.u.	PCI kcal/kg	PCI _u kcal/kg	PCI _u kJ/kg
Teste 1	15	4.588,57	0,935	12,86	4.264,57	3.639,05	15.233,04
Teste 2	15	4.269,46	0,960	15,05	3.945,46	3.261,20	13.651,37
Teste 3	15	4.269,46	0,960	15,05	3.945,46	3.261,20	13.651,37
Teste 4	50	4.269,46	0,960	15,05	3.945,46	3.261,20	13.651,37
Teste 5	50	4.269,46	0,960	15,05	3.945,46	3.261,20	13.651,37
Teste 6	50	4.483,38	0,870	13,03	4.159,38	3.539,36	14.815,78
Teste 7	100	4.483,38	0,870	14,39	4.159,38	3.474,72	14.545,17
Teste 8	100	4.483,38	0,870	14,10	4.159,38	3.488,15	14.601,41
Teste 9	100	4.483,38	0,870	14,26	4.159,38	3.480,84	14.570,81
Teste 10	chips	4.788,24	0,870	10,02	4.464,24	3.956,80	16.563,17
Carvão	-	7.043,06	0,990	05,42	6.719,06	6.322,41	26.465,63

O PCI_u encontrado nas determinações (Quadro 06) foi semelhante ao adotado no dimensionamento do gaseificador, de acordo com o Quadro 05.

1.5.3 Desempenho do sistema

Com o objetivo de avaliar o desempenho do gaseificador na geração de ar quente e limpo, foram analisadas variáveis como a temperatura em diversos pontos do sistema, a composição do gás gerado e qualidade do ar quente resultante da combustão dos gases gerados pelo gaseificador, além da eficiência térmica e global do sistema gasificação/combustão.

Para essa análise foi desligado o sistema de controle automático e procedeu-se a avaliação do gaseificador desenvolvido com condições fixas de operação, para melhor caracterizar o desempenho em cada faixa avaliada. Para isso foram fixadas as condições de trabalho em 40, 50 e 60 Hz de frequência do motor do ventilador. Cada frequência de trabalho associada aos formatos do combustível utilizados geraram diferentes resultados, que são apresentados das Figuras 15 a 26 e nos Quadros 06 a 09.

As temperaturas foram medidas em quatro pontos no interior do reator, na saída dos gases gerados pelo reator (temperatura de passagem dos gases), na câmara de combustão dos gases e na saída do ventilador.

As figuras a seguir (Figura 15, 16, 17 e 18), ilustram a variação das temperaturas no interior do reator de gasificação em cada teste realizado. As abreviaturas que aparecem nos gráficos significam: T_{Amb.} (temperatura do ar ambiente usado como comburente no gaseificador), T_{Comb.} (temperatura na zona de combustão), T_{Red.} (temperatura na zona de redução), T_{Pir.} (temperatura na zona de pirólise), T_{Sec.} (temperatura na zona de secagem), T_{Gases} (temperatura dos gás de síntese) T_{CC} (temperatura entre a chama e a parede na câmara de combustão), T_{Ex.} (temperatura do ar quente de exaustão do ventilador).

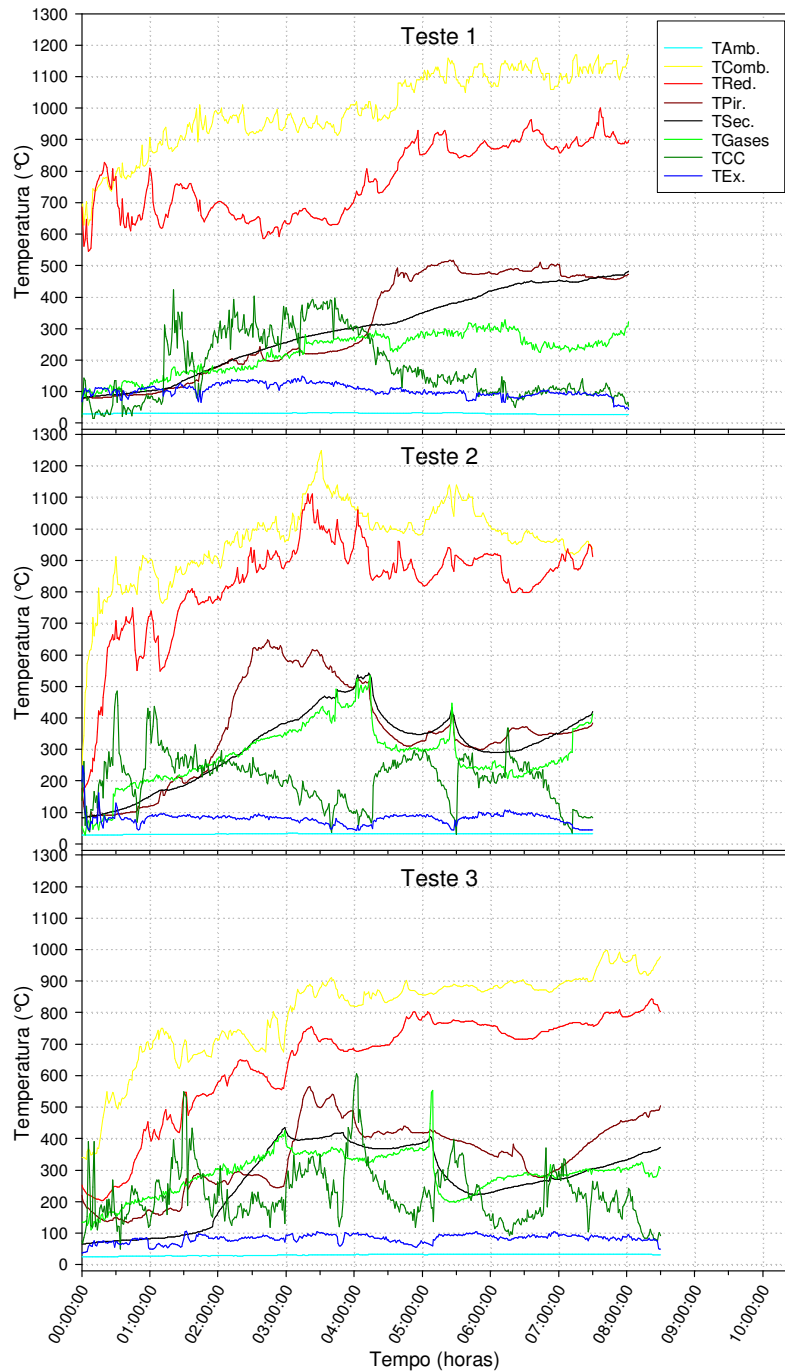


Figura 15. Variação da temperatura no interior do gaseificador para as diversas zonas do reator, para o comprimento de partícula de 15 cm, para os Testes 1, 2 e 3, nas freqüências de 40, 50 e 60 Hz, com vazão mássica média de ar comburente no gaseificador de 0,0150, 0,0141 e 0,0129 kg/s, respectivamente.

Os testes realizados com lenha de 15 cm de comprimento mostraram um excelente desenvolvimento de temperatura no interior do gaseificador, sendo possível ver as diferenças entre as zonas correspondentes. A zona de combustão, onde a temperatura é

mais elevada, região essa próxima a grelha. A zona de redução um pouco mais acima da grelha, com temperaturas um pouco menores. A zona de pirólise com temperaturas de até 500 °C e a zona de secagem com as temperaturas mais baixas. No início da gaseificação as temperaturas da zona de pirólise e de secagem são bem distintas. Porém, a partir da segunda hora, há a tendência das duas zonas estarem com temperaturas parecidas, indicando que possivelmente não há mais zona de secagem. Esse fato também é observado na qualidade do gás gerado no gaseificador, que em torno de duas ou três horas de funcionamento passa a queimar de maneira mais fácil, indicando que há pouca ou nenhuma quantidade de vapor d'água presente no gás.

A temperatura do ar de saída no ventilador sempre esteve em torno de 100 °C, ideal para processos de aquecimento ou secagem, pois nesses casos ocorrem perdas de calor até o uso final, necessitando que a temperatura na saída do combustor seja um pouco mais elevada que a temperatura de uso do ar quente.

Na Figura 16 apresentam-se os perfis de temperatura no interior do gaseificador nos testes realizados com lenha de 50 cm de comprimento, para as frequências de 40, 50 e 60 Hz.

De acordo com a Figura 16, a temperatura nos testes realizados com lenha de 50 cm de comprimento foi caracterizada por apresentar valores menores que os outros testes. O teste que mais diferença apresentou foi o número cinco, com baixas temperaturas em todo o perfil do gaseificador. Isso provavelmente ocorreu em função da dificuldade de combustão da lenha, ocasionada pelo acúmulo de cinzas na região acima da grelha que dificultou a distribuição de ar. Isso foi observado quando do término do teste, onde uma grande quantidade de cinzas foi encontrada acima da grelha. Também pode ter ocorrido a formação de canais preferenciais devido a má distribuição da chama responsável pela ignição, fazendo que em alguns pontos a combustão ocorresse de forma mais rápida que nos demais, criando caminhos por onde o ar passa mais facilmente. Da mesma forma que os primeiros testes, a temperatura do ar quente de saída no ventilador esteve em torno de 100 °C.

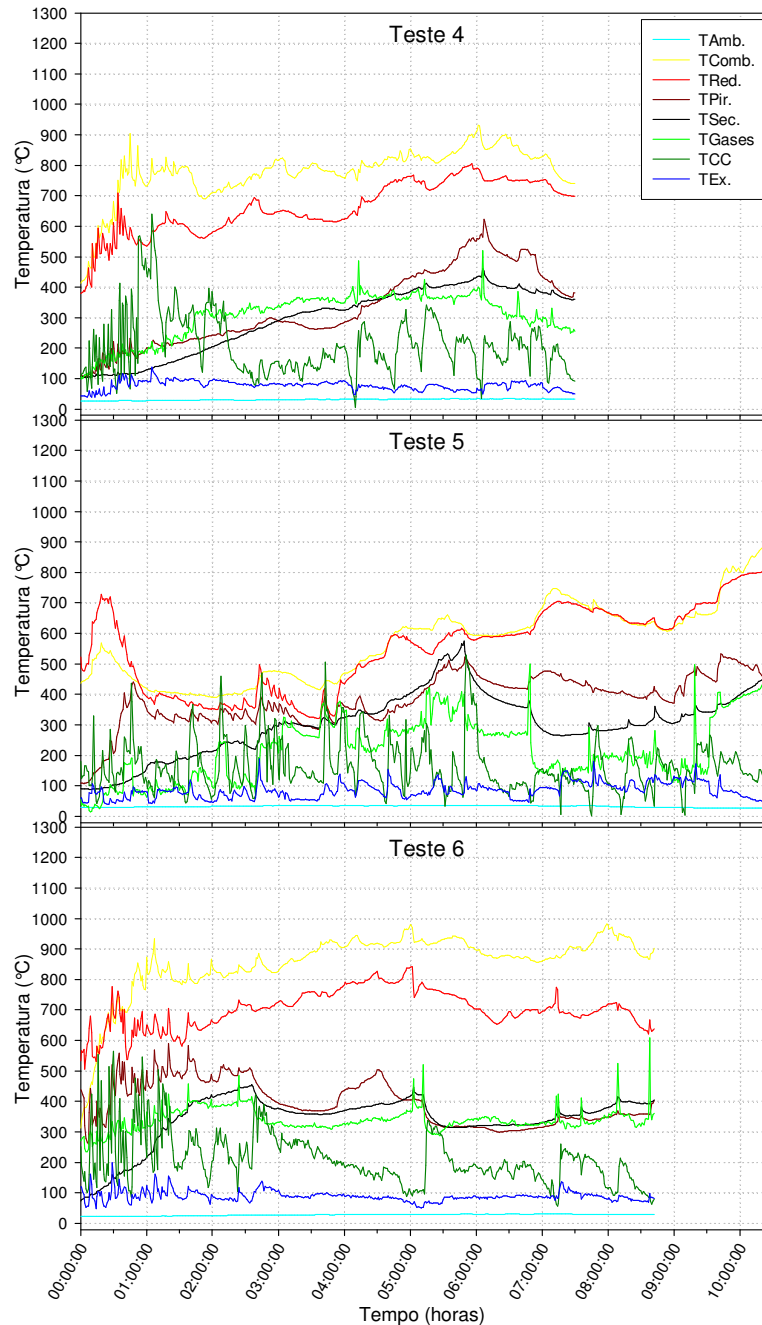


Figura 16. Variação da temperatura no interior do gaseificador para as diversas zonas do reator, para o comprimento de partícula de 50 cm, para os Testes 4, 5 e 6, nas frequências de 40, 50 e 60 Hz, com vazão mássica média de ar comburente no gaseificador de 0,0120, 0,0114 e 0,0116 kg/s, respectivamente.

Na Figura 17 são apresentados os perfis de temperatura no interior do gaseificador nos testes realizados com lenha de 100 cm de comprimento, para as frequências de 40, 50 e 60 Hz.

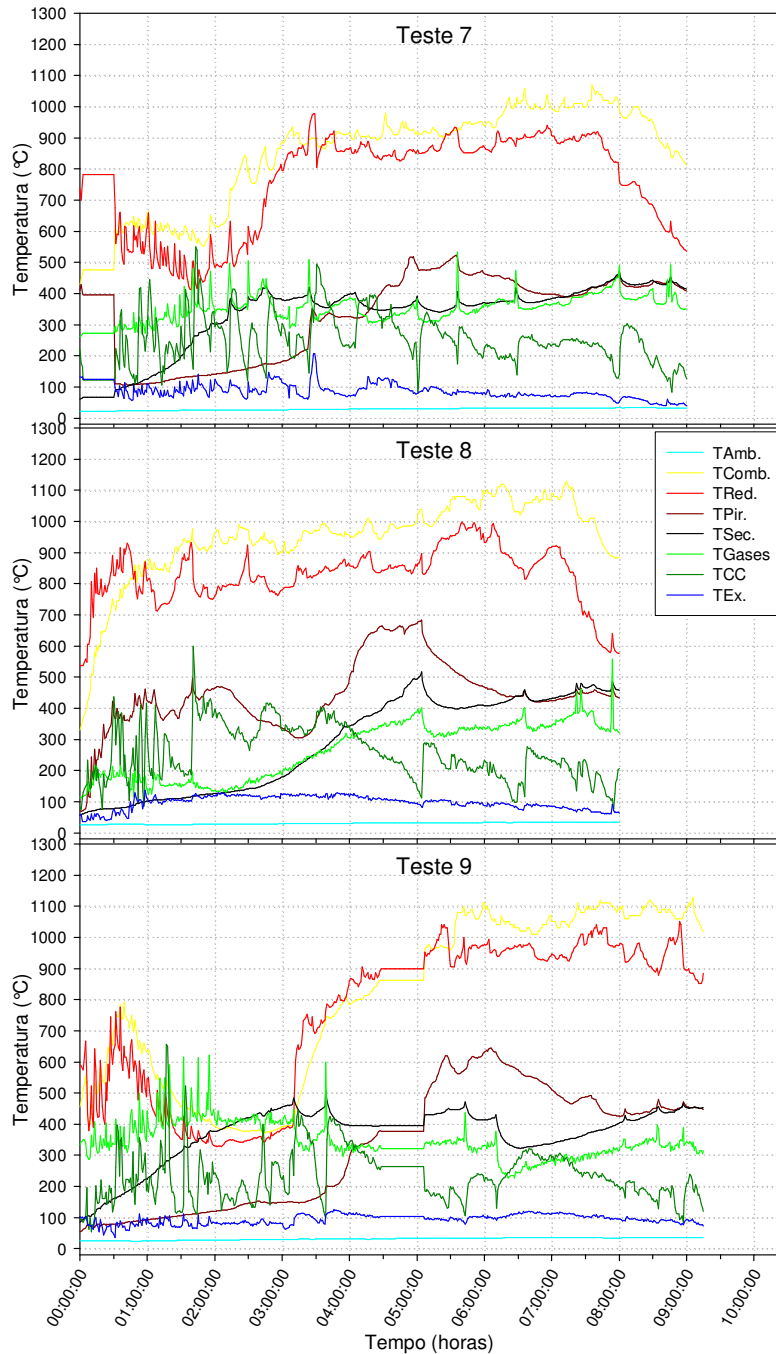


Figura 17. Variação da temperatura no interior do gaseificador para as diversas zonas do reator, para o comprimento de partícula de 100 cm, para os Testes 7, 8 e 9, nas frequências de 40, 50 e 60 Hz, com vazão média de ar comburente no gaseificador de 0,0124, 0,0174 e 0,0141 kg/s, respectivamente.

Os testes realizados com lenha de comprimento comercial (100 cm) tiveram um desempenho desuniforme nas primeiras horas de gasificação em relação à temperatura, o que pode ter ocasionado variações na produção de gás. As dimensões da lenha podem ter

influenciado a combustão e, conseqüentemente, em todo o processo. Mesmo assim, os resultados foram satisfatórios tendo em vista a economia de energia e mão de obra, comparativamente com a fabricação dos chips. Além disso, para a fabricação dos chips seria necessário um equipamento adequado capaz de transformar a madeira em pequenos pedaços. A temperatura de saída do ar do ventilador também se manteve próximo a faixa dos 100 °C, como nos outros testes.

Na Figura 18 apresentam-se a variação da temperatura no interior do gaseificador durante o tempo de operação do sistema para o teste conduzido com chips de lenha de eucalipto.

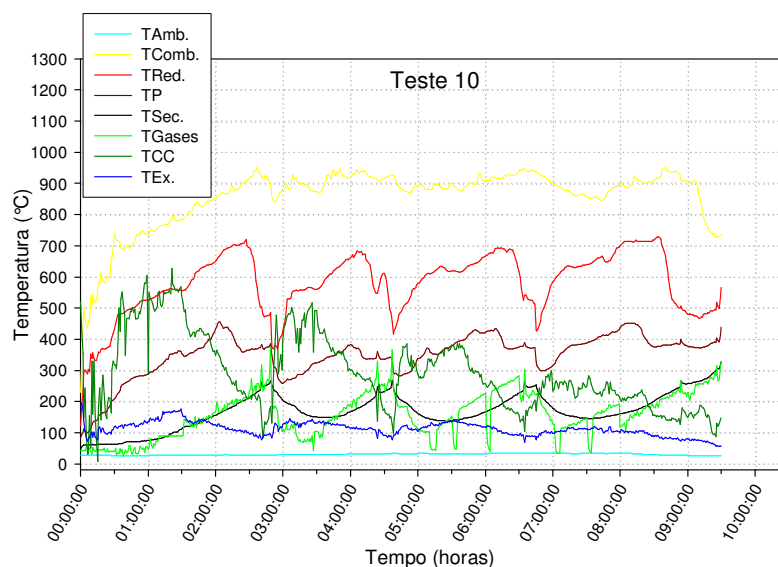


Figura 18. Variação da temperatura no interior do gaseificador para as diversas zonas do reator, durante o tempo de operação, para os chips de lenha de eucalipto para o Teste 10 na frequência de 50 Hz, com vazão média de ar comburente no gaseificador de 0,0159 kg/s.

Com o uso de chips de madeira de eucalipto, os resultados de temperatura foram mais parecidos com os resultados encontrados na bibliografia, onde a maior temperatura ocorreu na altura da grelha (zona de combustão), diminuindo consideravelmente no sentido vertical, de baixo para cima. Pelo gráfico também é possível observar que houve diferença em relação aos outros testes, visto que as maiores temperaturas se concentraram na parte inferior enquanto nas outras partes do reator as temperaturas foram bem menores. Este fato pode ser associado à forma de distribuição e granulometria dos chips que tende a concentrar a combustão próxima as entradas de ar.

Outro dado interessante foi da temperatura se apresentar de forma mais constante que os demais, oscilando somente durante o carregamento do gaseificador.

Neste teste foi observado um ótimo comportamento do equipamento que, apesar das grandes temperaturas geradas no interior do reator, não apresentou aquecimento elevado

nas superfícies externas, pois boa parte do calor perdido pelo reator foi conduzido a câmara de combustão pelo ar que circulava ao redor do reator.

Nas Figuras 19, 20, 21 e 22 são apresentados os valores da composição dos gases de saída do reator durante os testes. Esses dados estão em porcentagem volumétrica.

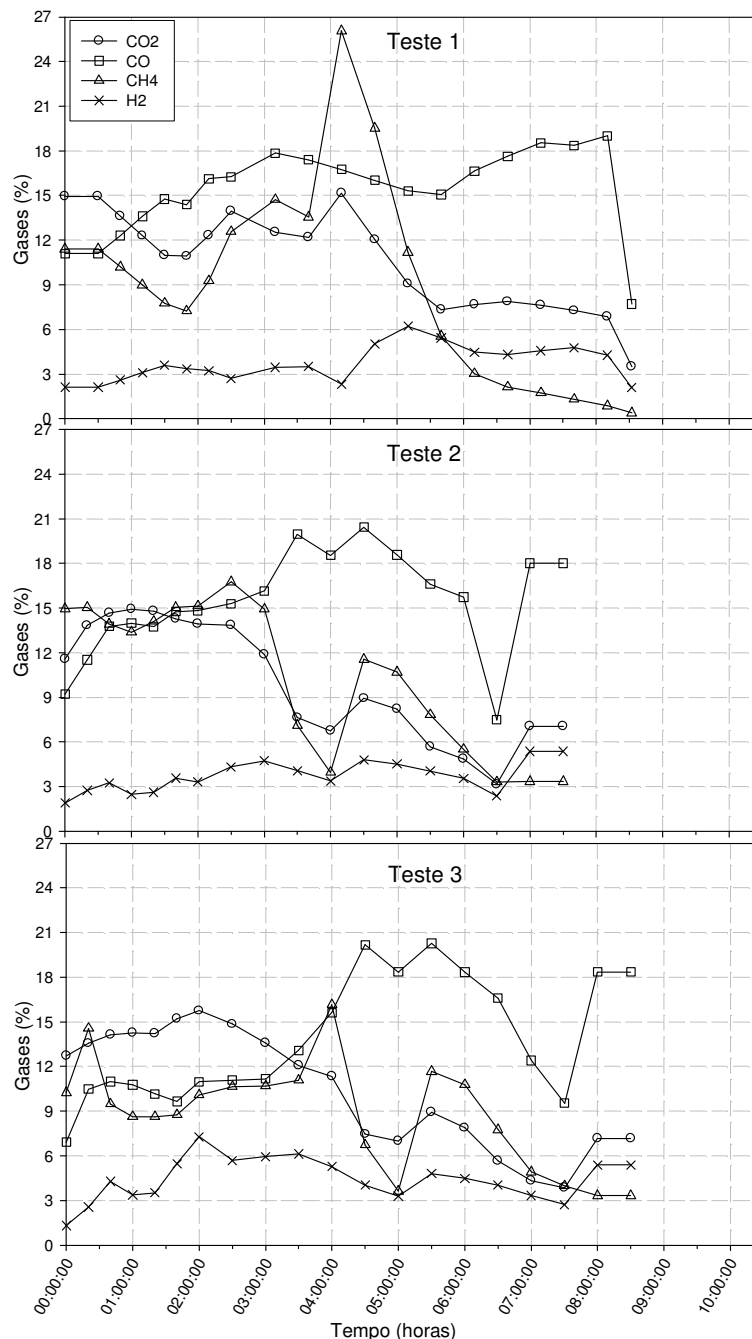


Figura 19. Variação da composição do gás de síntese observado para os Testes 1, 2 e 3 durante o experimento, com tocos de lenha de eucalipto com 15 cm de comprimento, nas freqüências de 40, 50 e 60 Hz, com vazão mássica de ar comburente no gaseificador de 0,0150, 0,0141 e 0,0129, respectivamente.

De acordo com a Figura 19, houve a tendência da concentração de CO ser superior a concentração dos outros gases analisados durante a gaseificação, principalmente após 4 horas de funcionamento do gaseificador.

A quantidade registrada dos gases gerados está próxima de dados de literatura para o tipo de gaseificador desenvolvido, sendo a média de 11% de H₂, 24% de CO, 9% de CO₂ e 3% de CH₄ em base seca (Quadro 04). Praticamente, em todos os testes onde foi usada lenha, a composição do gás de síntese apresentou a mesma tendência de composição.

Ao final do processo houve tendência de queda das concentrações dos gases, indicando a finalização do processo de gaseificação, ou seja, que toda lenha havia sido consumida. A concentração de CO₂, gás não combustível, era alta somente no início da gaseificação, decrescendo com o decorrer do processo. Isso pode ser relacionado com a oxidação do carbono, pela reação do monóxido de carbono com água, do craqueamento do alcatrão ou da oxidação parcial dos produtos da pirólise. Como no início do processo a concentração de água é maior, acredita-se que houve a maior formação de CO₂ em função da presença de água nesse período de tempo.

Na Figura 20 são apresentados os dados da concentração de CO, CO₂, CH₄ e H₂ no gás de síntese do reator para gaseificação de tocos de lenha de eucalipto com 50 cm de comprimento, para os Testes 4, 5 e 6, nas frequências de 40, 50 e 60 Hz, respectivamente.

A partir dessa figura é possível observar o comportamento da concentração dos gases gerados pelo reator de gaseificação, seguindo a mesma tendência dos resultados encontrados para a gaseificação de tocos de eucalipto com 15 cm de comprimento. Enquanto no final do teste a concentração de CO é maior que as demais, no início a concentração de CO₂ se apresenta com valores superiores aos demais tipo de gases analisados. A concentração de H₂ esteve na maior parte do tempo com níveis abaixo dos demais gases. O Teste 4 mostrou um comportamento mais uniforme das concentrações durante o tempo, possivelmente em função da menor frequência utilizada no ventilador, o que faz com que o funcionamento do sistema seja mais equilibrado.

Na Figura 21 apresenta-se a variação da concentração de gases na saída do reator de gaseificação de tocos de lenha de eucalipto, para os Testes 7, 8 e 9, durante o período do experimento, com tocos de lenha de eucalipto com 100 cm de comprimento, nas frequências de 40, 50 e 60 Hz, respectivamente.

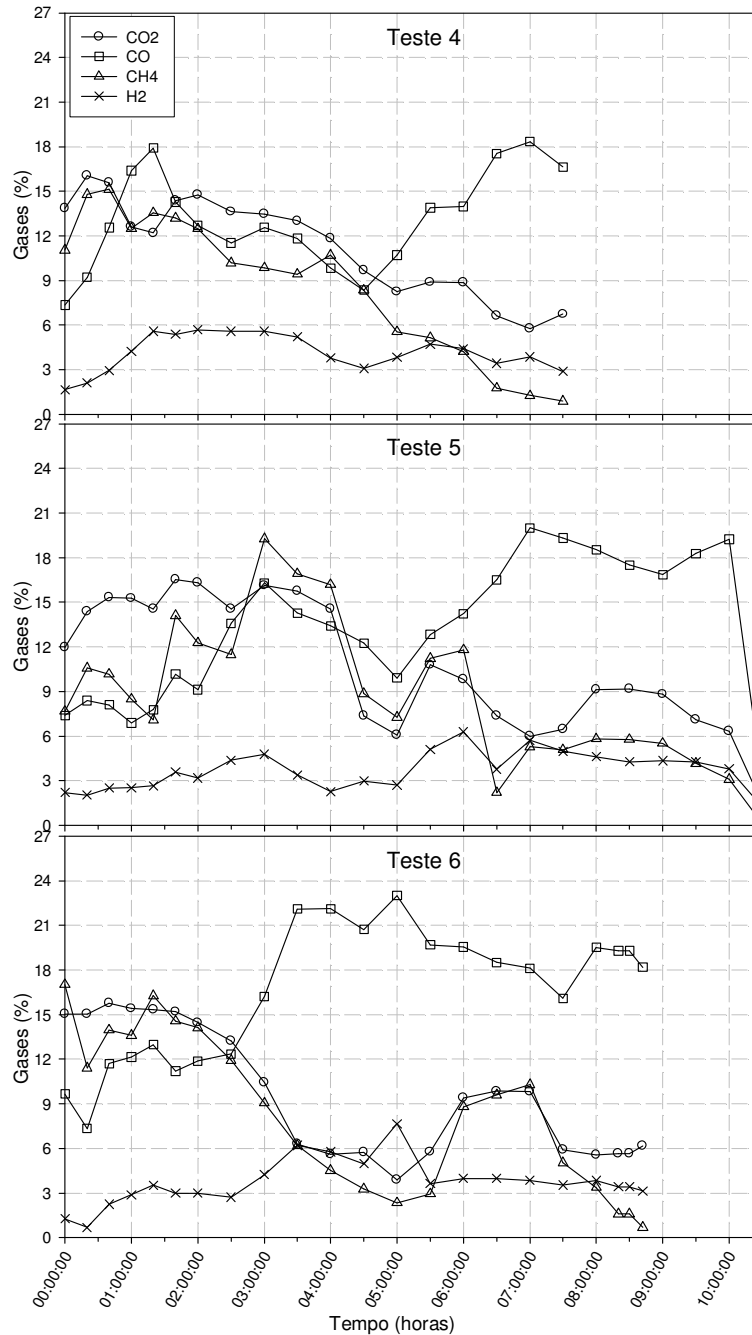


Figura 20. Variação da composição do gás de síntese observado para os Testes 4, 5 e 6, durante o tempo experimental, com tocos de lenha de eucalipto com 50 cm de comprimento, nas frequências de 40, 50 e 60 Hz, com vazão mássica média de ar comburente no gaseificador de 0,0120, 0,0114 e 0,0116 kg/s, respectivamente.

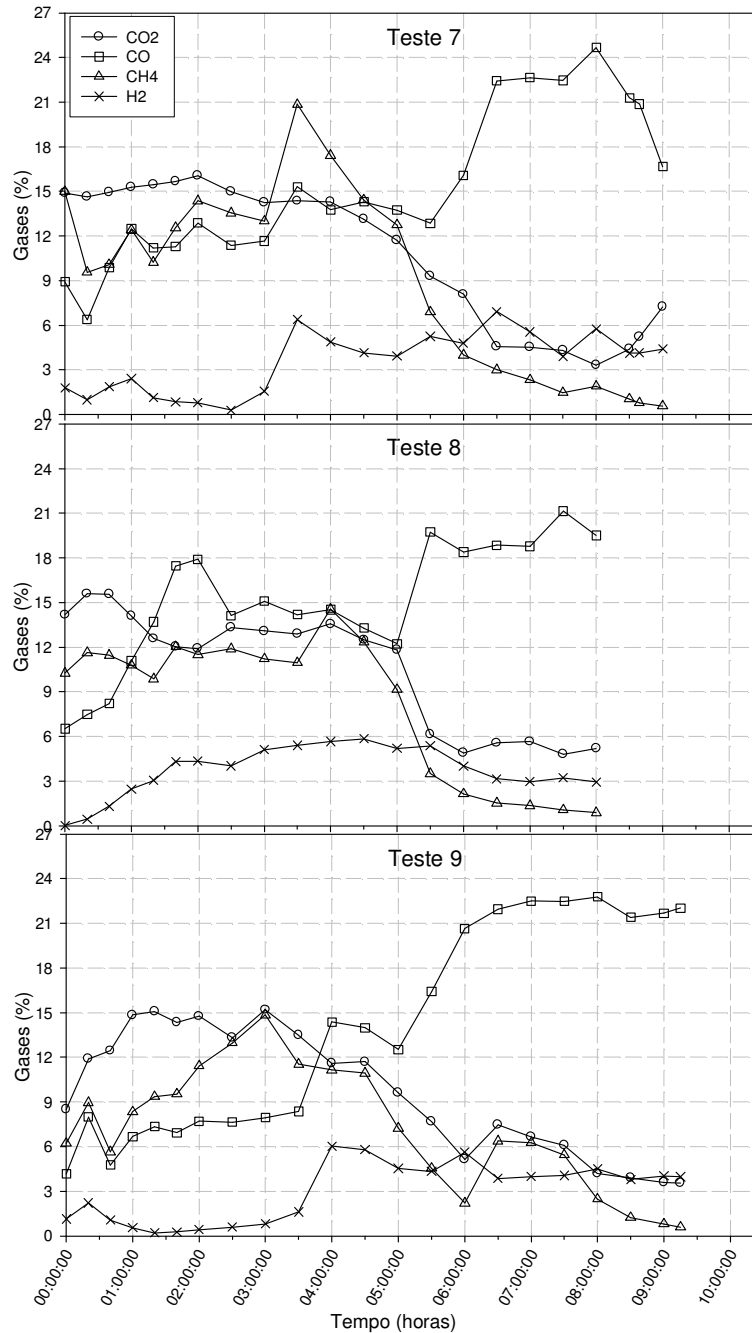


Figura 21. Variação da composição do gás de síntese observado para os Testes 7, 8 e 9, com pedaços de 100 cm de comprimento, nas frequências de 40, 50 e 60 Hz, com vazão mássica média de ar comburente no gaseificador de 0,0124, 0,0174 e 0,0141 kg/s, respectivamente.

Os gases gerados com lenha de tamanho comercial (100 cm de comprimento) apresentaram tendência semelhante aos outros tipos de lenha, sempre aumentando a concentração de monóxido de carbono ao final do processo. Para os demais gases houve queda brusca na concentração a partir das cinco horas de operação do gaseificador.

Na Figura 22 é apresentada a variação da composição do gás de síntese do reator de gaseificação de biomassa, observada para o Teste 10 realizado com chips de lenha de eucalipto, com a frequência de 50 Hz.

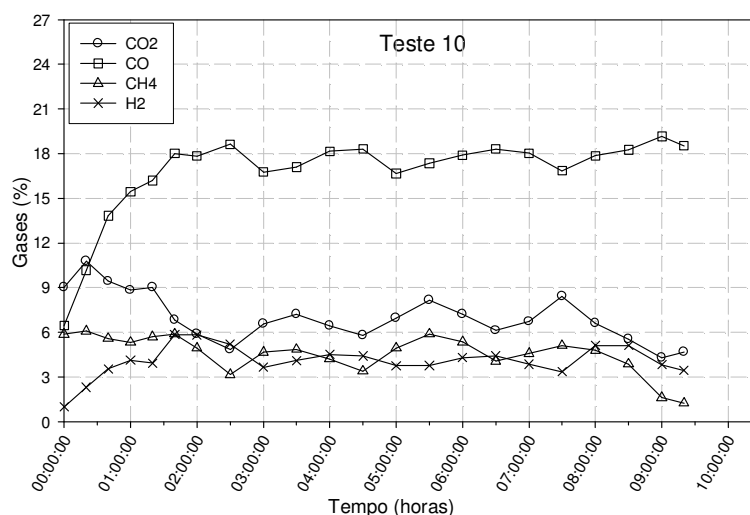


Figura 22. Variação da composição do gás de síntese observado para o Teste 10 na frequência de 50 Hz, com vazão mássica média de ar comburente no gaseificador de 0,0159 kg/s, realizado com chips de lenha de eucalipto.

No Teste 10, a composição de gases estabilizou logo após o início do processo e manteve-se assim até o final. A diferença para os testes em que foi usada lenha, consiste na grande produção de CO, enquanto nos outros testes houve também uma quantidade considerável de metano, principalmente no início do processo de gaseificação. Apesar disso, a queima dos gases sempre ocorreu de forma homogênea propiciando uma estável geração de calor ao longo do processo, em virtude da composição homogênea do gás de síntese resultante da gaseificação dos chips. Mudanças na composição são observadas somente nos momentos em que eram realizados os reabastecimentos dos chips, ou nos momentos que antecediam o reabastecimento, em virtude da redução da quantidade de combustível no reator.

As Figuras 23, 24, 25 e 26 apresentam a composição do ar quente na saída do ventilador, durante o período experimental, de acordo com os testes realizados. A composição do O₂ é em porcentagem volumétrica e a de CO em ppm.

De uma forma geral, de acordo com a Figura 23, a composição do ar quente de saída no ventilador esteve com uma concentração razoável de oxigênio. Porém, a concentração de CO oscilou e apresentou valores elevados aos esperados para o sistema proposto. Várias tentativas foram realizadas no sentido de melhorar a queima dos gases na câmara de combustão. No entanto, não foi possível obter resultados satisfatórios com baixas concentrações de CO no ar quente. Uma possível explicação para a concentração de

CO ser mais alta no início do processo de gasificação é a presença de vapor d'água nos gases devido à secagem da lenha no interior do reator. Outra hipótese seria a temperatura na câmara de combustão de gases, que na maioria dos testes não foi muito alta. Isso teria contribuído para que a combustão do CO fosse incompleta, já que a temperatura mínima para a combustão completa é de 650°C. Com isso, parte do CO não sofreu combustão e foi eliminado no ar de saída.

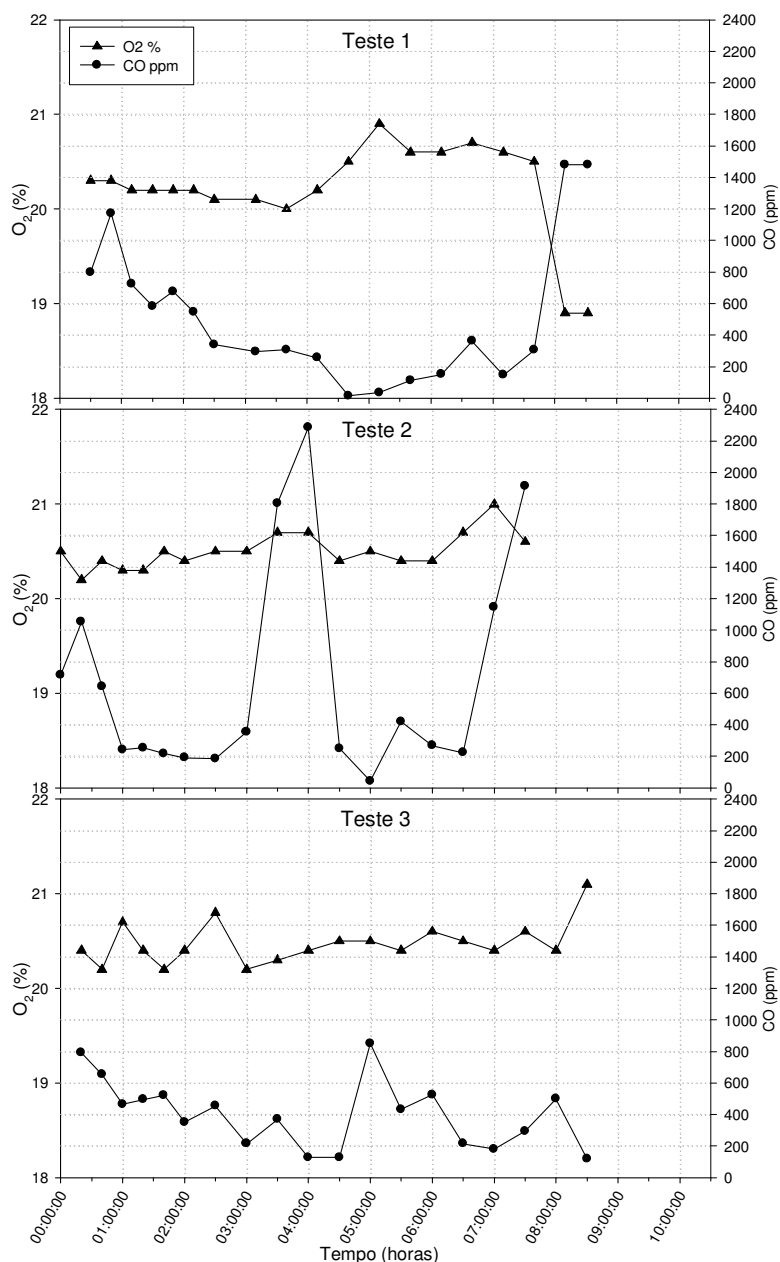


Figura 23. Variação da concentração de O₂ e CO no ar quente na saída do ventilador, para lenha de eucalipto com 15 cm de comprimento, nos Testes 1, 2 e 3, com freqüências de 40, 50 e 60 Hz, com vazão mássica média de ar comburente no gaseificador de 0,0150, 0,0141 e 0,0129 kg/s, respectivamente.

Na Figura 24 é apresentada a variação na concentração de O₂ e CO no ar quente de saída do ventilador, durante os testes realizados com tocos de eucalipto com 50 cm de comprimento, para os Testes 4, 5 e 6, nas frequências 40, 50 e 60 Hz, respectivamente.

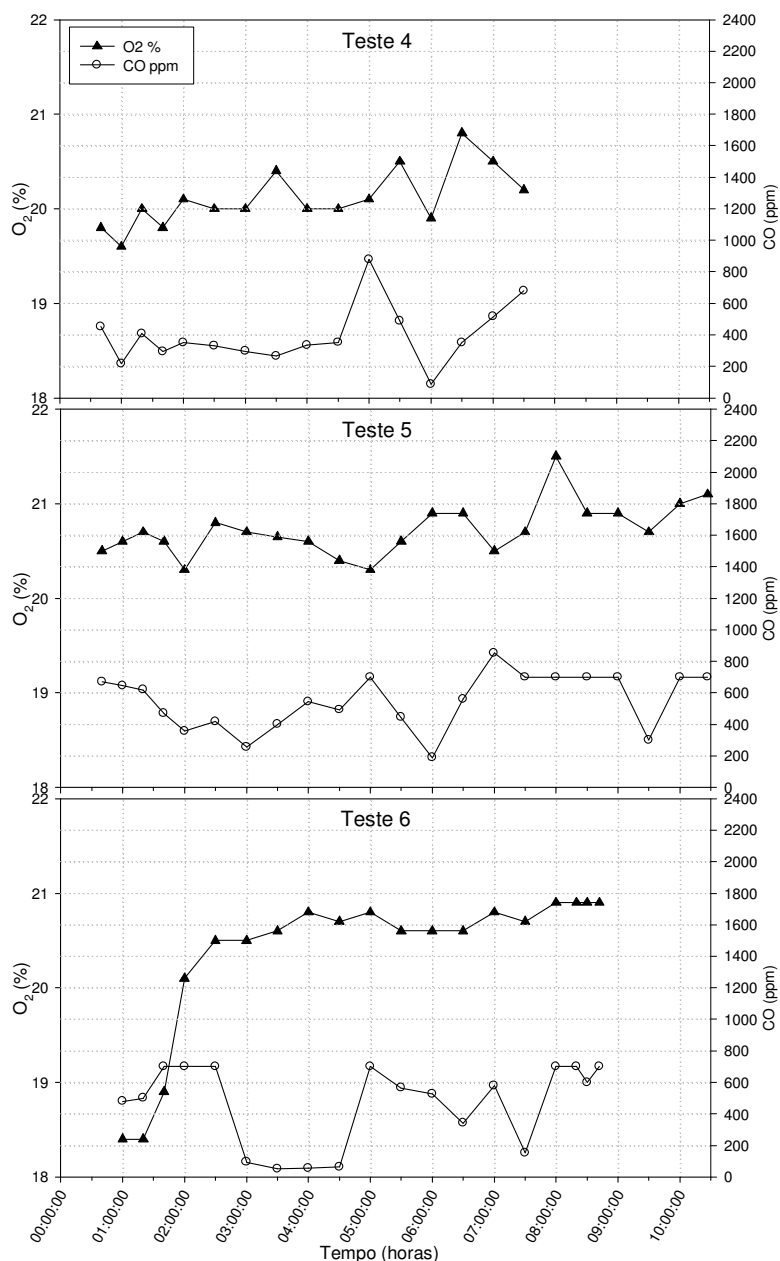


Figura 24. Variação da concentração de O₂ e CO no ar quente na saída do ventilador, para lenha de eucalipto com 50 cm de comprimento, nos Testes 4, 5 e 6, com frequências de 40, 50 e 60 Hz, com vazão mássica média de ar comburente no gaseificador de 0,0120, 0,0114 e 0,0116 kg/s, respectivamente.

Como nos testes anteriores, por alguns momentos chegou-se a ter valores próximos a zero ppm para a concentração de CO. Porém, no início e final da gaseificação os valores observados foram elevados em função do processo não ocorrer de forma completa devido à

alta umidade nos gases ou a pouca quantidade de combustível no reator de gaseificação, o que pode modificar a composição do gás de síntese, tornando-o mais pobre quando o objetivo é a combustão desse gás.

Na Figura 25 são apresentadas as concentrações de CO e O₂ na saída do ventilador, para os testes realizados com tocos de lenha de eucalipto com 100 cm de comprimento, nas freqüências de 40, 50 e 60 Hz.

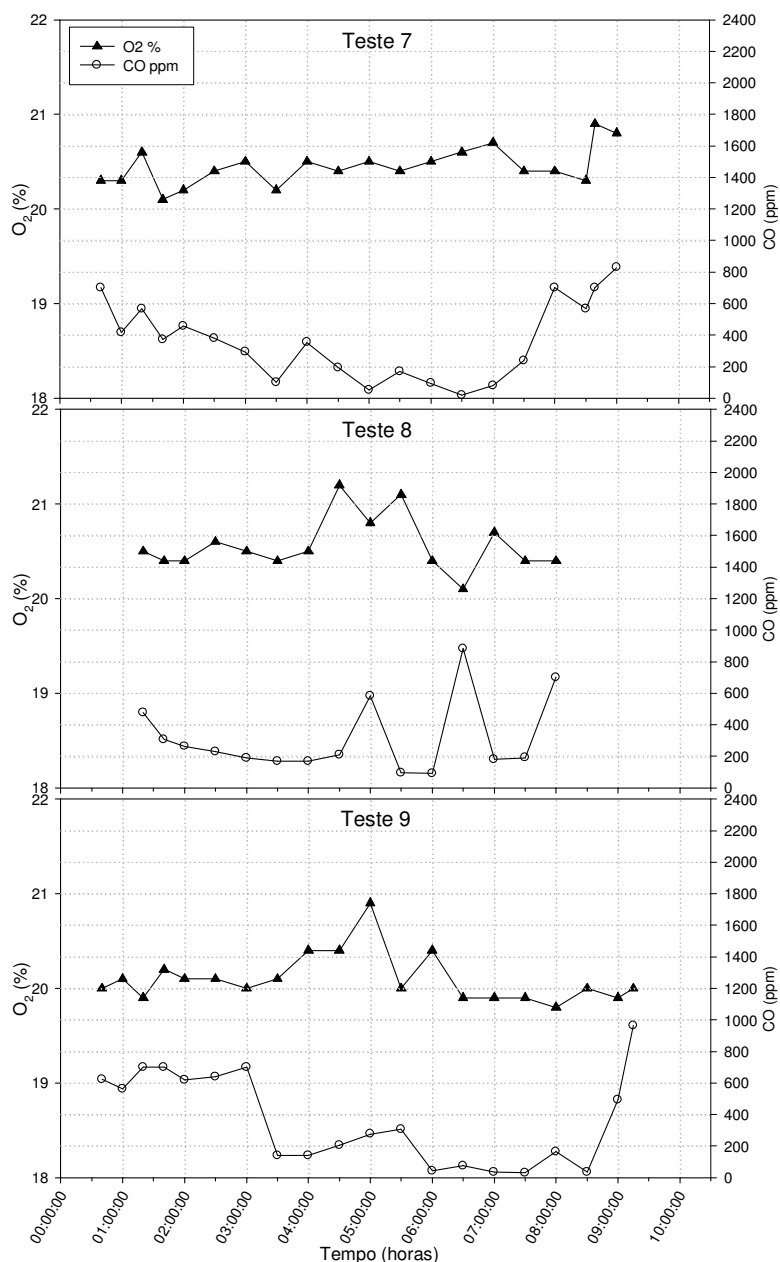


Figura 25. Variação da concentração de O₂ e CO no ar quente na saída do ventilador, para lenha com 100 cm de comprimento, nos Testes 7, 8 e 9, com freqüências de 40, 50 e 60 Hz, com vazão mássica média de ar comburente no gaseificador de 0,0124, 0,0174 e 0,0141 kg/s, respectivamente.

Os valores observados de O₂ e CO para os testes 7, 8 e 9 são mostrados na Figura 25. Nesses testes, feitos com lenha de tamanho comercial (100 cm) a tendência foi a mesma que nos testes anteriores feitos com lenha de dimensões menores, de apresentar maior concentração de CO no início e final da gasificação. Porém, no teste 8 houve alguns picos deste gás durante o experimento, indicando instabilidade ou variação no sistema, geralmente provocada por mudanças na composição do gás de síntese. Mesmo assim, esses testes apresentaram resultados melhores que os outros, indicando que houve melhorias na combustão do gás de síntese.

Na Figura 26 apresenta-se a variação da concentração de O₂ e CO na saída do ventilador, durante o Teste 10, realizado na frequência de 50 Hz com chips de lenha de eucalipto.

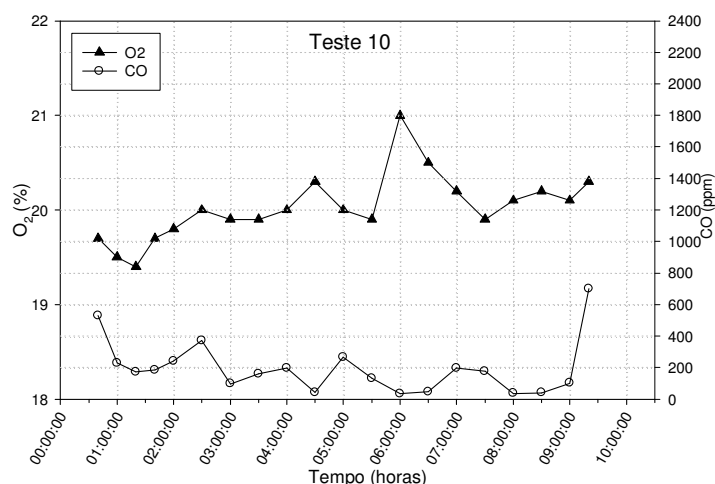


Figura 26. Variação da concentração de O₂ e CO no ar quente de saída do ventilador, para o sistema operando com chips, para o Teste 10 na frequência de 50 Hz, com vazão mássica média de ar comburente no gaseificador de 0,0159 kg/s.

No Teste 10 realizado com chips a tendência foi a mesma dos demais, revelando que independente do tipo de combustível, as concentrações de CO do ar na saída do ventilador pouco variaram durante o experimento. Mesmo com a concentração mais homogênea dos gases, a queima dos mesmos não foi totalmente realizada na câmara de combustão, indicando problemas na combustão e não com a geração do gás de síntese. Porém, os resultados desse teste foram os melhores em comparação com todos os outros realizados, indicando que os chips se adequaram melhor ao sistema de gaseificação desenvolvido.

A partir dos resultados encontrados para a concentração de CO na saída do ventilador durante os 10 testes, pode-se verificar que a câmara de combustão desenvolvida não foi eficiente na queima do gás de síntese gerado. Sugere-se o aperfeiçoamento da câmara de combustão, na tentativa de diminuir a concentração de CO ao final do processo.

No Quadro 07 são apresentados os valores médios de eficiência e fator de ar para todos os testes.

Quadro 07. Eficiência média global e fator de ar médio para todos os testes realizados

Teste	Tipo de lenha (comprimento em cm)	Frequência de operação do motor do ventilador (Hz)	Vazão mássica média de ar primário no gaseificador (kg/s)	Eficiência Térmica (%)	Eficiência Global (%)	Fator de Ar (decimal)
1	15	40	0,0150	47,98	64,12	0,6210
2	15	50	0,0141	62,14	79,27	0,5899
3	15	60	0,0129	87,79	93,62	0,5924
4	50	40	0,0120	82,43	91,22	0,5792
5	50	50	0,0114	63,09	80,51	0,7720
6	50	60	0,0116	79,83	89,00	0,5701
7	100	40	0,0124	65,47	81,02	0,6574
8	100	50	0,0174	86,18	92,23	0,7684
9	100	60	0,0141	90,39	94,58	0,5775
10	Chips	50	0,0159	92,75	95,40	0,5560

Os cálculos de eficiência global e fator de ar foram realizados levando-se em conta o consumo médio e não o consumo exato de lenha a cada intervalo de leitura dos dados, pelas dificuldades da realização dessa medição. Assim, optou-se por dividir o consumo de lenha em partes iguais durante o tempo de operação do sistema de gaseificação/combustão, obtendo-se uma média que foi utilizada nos cálculos.

Pelo Quadro 07, pode-se observar que houve a tendência da eficiência global ser maior para os testes com maior frequência do ventilador (maior velocidade do ventilador) para o mesmo tipo de combustível sólido. Isso se explica pela maior quantidade de ar que troca energia com as paredes do reator, diminuindo as perdas para o ambiente externo, pois essa energia é carregada pelo ar para a câmara de combustão.

A eficiência global do primeiro teste esteve um pouco abaixo da eficiência dos outros testes, provavelmente em função das maiores perdas de calor para o ambiente através das paredes do reator para gaseificação, que não foi totalmente aproveitado em função da baixa quantidade de ar que passava na câmara com a função de arrastar esse calor para o combustor. Quanto maior a velocidade do ventilador, maior a quantidade de ar que passava entre o reator de gaseificação e as paredes externas do conjunto, aumentando a eficiência pelo carregamento do calor para a câmara de combustão do gás de síntese, diminuindo as perdas para o ambiente e aumentando a eficiência nas maiores rotações de utilização do ventilador (maiores frequências).

Para que houvesse produção de gás suficiente para a queima de forma constante no combustor, foi necessária a entrada de ar em quantidades maiores que o recomendado para a gaseificação (20 a 40% da quantidade estequiométrica). Assim, optou-se pelo

funcionamento do gaseificador com maiores quantidades de ar primário no reator de gaseificação, prezando pelo bom funcionamento do sistema do que pela operação segundo recomendações da bibliografia.

A eficiência global e o fator de ar para os Testes 4, 5 e 6 apresentaram variações principalmente em relação ao fator de ar ao final do Teste 5 que, provavelmente, devido pouco combustível restante ao final do teste no interior do gaseificador, ocasionou a diminuição da perda de carga e aumento da quantidade de ar que entrava no gaseificador, aumentando assim o fator de ar. No Teste 6, com o objetivo de prevenir o acontecido no Teste 5, obstruiu-se totalmente a entrada de ar do reator, fazendo com que o fator de ar fosse nulo.

Nos Testes 7, 8 e 9 optou-se pela obstrução da entrada de ar no reator ao final do processo de gaseificação a fim de garantir a geração de gases até o esgotamento do combustível. Esses testes foram caracterizados por melhor desempenho do equipamento proposto, indicando que os tocos de lenha de eucalipto com 100 centímetros de comprimento podem ser usados na gaseificação.

No Teste 10, a eficiência variou conforme o consumo de combustível, tendo em vista que foram feitos carregamentos de chips as três, cinco e sete horas de operação. As perdas de energia foram mínimas, indicando que o sistema proposto é muito eficiente para este tipo de combustível sólido.

No Quadro 08 são apresentados os dados de vazão mássica média, temperatura média e incremento médio de temperatura do ar de exaustão, para os testes realizados com o sistema.

Quadro 08. Vazão mássica média do ar de exaustão, temperatura média do ar de exaustão na saída do ventilador e incremento médio de temperatura no ar de exaustão em relação à temperatura do ar ambiente

Teste	Tipo de lenha (comprimento em cm)	Frequência de operação do motor do ventilador (Hz)	Vazão mássica média de ar primário no gaseificador (kg/s)	Vazão mássica média do ar de exaustão (kg/s)	Temperatura média de exaustão (°C)	Incremento médio de temperatura (°C)
1	15	40	0,0150	0,5671	100,7	71,3
2	15	50	0,0141	0,9898	78,5	48,1
3	15	60	0,0129	1,2899	80,5	50,8
4	50	40	0,0120	1,2861	77,1	47,5
5	50	50	0,0114	0,8145	79,8	49,4
6	50	60	0,0116	0,9519	87,5	60,3
7	100	40	0,0124	0,7609	86,4	57,2
8	100	50	0,0174	1,0104	95,1	64,3
9	100	60	0,0141	1,2298	92,7	61,2
10	Chips	50	0,0159	1,1310	117,0	87,7

Pelo Quadro 08 é possível observar o incremento médio de temperatura no ar de exaustão em cada teste, sendo que o melhor resultado apresentado foi do teste realizado com os chips de lenha de eucalipto, estando de acordo com os resultados de eficiência apresentados no Quadro 07. A partir desses dados é possível fazer o planejamento do uso do gaseificador para diferentes atividades que demandem ar quente.

O Quadro 09 apresenta a composição média do gás gerado pelo reator no processo de gasificação para os testes.

Quadro 09. Composição média e PCI do gás gerado pelo reator de gasificação para todos os testes realizados

	Lenha (cm)	Freq. (Hz)	Vazão mássica média de ar primário no gaseificador (kg/s)	Gases				PCI kJ/m ³	Média kJ/m ³
				CO ₂ (%)	CO (%)	CH ₄ (%)	H ₂ (%)		
Teste 1	15	40	0,0150	10,65	15,30	8,95	3,66	5.525,60	
Teste 2	15	50	0,0141	10,18	15,37	10,55	3,69	6.113,59	5.656,72
Teste 3	15	60	0,0129	10,55	13,66	8,75	4,41	5.330,96	
Teste 4	50	40	0,0120	11,45	13,09	8,89	4,11	5.276,45	
Teste 5	50	50	0,0114	10,90	13,14	8,78	3,66	5.194,75	5.301,65
Teste 6	50	60	0,0116	9,79	16,44	8,28	3,68	5.433,75	
Teste 7	100	40	0,0124	10,94	15,14	9,01	3,45	5.506,27	
Teste 8	100	50	0,0174	10,81	14,86	8,33	3,63	5.245,18	5.122,65
Teste 9	100	60	0,0141	9,78	13,74	7,19	2,88	4.616,51	
Teste 10	chips	50	0,0159	7,06	16,63	4,59	4,06	4.178,45	4.178,45

Pelos resultados do Quadro 09, pode-se observar que a concentração média de gases manteve-se estável quando foi utilizada lenha como combustível independente do tamanho. Para o teste realizado com chips, a concentração média de metano foi menor em relação à lenha. Neste teste, as concentrações dos gases se aproximaram de valores da literatura, tendo em vista que o tipo de combustível é semelhante ao usado normalmente em gaseificadores de pequeno porte. O PCI do gás gerado no gaseificador esteve próximo aos resultados encontrados na bibliografia sobre o assunto. Apenas quando se usou chips é que o PCI diminuiu, provavelmente em função das características granulométricas.

No Quadro 10 apresenta-se a concentração de oxigênio e monóxido de carbono presentes no ar quente na saída do ventilador.

Pelos resultados do Quadro 10, pode-se observar que a concentração média de CO esteve sempre abaixo dos 900 ppm. Este valor, apesar de não representar significativas perdas de energia na queima dos gases, indica que a câmara de combustão não foi eficiente para promover a combustão completa desses gases. O ar quente gerado ao final do processo pode ser utilizado em vários processos agrícolas e agroindustriais, desde que não sejam necessários baixos níveis de CO na composição.

Quadro 10. Concentração média de O₂ e CO para todos os testes realizados

	Tipo de lenha (cm)	Frequência (Hz)	Vazão mássica média de ar primário no (kg/s)	O ₂ (%)	CO (ppm)
Teste 1	15	40	0,0150	20,21	857,16
Teste 2	15	50	0,0141	20,50	678,39
Teste 3	15	60	0,0129	20,47	404,68
Teste 4	50	40	0,0120	20,29	393,53
Teste 5	50	50	0,0114	20,78	550,61
Teste 6	50	60	0,0116	20,35	468,89
Teste 7	100	40	0,0124	20,45	364,10
Teste 8	100	50	0,0174	20,56	316,00
Teste 9	100	60	0,0141	20,20	372,45
Teste 10	chips	50	0,0159	20,02	197,70

Para aplicações em aquecimento de ambientes devem ser observados os limites de tolerância para cada situação, de acordo com as normas específicas. Para o caso específico de aquecimento de aviários, mesmo com a diluição da concentração pela mistura do ar quente gerado pelo gaseificador com o ar de existente dentro do galpão, não se aconselha o uso do equipamento, pois os limites sugeridos para a concentração de CO nesses ambientes são de 10 ppm.

1.5.4 Problemas encontrados na operação do gaseificador de biomassa e sugestões para trabalhos futuros

- Dificuldade no carregamento de lenha. Mesmo com a estratégia de fazer o recarregamento de lenha com o ventilador funcionando, a entrada de ar ambiente pela porta, quando da abertura, provocava a ignição dos gases que estavam na parte superior do reator, levando perigo ao operador. Este fato pode ser contornado com o aprimoramento do sistema de recarga, que pode contar com uma antecâmara, para realizar o mesmo, evitando assim contato direto entre o operador e os gases e calor gerados no equipamento.
- Falta de um sistema de limpeza da grelha. Apesar de o gaseificador contar com um cinzeiro de capacidade suficiente para acumular cinzas de pelo menos um dia de operação, verificou-se a necessidade de um sistema de limpeza da grelha, pois, acredita-se que em um uso prolongado sem o desligamento do mesmo, poderá haver o acúmulo de cinzas na parte superior da grelha, tendo em vista o sistema de operação contracorrente utilizado no equipamento. Este tipo de acúmulo de cinzas poderá provocar a formação de sólidos acima da grelha, pela sílica presente no combustível submetida a altas temperaturas, atrapalhando o bom funcionamento do gaseificador.

- Combustão incompleta na câmara de combustão desenvolvida para a queima dos gases gerados pelo reator de gaseificação. Esse problema foi observado ao longo dos testes, indicando a necessidade de estudos mais aprofundados sobre a câmara de combustão ou aos mecanismos de controle de admissão de ar. Isso é necessário para que o equipamento desenvolvido possa ser utilizado sem qualquer problema de concentração de CO no ar quente gerado ao final do processo.

1.6 CONCLUSÕES

De acordo com as condições em que foi conduzido o experimento, as conclusões são:

- o gaseificador de biomassa desenvolvido foi capaz de gerar gases de síntese a partir de lenha de eucalipto de qualquer dimensão. A câmara de combustão para os gases gerados no gaseificador foi capaz de promover a queima dos mesmos, porém, não totalmente eficiente na queima do monóxido de carbono;
- o sistema automático de controle de temperatura do ar quente na saída do ventilador de exaustão se mostrou eficiente, visto que foi capaz de controlar esta temperatura sem a necessidade de ajustes manuais e sem a necessidade de outros controles nas entradas de ar;
- a eficiência global do sistema proposto gaseificador/combustor de gases foi alta, indicando o bom funcionamento do sistema na geração de gás com vistas a secagem de grãos e aquecimento de aviários;
- os resultados de PCI do gás de síntese foram condizentes com aqueles encontrados na bibliografia; e
- a concentração média de CO no ar quente de exaustão indica que pode ser utilizado em aplicações diretas desde que sejam respeitados os limites máximos de concentração do mesmo na atividade a ser desenvolvida.

1.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAZZO, E. **Geração de vapor**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995. (Série didática).

CAMARGO, C.A. (Coord). **Conservação de energia na indústria de açúcar e do álcool**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1990. (Publicação IPT, 1817).

CARBONO BRASIL, **Créditos de carbono**. In: <http://www.carbonobrasil.com/textos.asp?Id=62&idioma=1>. Acesso em: 05/03/2007.

- CHANDRA, P.K., PAYNE, F.A. Turndown ratio of gasifier-combustor predicted by a simulation model. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v. 29, n. 6, p.1748-53, 1986.
- CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Editora da Unicamp, Campinas, 2008, 733p.
- CORTEZ, L. A. B. , LORA, E. S. Tecnologias de conversão de energéticas de biomassa. EDUA/EFEI, Manaus – AM, 1997, 540p
- LOPES, R.P. **Desenvolvimento de um sistema gerador de calor com opção para aquecimento direto e indireto do ar**. Viçosa: 2002. 220 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa.
- LORA, E. S.; HAPP, J. F. & CORTEZ, L. A. B. **Caracterização e disponibilidade da biomassa**. *IN*: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.S. **Tecnologias de conversão energética da biomassa**. Manaus: EDUA/EFEI. 1997. p 5-38.
- MARTIN, Samuel. **Desenvolvimento de um gaseificador de biomassa de fluxo concorrente**. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2005.
- MELO, E.C.; LOPES, D. de C.; CORRÊA, P.C. **GRAPSI – Programa computacional para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar**. Energia na Agricultura. Viçosa, v. 12, n. 2, p. 154-162, 2004.
- NOGUEIRA, A. H. N.; LORA, E. E. S.; TROSSERO, M. A; FRISK, T. **Dendroenergia, Fundamentos e Aplicações**. Brasília, ANNEL, 2000. 144p.
- NUBER, F. **Cálculo térmico de caldeiras e fornalhas**. Trad. Ruy Pinto da Silva Sieczkowski. In: Manual do engenheiro. Porto Alegre: Editora Globo, 1975, v.7, tomo II, p.588-824.
- SANTOS, I. S. **Reator de gaseificação de biomassa em fluxo contracorrente**. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2003.
- SANTOS, W. R. **Controle e avaliação de um conjunto gaseificador-combustor de fluxo concorrente, utilizando como combustível a biomassa da lenha de eucalipto**. Viçosa: UFV, 2008, 67p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa.
- VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E. & BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2003.
- VLASOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. Curitiba: Editora da UFPR, 2001.
- VIEIRA, A.C. **Gaseificação de briquetes de casca de eucalipto**. 2005. p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.
- ZANATTA, Fábio Luiz. **Gaseificador de biomassa no aquecimento de aviários e sua relação com o conforto térmico, qualidade do ar e desempenho produtivo de frangos de corte**. 131 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2007.

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

CAPÍTULO 2. Produção de metano usando cama de aviário com vistas a suprir as necessidades energéticas do período de aquecimento na produção de frangos de corte

2.1 INTRODUÇÃO

Segundo dados da União Brasileira de Avicultura (UBABEF, 2011), O Brasil é o maior exportador de carne de frango do mundo, sendo responsável por 38% das exportações. Somente no ano de 2010 foram exportadas 3,8 milhões de toneladas de carne de frango, atingindo um novo recorde. Em 2010 a produção de carne de frango no Brasil atingiu 12,230 milhões de toneladas, se aproximando da segunda colocação Chinesa, país que produziu 12,550 milhões de toneladas no mesmo período. Já a produção dos EUA, líder mundial, foi de 16,648 milhões de toneladas.

Com isso, torna-se evidente a importância da indústria avícola para a economia nacional, sendo muito importante na geração de emprego e renda para a população. Assim, deve-se trabalhar para manter os bons índices do setor, criando alternativas para melhorar a qualidade, diminuindo os custos e promovendo um desenvolvimento sustentável da cadeia sem agredir o meio ambiente.

Diante disso, busca-se criar alternativas para realizar o aquecimento dos aviários, visto que em torno de 15 a 30% dos custos totais de produção de frangos para o produtor integrado, são atribuídos no processo de aquecimento do aviário, dependendo da região, tipo de equipamento e época do ano (UBA, 2008).

Isso se explica pelo fato que nos primeiros dias de vida o sistema termorregulador dos pintainhos não está totalmente desenvolvido, sendo necessário dar condições de conforto para que mantenham a temperatura corporal ideal. De toda a energia ingerida, 80% é utilizada para a manutenção da homeotermia e apenas 20% é utilizada para a produção (ABREU, 2003). Por isso, apenas algumas horas de estresse por frio pode levar a desuniformidade do lote, atraso no crescimento, queda nos consumos de água e de ração e no ganho de peso (Silvestinni, 2001 citado por FERREIRA, 2004).

Para realizar o aquecimento das instalações, os produtores brasileiros usam principalmente lenha e gás liquefeito de petróleo (GLP). O aquecimento pode ser central, geralmente quando se usa fornalha a lenha, e localizado quando se aquece áreas específicas dentro do aviário (campânulas a GLP). A forma de aquecimento pode ser direta quando o calor da queima do combustível é aproveitado de forma integral ou indireta quando se usa algum tipo de trocador de calor. A quantidade de energia envolvida no aquecimento de aviários depende do tamanho da instalação e da quantidade de aves alojadas, além da qualidade do isolamento térmico, manejo das cortinas e condições climáticas locais (ZANATTA et al, 2009).

Por outro lado, a produção de resíduos é alta na atividade avícola, fazendo com que um potencial de geração de energia seja desperdiçado diariamente pelo desconhecimento de técnicas de transformação desses resíduos em biogás para produção de calor ou energia elétrica, demandados na atividade.

Com base nessas informações, é que se busca diminuir os custos com o aquecimento, adotando tecnologias mais eficientes e baratas. Nesse sentido, a biodigestão anaeróbia encaixa-se como promissora solução (LUCAS JR & SANTOS, 2000), pois, além de ser uma tecnologia relativamente barata, pode-se usar como substrato os resíduos da atividade avícola, tratando-os ao mesmo tempo em que é gerada a energia necessária para o processo de aquecimento.

2.2 REVISÃO DE LITERATURA

2.2.1 O processo de biodigestão anaeróbia

Segundo DEUBLEIN & STEINHAUSER (2008), a formação do metano é um processo biológico que ocorre naturalmente quando material orgânico é decomposto em uma atmosfera úmida, na ausência de ar, mas na presença de um grupo de microorganismos naturais metabolicamente ativos (metano bactérias).

A formação do metano através da biodigestão anaeróbia é um processo complexo, que pode ser dividido em quatro fases de degradação, nomeados de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanação. As fases individuais são realizadas por diferentes grupos de microorganismos em que uma espécie vive com os produtos de outra espécie. A primeira e a segunda fase, bem como a terceira e a quarta fases estão ligadas muito próximas umas com as outras (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008).

Assim, segundo DEUBLEIN & STEINHAUSER (2008), nas fases acontece o seguinte:

- Hidrólise: compostos não dissolvidos como celulose, proteínas e gordura, são quebrados em monômeros por exoenzimas de bactérias anaeróbicas estritas e facultativas;
- Acidogênica: os monômeros formados na hidrólise são degradados por bactérias anaeróbicas estritas e facultativas em ácidos orgânicos de cadeia curta, moléculas C1-C5, alcoóis, hidrogênio e dióxido de carbono;
- Acetogênica: nesta fase os microorganismos homoacetogênicos reduzem constantemente H_2 e CO_2 em ácido acético (reações exergônicas);
- Metanogênica: acontece estritamente em condições anaeróbicas (reações exergônicas), formando metano através do acetato e/ou CO_2 .

Como nesse tipo de processo biológico uma grande quantidade de fatores pode influenciar nas reações, seu controle torna-se complexo, dificultando a operação do biodigestor, principalmente na partida.

Entre os parâmetros que influenciam na produção de biogás, podemos citar a concentração de microorganismos, o tipo de substrato, a superfície específica do substrato, a desintegração, agitação, volume de carregamento, luz, temperatura, pH, potencial redox, a relação do carbono com nitrogênio e fósforo (C/N/P), a presença de micro elementos e a remoção do biogás produzido, além de vários inibidores como oxigênio, ácidos orgânicos, nitrato e amônio e amônia (DEUBLEIN & STEINHAUSER, 2008).

A temperatura exerce influência sobre a velocidade do processo, sendo comum dividi-la em três faixas: a termofílica entre 50 e 70°C, a mesofílica entre 20 e 45°C, e a psicrófila abaixo de 20°C (LUCAS JR & SANTOS, 2000). Segundo GERARDI (2003), organismos mesofílicos são aqueles que se desenvolvem melhor numa faixa de temperatura de 30 a 35°C, enquanto os termofílicos se desenvolvem melhor entre 50 e 60°C, sendo a temperatura ótima para a produção de metano em digestores anaeróbios em torno de 35°C.

Quanto a produção de biogás, de um modo geral, o material utilizado como cama diminui o potencial de produção de biogás. WEBB & HAWKES (1985), estudaram a digestão anaeróbia em cama de maravalha, utilizando tempos de retenção hidráulica entre 11,7 e 29,2 dias e variando os teores de sólidos voláteis (SV) nas cargas diárias entre 1 e 5%. Observaram que os rendimentos de biogás aumentaram com o aumento do TRH e na concentração de SV das cargas. Obtiveram produções entre 0,245 e 0,372 m³ de biogás por kg de SV adicionados com teor médio de metano de 59%. Os mesmos autores (WEBB & HAWKES, 1985), quando trabalharam com chorume de estrume de frangos obtiveram 0,41 a 0,44 m³ de biogás por kg de SV adicionados.

O inóculo, que consiste em uma massa de lodo (algum tipo de esterco já digerido) que contém populações de microorganismos, serve para inocular bactérias e acelerar o processo de biodigestão da biomassa. Pode ser usado em determinada proporção de matéria seca em relação ao total de matéria seca do substrato ou também de forma integral, quando a adição de substrato é feita em proporção ao teor de sólidos voláteis do inóculo.

JAMILA (1990), operou biodigestores com chorume de frangos com 6 e 10% de ST e TRH de 15, 22 e 30 dias. O rendimento de produção de biogás variou entre 0,2 e 0,4 m³ de biogás por kg de ST, com teores de metano variando entre 44,8 e 73,9%. Os melhores resultados foram alcançados com 6% de ST no afluente, temperatura de 34°C e 15 dias de TRH. SAVERY & CRUZAN (1972) obtiveram 0,13 m³ de biogás/ kg de estrume fresco de frangos.

LUCAS JR et al. (1993), citados por LUCAS JR & SANTOS (2000), observaram melhores rendimentos em cama de maravalha quando utilizaram inóculo, sendo também de

grande importância o teor de ST do substrato, pois o potencial de produção de biogás aumentou quando se utilizou, além do inóculo, substrato com 8% de sólidos. O potencial médio obtido por estes autores foi 0,29 m³ de biogás/kg de ST adicionados. Valores próximos, também utilizando cama de maravalha, foram obtidos por LUCAS JR et al. (1996), 0,25 e 0,28 m³ de biogás por kg de ST adicionados, com e sem o uso de inóculo, respectivamente.

O processo de biodigestão pode ocorrer de duas formas, em batelada ou de forma contínua. O processo em batelada consiste na biodigestão completa de uma quantidade de substrato, onde o reator recebe carga total de biomassa e somente é esvaziado após a total conversão da biomassa em biofertilizante e biogás. É vantajoso quando não há a necessidade de produção diária de biogás, ou para produções intermitentes de resíduos, onde não é possível fazer a alimentação diariamente.

Já o processo contínuo, acontece com a degradação constante do substrato, que é adicionado diariamente no reator, fazendo com que exista uma continuidade na produção de biogás. Esse processo é conveniente quando há a disponibilidade de resíduos e consumo de biogás diariamente.

2.2.2 O Biogás

Biogás é uma mistura gasosa, resultante da fermentação anaeróbica de matéria orgânica, que consiste principalmente de metano e dióxido de carbono, sendo que para ser inflamável precisa ter quantidade maior que 45% de metano.

A presença de gás sulfídrico (H₂S) é um dos principais problemas encontrados para o uso do biogás em motores de combustão interna, sendo que atualmente o objetivo de muitas pesquisas é diminuir a presença desse gás na composição do biogás.

No Quadro 01 são apresentadas algumas características do biogás.

Quadro 01. Características do biogás

Composição	55-70% de metano 30-45% de dióxido de carbono Traços de outros gases
Conteúdo energético	6,0 a 6,5 kWh/m ³ de biogás
Limite de explosão	6-12% de biogás no ar
Temperatura de ignição	650-750 °C (com o conteúdo mencionado de metano)
Pressão crítica	75-89 bar
Temperatura crítica	-82,5 °C
Densidade	1,2 kg/m ³
Cheiro	Ovo podre
Massa molar	16,043 kg/kmol

Fonte: DEUBLEIN & STEINHAUSER (2008).

A presença de CO₂ no biogás diminui o poder calorífico, pois este é dependente do metano. Assim, para determinadas utilizações é conveniente diminuir a presença de dióxido de carbono, aumentando o poder calorífico do biogás e facilitando seu uso.

2.2.3 Biodigestores

Um biodigestor nada mais é do que um reator isolado hermeticamente no qual algum substrato é fermentado anaerobicamente, tendo como resultado a produção de biogás e biofertilizante.

Existem vários tipos de biodigestor, mas, em geral, todos são compostos, basicamente, de duas partes: um recipiente (tanque) para abrigar e permitir a digestão da biomassa, e o gasômetro, para armazenar o biogás (BARRERA, 1993).

No Brasil, os modelos de biodigestores de sistema contínuo mais divulgados são: o indiano, o chinês e o da marinha. Os três tipos apresentam no corpo (digestor e gasômetro), uma caixa de carga, onde é colocada a quantidade diária de matéria-prima que entrará no aparelho e uma outra de descarga, por onde ela sai transformada em biofertilizante. Além dessas duas caixas, pode ser construído também um primeiro tanque, que é o de pré - fermentação, onde é preparada a matéria-prima.

A diferença dos três modelos, indiano, chinês e o da marinha, está praticamente na maneira como cada um foi construído e no tipo de cúpula. A cúpula do indiano, feita geralmente de ferro ou de fibra, é móvel, se movimentando para cima e para baixo de acordo com a maior ou menor produção de biogás. Sobre essa cúpula são colocados pesos, para que o gás saia do biodigestor com pressão suficiente para alimentar os equipamentos da propriedade.

O da marinha é um modelo do tipo horizontal, ou seja, tem largura maior e uma profundidade menor do que o indiano, por isso sua área de exposição solar é maior, o que acarreta uma maior produção de biogás. Sua cúpula é flexível, que infla com a produção de gás, como um balão.

O chinês é um modelo de peça única, todo construído de alvenaria. Desenvolvido na China, que tem propriedades rurais muito pequenas, este tipo de biodigestor foi projetado de forma a economizar espaço. A forma encontrada foi construí-lo enterrado no solo e, desta maneira, é possível cultivar-se em sua volta. Neste modelo, o próprio biofertilizante contido na caixa de descarga serve como peso para produzir a pressão necessária para o biogás ser utilizado (BARRERA, 1993).

Atualmente, principalmente em escala laboratorial, também são usados reatores do tipo CSTR "*continuous stirred-tank reactor*" e do tipo PFR "*plug flow reactor*", com modernos sistemas de controle de temperatura e agitação, importantes para otimização da produção de biogás.

2.2.4 Substratos

É chamado de substrato todo tipo de biomassa que pode ser adequadamente fermentado e co-substrato é o nome dado às biomassas que são adicionadas para fermentarem em parceria com o substrato.

A produção de biogás é dependente do tipo de substrato utilizado. Em geral, a lignina, principal componente da madeira, se decompõe lentamente. Por isso, é importante conhecer a composição do substrato antes da utilização em sistemas de biodigestão.

Os principais materiais utilizados como substrato são resíduos da produção animal, destacando-se no Brasil os resíduos de suínos e bovinos. No entanto, há um crescente interesse em utilizar outros tipos de resíduos, como de estação de tratamento de esgotos (COSTA, 2006), de resíduos orgânicos do lixo urbano, restos de culturas e dejetos da criação de cabras (MOGAMI, 2005) e aves (SANTOS, 2001; FUKAYAMA, 2008; GALBIATTI et al. 2009). Além desses, segundo DEUBLEIN & STEINHAUSER (2008) há na Europa a utilização de grãos, silagem e raízes (beterraba açucareira).

A utilização de um determinado resíduo para produzir biogás está associada ao potencial produtor e a concentração de metano presente no biogás gerado. Além disso, há a necessidade de geração constante e com um volume adequado para que a produção de biogás não seja interrompida.

Nesse sentido, a cama de aviário apresenta-se com um promissor potencial de utilização na biodigestão, em função da produção de cama nos aviários ser expressiva.

Segundo ALBUQUERQUE (1987), as aves produzem 1,5 kg de esterco durante o período de criação (49 dias) adicionando-se ainda o peso do material utilizado como cama que é em torno de 500 g de cama. Já OLIVEIRA (1996) diz que para aves de 2.421g de peso médio, haveria a produção de 2.615g de esterco/ave, sem se levar em consideração a cama de aviário, que representa algo em torno de 500g/ave. SANTOS et al. (2000) comentam na produção de cama variando entre 1,6 a 1,8 kg/ave. OLIVEIRA et al. (2000) encontrou produção de cama variando de 24 a 38 kg/m² em baias de 4,34 m². SANTOS & LUCAS JR. (2003) consideram a produção média de cama de 1,75 kg por frango de corte (matéria natural, 20 % de umidade). SANTOS & LUCAS JR (2004) encontraram uma média de 1,847 kg de cama por frango, em 8 lotes estudados. Já SANTOS et al. (2005) encontraram valores de produção de cama variando de 0,990 a 1,4 kg/ave em matéria seca dependendo da densidade e da reutilização. Em 42 dias isso corresponde 2,835 kg de resíduos. Para PALHARES (2009), cada ave pode produzir 2 kg de cama durante seis crias, sobre casca de Pinus ou casca de amendoim.

LUCAS JR & SANTOS (2000) estudaram a produção de biogás com camas de capim napier, capim napier + maravalha e maravalha e obtiveram valores entre 0,15 e 0,23 m³ de biogás/kg de cama natural.

No Quadro 02 está apresentada a composição da cama de aviário em porcentagem de matéria seca.

Quadro 02. Composição da cama de aviário, em porcentagem da matéria seca

Componente	Média	Varição
Umidade (%)	19,5	4,70-39
Matéria Seca (%)	80,5	61-95
Cinzas (%)	24,7	9-54
Nitrogênio (%)	15,0	2,1-26,4
Fósforo (%)	1,6	0,56-3,92
Potássio (%)	2,3	0,73-5,17
Cálcio (%)	2,3	0,81-6,13
Magnésio (%)	0,52	0,19-0,88
Enxofre (%)	0,50	0,22-0,83
Cobre (ppm)	473	25-1.000
Ferro (ppm)	2.377	529-12.604
Manganês(ppm)	348	125-667
Zinco (ppm)	315	105-669

Fonte: Payne & Donald (1991).

Além disso, em função da cama de aviário ser um material disponível com umidade menor que outros resíduos, em torno de 30% b.u., ela pode sofrer a digestão seca (>15% de ST no interior do biodigestor), desde que observados os parâmetros que proporcionam bom desenvolvimento dos microorganismos. Com isso, tem-se uma economia de água no sistema, além de facilitar o processo de extração de água quando se pretende ter um biofertilizante sólido no final do processo de biodigestão.

A principal vantagem de se usar um sistema de biodigestão anaeróbia seria o aproveitamento dos resíduos gerados pela produção de frangos, com a geração da energia para o aquecimento ao mesmo tempo em que os resíduos são tratados, eliminando odores, patógenos, sementes de ervas daninhas e tornando-os mais estáveis do ponto de vista dos nutrientes, para posteriormente serem utilizados como biofertilizante nas lavouras. Como desvantagem, pode-se citar a falta de conhecimentos técnicos por parte dos produtores brasileiros, além dos custos de instalação do sistema de biodigestão, já que a técnica é pouco difundida no país.

2.2 OBJETIVOS

2.2.1 Objetivo geral

Estudar a geração de biogás utilizando cama de frangos com vistas a substituir as energias convencionais no aquecimento de aviários.

2.2.2 Objetivos específicos

- avaliar o potencial de produção de biogás utilizando cama de aviário, esterco puro de galinhas e palha de trigo usada como cama nos aviários;
- avaliar a produção de biogás utilizando-se diferentes composições de biomassa para biodigestão;
- analisar a viabilidade energética da realização do aquecimento de aviários com o biogás gerado pela cama de frangos produzida pelas aves alojadas.

2.3 MATERIAL E MÉTODOS

2.3.1 Local do experimento e caracterização dos substratos

Para a realização da pesquisa foram montados três experimentos em batelada e um em um reator contínuo, usando no sistema contínuo a melhor condição determinada pelo sistema de batelada. Os experimentos foram montados segundo a norma Alemã VDI 4630 (Verein Deutcher Ingenieure 4630) de 2006, sobre fermentação de materiais orgânicos.

Os experimentos foram realizados no laboratório “Biogastechnikum” do ATB em Potsdam na Alemanha, de Maio a Novembro de 2010. As coordenadas do laboratório são 52°26'18.90"N 13°00'48.85"E.

Para a composição dos substratos foram utilizados cama de aviário, palha de trigo, esterco de galinhas poedeiras e silagem de centeio. A cama de aviário foi proveniente de um lote de utilização.

No caso específico deste projeto, especial atenção se deu ao fato da cama de aviário possuir alta concentração de nitrogênio que resulta na formação de amônio e amônia através da degradação biológica anaeróbica. A presença desses íons é responsável por mudanças no pH e esse por sua vez pode inibir a ação dos microorganismos responsáveis pela produção de biogás. A amônia tem um efeito inibidor e dependendo da concentração pode ser tóxica. Em função disso, optou-se por usar misturas de cama de aviário com palha de trigo para diminuir o efeito do nitrogênio e proporcionar um ambiente mais favorável ao desenvolvimento e atuação dos microorganismos.

Os experimentos foram montados na ordem cronológica, de acordo com o Quadro 03. Inicialmente foi usado inóculo proveniente da saída de um biodigestor abastecido com dejetos bovinos e silagem. Em seguida foi aproveitado o inóculo proveniente do descarte dos experimentos anteriores.

Quadro 03. Caracterização dos substratos utilizados e ordem cronológica de realização dos experimentos

Período	Ordem	Parâmetro	Substrato			Co-Substrato		Mistura Total
			Esterco	Palha	Cama	Silagem de centeio	Palha	
26.05 - 07.07.2010	1.1	m _S /m _S Total [%]	-	-	100,00	-	-	100,00
		ST [%]	-	-	60,49	-	-	60,49
		SV [%TS]	-	-	79,50	-	-	79,50
		SV _{ad} [%]	-	-	100,00	-	-	100,00
		C/N	-	-	8,37	-	-	8,37
	1.2	m _S /m _S Total [%]	100,00	-	-	-	-	100,00
		ST [%]	30,86	-	-	-	-	30,86
		SV [%TS]	67,84	-	-	-	-	67,84
		SV _{ad} [%]	100,00	-	-	-	-	100,00
		C/N	7,16	-	-	-	-	7,16
	1.3	m _S /m _S Total [%]	-	100,00	-	-	-	100,00
		ST [%]	-	88,21	-	-	-	88,21
		SV [%TS]	-	96,21	-	-	-	96,21
		SV _{ad} [%]	-	100,00	-	-	-	100,00
		C/N	-	78,82	-	-	-	78,82
13.07 - 25.08.2010	2.1	m _S /m _S Total [%]	-	-	73,13	26,87	-	100,00
		ST [%]	-	-	60,49	19,25	-	38,39
		SV [%TS]	-	-	79,50	92,71	-	83,05
		SV _{ad} [%]	-	-	70,00	30,00	-	100,00
		C/N	-	-	8,37	26,60	-	10,61
	2.2	m _S /m _S Total [%]	-	-	73,85	-	26,15	100,00
		ST [%]	-	-	60,49	-	88,21	65,91
		SV [%TS]	-	-	79,50	-	96,21	83,87
		SV _{ad} [%]	-	-	70,00	-	30,00	100,00
		C/N	-	-	8,37	-	78,82	11,29
	2.3	m _S /m _S Total [%]	-	-	73,49	13,50	13,01	100,00
		ST [%]	-	-	60,49	19,25	88,21	48,45
		SV [%TS]	-	-	79,50	92,71	96,21	83,46
		SV _{ad} [%]	-	-	70,00	15,00	15,00	100,00
		C/N	-	-	8,37	26,60	78,82	10,93

Quadro 03. Caracterização dos substratos utilizados e ordem cronológica de realização dos experimentos (continuação...)

Período	Ordem	Parâmetro	Substrato			Co-Substrato		Mistura Total
			Esterco	Palha	Cama	Silagem de centeio	Palha	
31.08 - 12.10.2010	3.1	m _S /m _{STotal} [%]	80,97	-	-	-	19,03	100,00
		ST [%]	30,86	-	-	-	88,21	35,21
		SV [%TS]	67,84	-	-	-	96,21	73,24
		SV _{ad} [%]	25,00	-	-	-	75,00	100,00
		C/N	7,16	-	-	-	78,82	8,96
	3.2	m _S /m _{STotal} [%]	58,65	-	-	-	41,35	100,00
		ST [%]	30,86	-	-	-	88,21	42,20
		SV [%TS]	67,84	-	-	-	96,21	79,57
		SV _{ad} [%]	50,00	-	-	-	50,00	100,00
		C/N	7,16	-	-	-	78,82	12,31
	3.3	m _S /m _{STotal} [%]	32,10	-	-	-	67,90	100,00
		ST [%]	30,86	-	-	-	88,21	55,25
		SV [%TS]	67,84	-	-	-	96,21	87,10
		SV _{ad} [%]	75,00	-	-	-	75,00	100,00
		C/N	7,16	-	-	-	78,82	20,67

m_S/m_{STotal} [%] - Proporção entre a matéria seca de cada substrato e a matéria seca total.

ST [%] - Conteúdo de matéria seca.

SV [%] – Sólidos voláteis.

SV_{ad} – Quantidade de sólidos voláteis adicionados de cada substrato para realizar a biodigestão.

C/N – Relação carbono nitrogênio.

Cada experimento tem 3 repetições.

2.3.2 Descrição do sistema utilizado

O sistema de experimentação em batelada foi composto por 11 biodigestores de bancada. Cada biodigestor foi composto de uma garrafa de vidro âmbar, com capacidade volumétrica de 02 litros e dois cilindros de acrílico, sendo um com 08 cm de diâmetro externo encaixado dentro de outro com 10 cm de diâmetro interno, que atuaram como gasômetro. A vedação das garrafas foi feita com rolhas de borracha.

Os 11 cilindros inferiores dos gasômetros foram preenchidos com uma solução de água destilada saturada com sal, sendo adicionada uma pequena quantidade de ácido sulfúrico para evitar o desenvolvimento de microorganismos, com corante indicador de pH para a observação da qualidade da solução.

Nove conjuntos foram usados para a biodigestão dos substratos, sendo que um serviu de controle para o biogás gerado pelo inóculo e um para a biodigestão de celulose.

O conjunto de 11 garrafas de vidro, que serviam de biodigestor batelada, foi mantido no interior de uma caixa de polietileno com água destilada até o nível do gargalo das garrafas. A água foi aquecida até a temperatura de 37 °C (adotada para os experimentos realizados na faixa mesofílica, como indicado em literatura) por meio de um aquecedor elétrico da marca LAUDA modelo A100. A reposição da água evaporada foi feita por meio de uma bomba de aquário. Na Figura 01 é apresentada a visão parcial do experimento.

Antes de cada experimento, cada garrafa foi preenchida com 1,5 litros de inóculo. O substrato foi digerido dentro das garrafas de vidro âmbar e o biogás conduzido até o cilindro superior de acrílico (gasômetro) por mangueiras de plástico de parede grossa.

O primeiro experimento foi realizado de 26/05 a 07/07/2010, o segundo de 13/07 a 25/08/2010 e o terceiro de 31/08 a 12/10/2010, sendo que para cada um foram utilizadas três composições de substratos com três repetições.



Figura 01. Detalhes do experimento em batelada.

2.3.3 Preparo dos substratos

Para os três experimentos em batelada foram usados cama de aviário, esterco de galinhas poedeiras, palha de trigo e silagem de centeio. A cama de aviário usada era proveniente de apenas um lote de criação de frangos.

Para calcular a quantidade de material natural que deveria ser inserida nas garrafas para a biodigestão, foi usada a Equação 01.

$$SV_{\text{substrato}} \leq 0,5 SV_{\text{inóculo}} \quad (01)$$

em que

$SV_{\text{substrato}}$ = quantidade de sólidos voláteis adicionados nas garrafas (% Matéria Fresca); e

$SV_{\text{inóculo}}$ = quantidade de sólidos voláteis presentes no inóculo (% Matéria Fresca).

Depois de determinada quantidade de substrato, o mesmo era inserido no interior das garrafas que serviam de biodigestor e misturado ao inóculo, que já se encontrava lá.

Ao final de cada experimento realizava-se a filtragem do inóculo para a separação dos sólidos. Em seguida, o líquido era homogeneizado, para que após a caracterização fosse utilizado novamente como inóculo, no próximo experimento.

O critério para interromper os experimentos era baseado na produção diária de biogás. Quando a produção diária fosse inferior a 1% do total produzido até o momento, o experimento poderia ser interrompido. Como o objetivo era trabalhar a possibilidade de uso da cama de frangos para o aquecimento do ambiente de aviários, usou-se o tempo de retenção do substrato nas garrafas como o mesmo período necessário para a criação de frangos no Brasil, que é em torno de 42 dias. Normalmente os experimentos apresentavam condições de serem interrompidos a partir de 30 dias do início dos mesmos.

2.3.4 Determinação da produção e qualidade do biogás

Diariamente, nos primeiros 15 dias de experimento, e a cada 2 dias, no restante do tempo, foram observadas a produção e a qualidade do biogás.

A produção foi medida através do deslocamento do gasômetro, multiplicando-se pela área interna da base do cilindro. Depois de calculado o volume inicial, a quantidade foi corrigida para pressão de 1 atm e 20°C. A temperatura do biogás foi considerada a temperatura medida no entorno dos gasômetros.

Após a leitura de volume de biogás, foi analisada a qualidade através de um analisador de gases marca Geotechnical Instruments modelo GA 94 e GA 2000 plus, equipados com sensores de metano, gás carbônico e oxigênio. O analisador foi acoplado ao registro de descarga do biogás do gasômetro. O restante do biogás não utilizado para análise qualitativa foi descartado, de forma a zerar os gasômetros.

No início e final do experimento foram realizadas medições de pH, condutividade elétrica e temperatura do substrato.

2.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.4.1 Caracterização dos substratos

Os dados obtidos durante os experimentos foram tabulados e transformados em gráficos. Para efeito de análise, a produção de biogás e metano foi em função da quantidade de matéria seca adicionada nas garrafas para que ocorresse a biodigestão.

Inicialmente foi feita a análise do poder calorífico de amostras de cama de aviário, esterco e palha, para identificação do potencial energético do material para o caso de ser usada na combustão direta, conforme o Quadro 04.

Os valores encontrados de PCS para a cama são próximos aos valores da lenha, se aproximando dos valores encontrados por DAGNALL et al. (2000), que consideram que a cama de aviário é um tipo de biomassa combustível, com poder calorífico variando de 9 a 13,5 MJ/kg. NEITZKE (2010) encontrou PCS médio de 13,5 MJ/kg.

Quadro 04. Análise do poder calorífico superior dos substratos

Substrato	PCS (kJ/g)
Cama de aviário ¹	16.538
Esterco de galinhas	14.387
Palha de trigo	18.226
Palha de café	18.460
Cama de aviário "1 lote" ²	16.977
Cama de aviário "2 lotes" ²	16.541

¹ Cama de aviário com palha de trigo utilizada como substrato para cama na Alemanha.

² Cama de aviário com palha de café utilizada como substrato para cama no Brasil.

No Quadro 05 são apresentados os resultados das análises feitas para o inóculo, para cada um dos experimentos realizados.

Quadro 05. Análise do inóculo utilizado nos experimentos

Experimentos		Batelada		
		1°	2°	3°
pH		7,76	7,70	7,82
Condutividade Elétrica	mS/cm	13,90	16,07	16,42
Sólidos Totais 105°	%	3,12	2,97	2,83
Sólidos Voláteis	% ST	61,44	57,81	54,78
Sólidos Voláteis	% MF	1,92	1,72	1,55
NH ₄ -N	g/kg MF	1,96	1,34	1,29
Nkjel.	g/kg MF	0,98	2,19	2,16

De acordo com o Quadro 05, os resultados não apresentaram grandes variações para o inóculo do segundo e terceiro experimentos (saída do primeiro e segundo experimentos), mostrando que a biodigestão da cama de aviário ocorreu de forma consistente.

No Quadro 06 são apresentados os resultados das análises realizadas para os substratos utilizados nos experimentos.

Pelos resultados é possível observar que a palha é um ótimo material para ser misturado à cama de aviário e ao esterco, por conter pouco nitrogênio, proporcionando uma melhor relação C/N. O recomendado para a biodigestão é uma relação C/N em torno de 30:1. O esterco puro utilizado nos experimentos possui relação C/N em torno de 7:1, enquanto com a adição de palha foi possível obter valores em torno de 20:1 (Quadro 03).

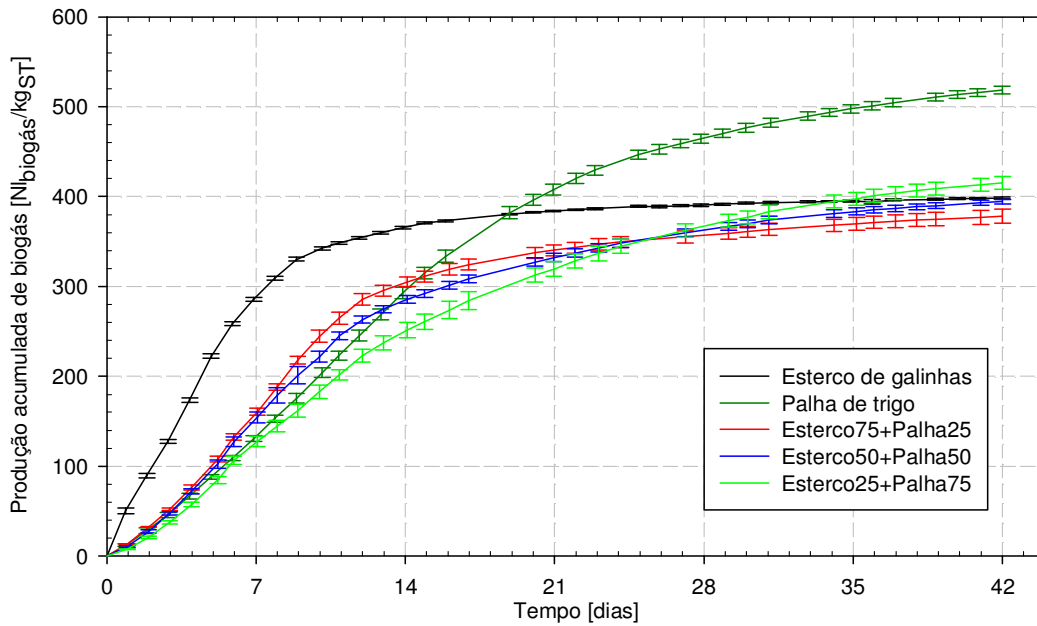
Quadro 06. Características dos substratos utilizados nos experimentos

Amostra	Unidade	Cama de aviário	Esterco	Palha
pH		8,31	7,87	7,23
Condutividade Elétrica	mS/cm	7,36	3,84	1,23
Sólidos Totais 60°	%	63,55	32,06	89,29
Sólidos Totais 60° - 105°	%	95,18	96,25	98,80
Sólidos Totais 105°	%	60,49	30,86	88,21
Sólidos Voláteis	% ST	79,50	67,84	96,21
Sólidos Voláteis	% MF	48,09	20,93	84,87
NH ₄ -N	g/kg MF	7,32	4,84	0,041
Nkjel.	g/kg MF	32,56	18,64	5,45
C	%	37,55	36,13	44,85
C	% ST	39,45	37,54	45,39
N	%	4,49	5,05	0,569
N	% ST	4,71	5,24	0,58
S	%	0,644	0,586	0,152
S	% ST	0,68	0,61	0,15
DQO	g/kg MF	554,1	238,5	916,9
P	mg/ kg ST 60°	17.173,2	17.369,5	1.196,0

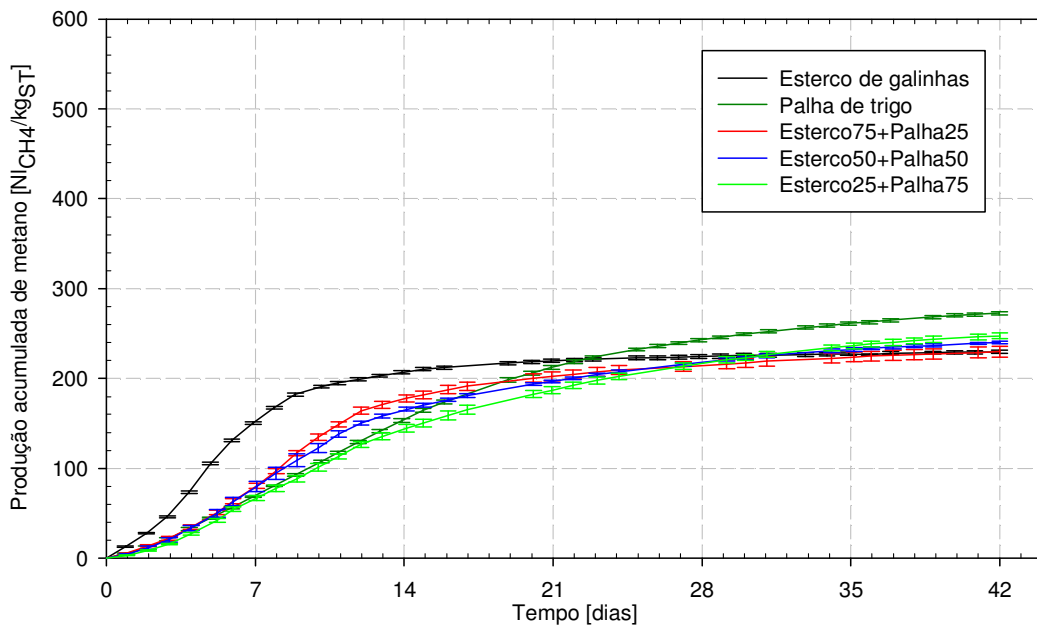
2.4.2 Produção de biogás

Nas Figuras 02 e 03 são apresentados os resultados de produção de biogás e metano, em relação aos sólidos totais adicionados nos biodigestores de bancada. Na Figura 04 ilustra está representada a produção acumulada de biogás e metano para o esterco de galinhas poedeiras, a palha de trigo e combinações entre esses dois substratos, durante o tempo de biodigestão.

Pelo exposto na Figura 02, pode-se observar que o substrato composto pelo esterco puro de galinhas, tende a apresentar partida mais evidente e em período de tempo mais curto, 14 dias, sendo seguido pelo substrato com maior proporção de esterco e menos de palha (Esterco75+Palha25), tanto quanto se refere à produção de biogás (a) quanto à de metano (b), aos 21 dias.



(a)



(b)

Figura 02. Produção média acumulada de biogás (a) e metano (b), com o desvio padrão, para o esterco de galinhas, palha de trigo e combinações de sólidos voláteis adicionados de esterco e palha, durante o experimento.

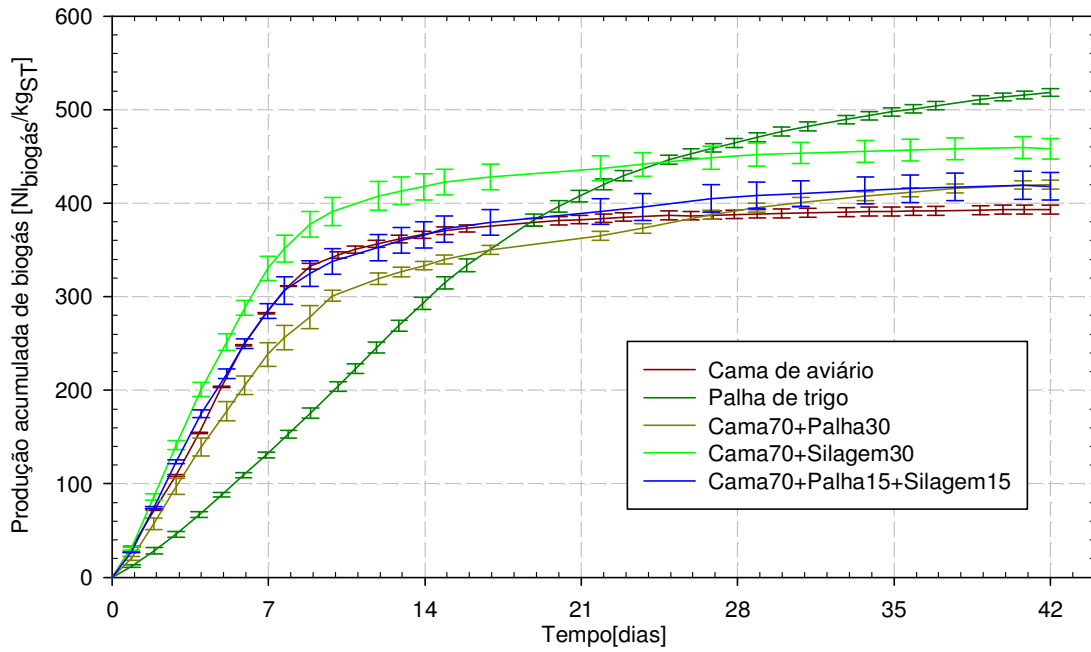
Na Figura 03, são apresentados os resultados da produção de biogás e metano para a cama de aviário, palha de trigo e combinações de cama de aviário com palha de trigo e silagem, durante o período de biodigestão.

As misturas contendo palha de trigo apresentaram resultados semelhantes de produção de biogás e metano. Observou-se que a redução do percentual de palha na mistura com a cama de aviário, favoreceu a produção de biogás e de metano. No entanto, quando da utilização de silagem, os resultados foram melhores, provavelmente por ter proporcionado melhores condições de desenvolvimento e atuação aos microorganismos.

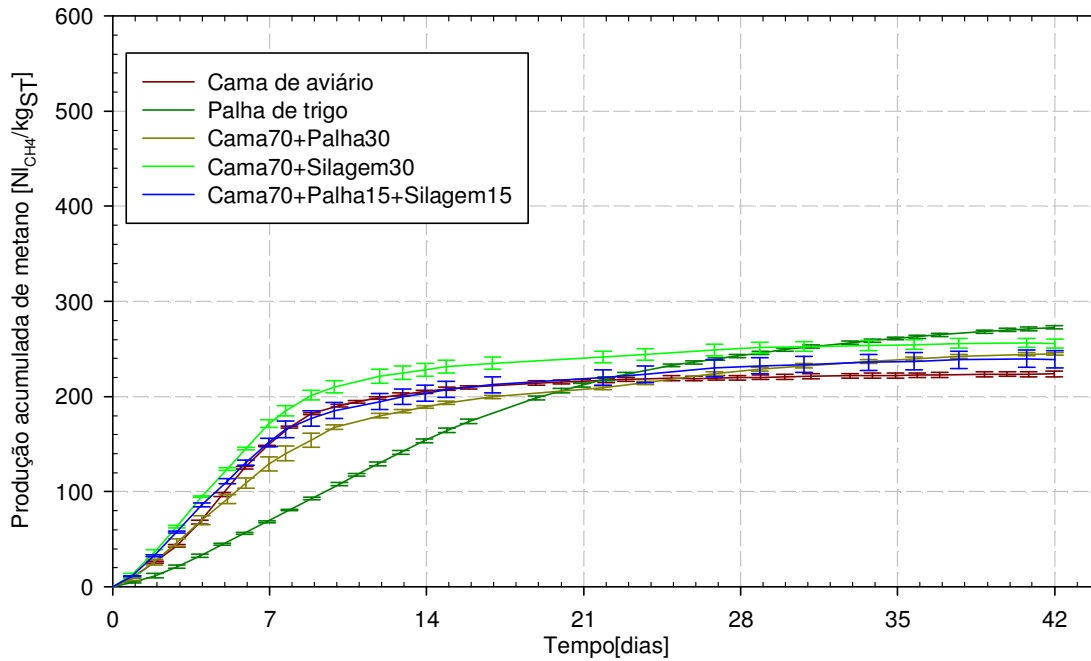
Mesmo assim, considerando que a silagem é utilizada para a alimentação animal, os resultados com palha são mais atrativos para o desenvolvimento de pesquisas voltadas ao aproveitamento de resíduos da avicultura, uma vez que a palha é mais facilmente encontrada e possui menores custos de produção, comparando-a com a silagem.

Também é evidente que com a mistura de palha as condições do ambiente onde ocorrem as reações são melhores e também que a produção de biogás é melhor distribuída durante o tempo. Isso facilitaria a operação de sistemas moto-geradores, por exemplo, por apresentar uma oferta mais constante de biogás.

A partir dos resultados dos experimentos, relacionou-se a quantidade de biogás e metano produzidos a partir de misturas (cama de aviário+palha de trigo e esterco de galinhas+palha de trigo), reforçando-se a tendência da adição de palha de trigo a esses substratos conforme Figura 04a e 04b.



(a)



(b)

Figura 03. Produção média acumulada de biogás (a) e metano (b), com o desvio padrão, para a cama de aviário, palha de trigo e combinações de sólidos voláteis adicionados de cama de aviário, palha e silagem, durante o experimento.

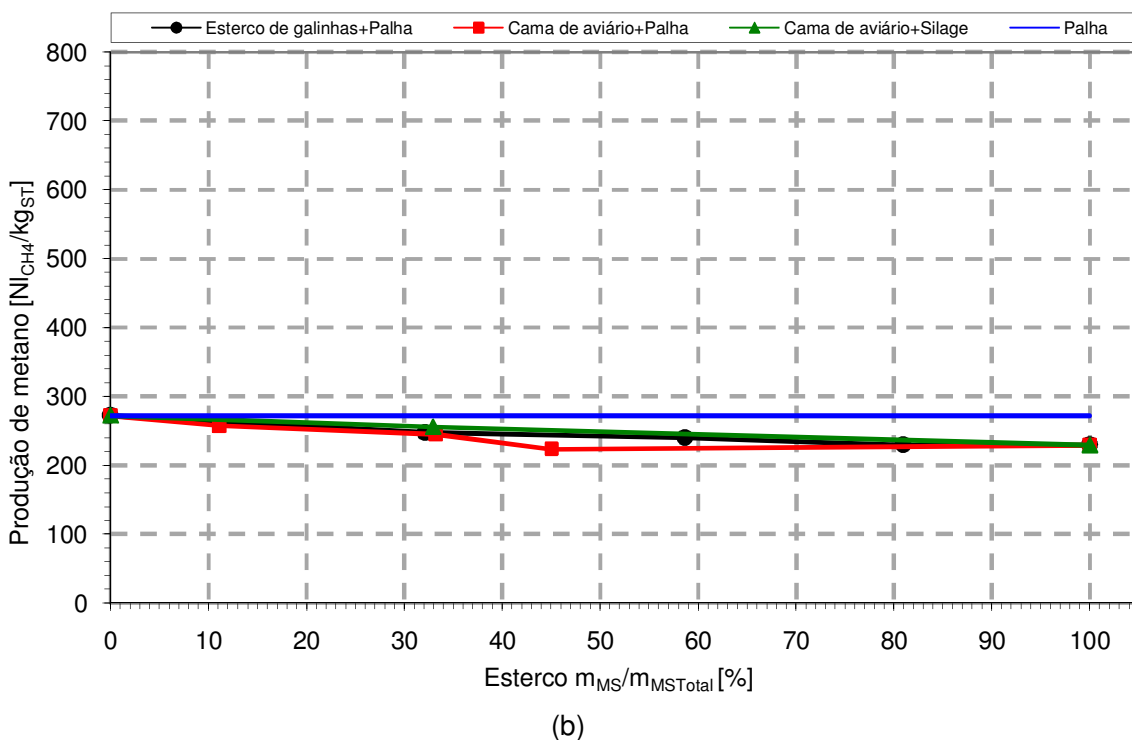
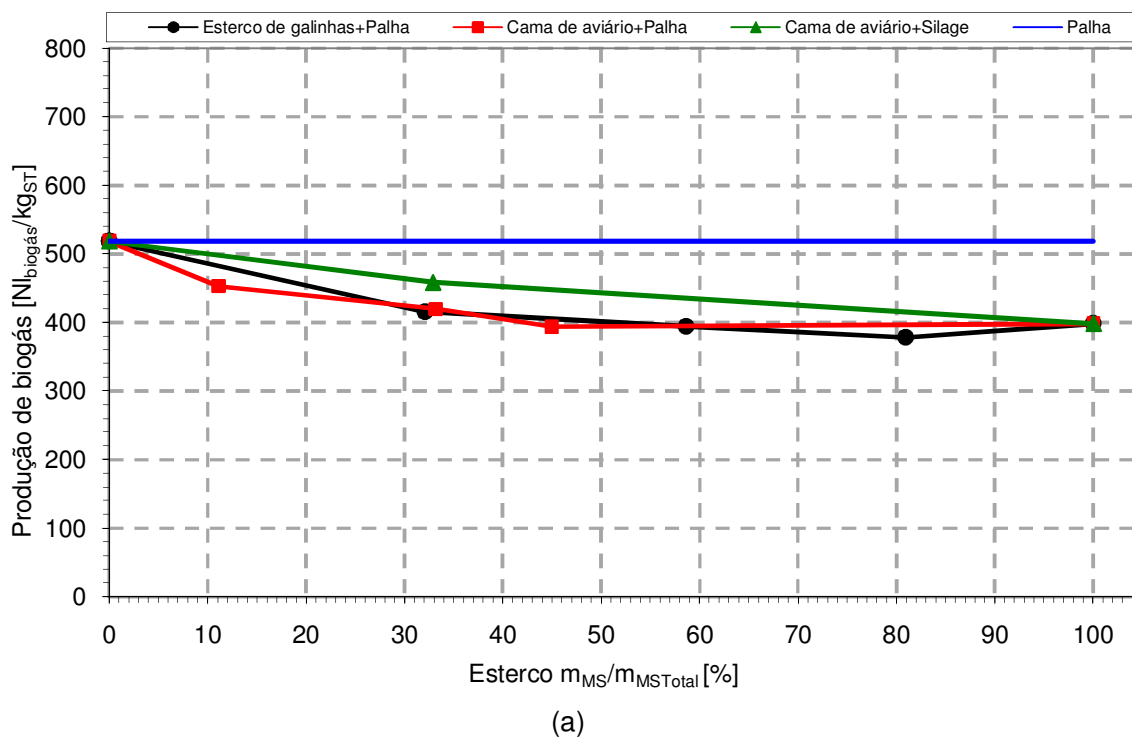


Figura 04. Efeito da quantidade de esterco presente no substrato na produção de biogás (a) e metano (b) entre as misturas realizadas.

Através da Figura 04, percebe-se uma ligeira tendência de aumento de produção de biogás e metano com a diminuição da quantidade de esterco na amostra. De acordo com os

resultados, isso acontece em virtude da palha ter um potencial maior de produção de biogás e metano em relação à cama e ao esterco de galinhas, e também por melhorar a relação C/N da mistura, além de outros fatores, contribuindo para a estabilização dos microorganismos. Esses fatores somados oferecem boa produtividade de metano, essencial para fins energéticos, como o aquecimento de aviários.

Na Figura 05 são apresentados os resultados para produção de energia em relação a quantidade de esterco presente no substrato e o PCI dos mesmos substratos utilizados na biodigestão.

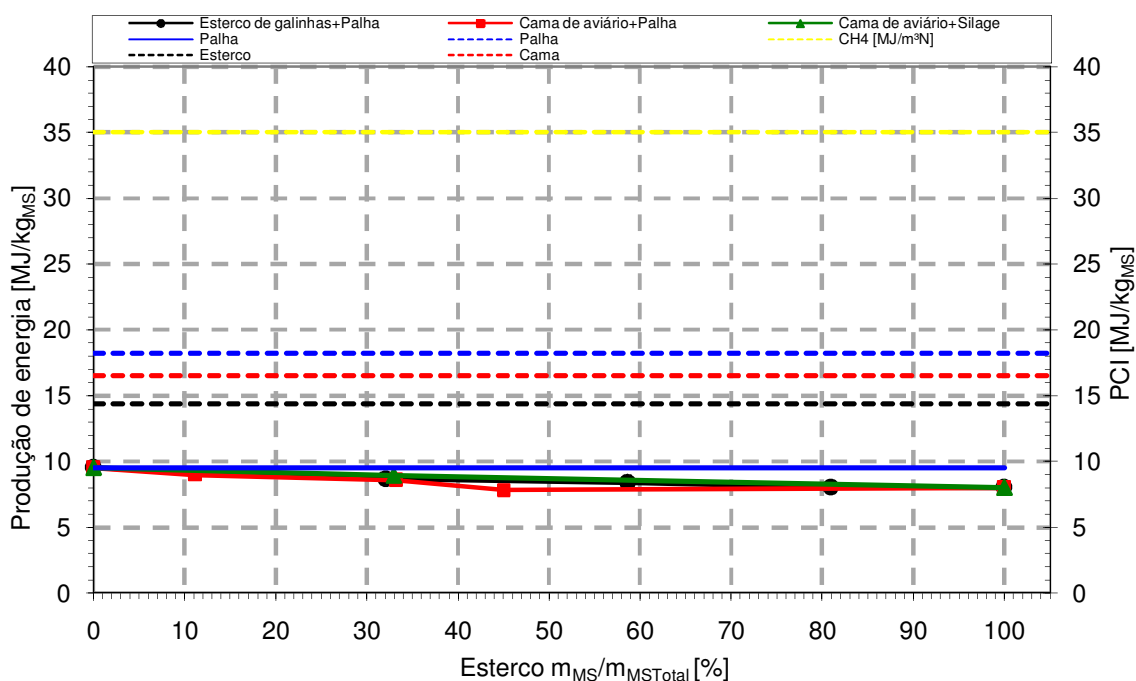


Figura 05. Produção de energia em relação à quantidade de esterco de galinhas e palha de trigo presentes nos substratos e PCI dos substratos.

Percebe-se, pela Figura 07, que a energia que pode ser liberada pela queima dos substratos (PCI) é maior que a energia produzida pela biodigestão dos mesmos substratos. No entanto, deve-se observar que para os cálculos foi considerado o substrato seco, ou seja, o valor de PCI apresentado é para um quilograma de substrato seco, e que quando o substrato contém umidade o valor de energia disponível é menor, em função da energia necessária para elevação da temperatura e evaporação da água presente. Para este caso, ainda é necessário considerar que com a biodigestão tem-se no final, biogás e biofertilizante, o que não ocorre na queima dos substratos.

Com isso, é realçada a importância da produção de metano a partir dos resíduos, pois com um kg de matéria seca de pode-se gerar quase 10 MJ de energia, tendo como subproduto no final do processo de biodigestão o biofertilizante.

No Quadro 07 são apresentados os resultados de pH, condutividade elétrica e salinidade, quando do término dos experimentos em batelada.

Quadro 07. Resultados médios encontrados ao final dos experimentos em batelada

		pH		Condutividade mS/cm		Salinidade %=10g/l	
		Média	DP	Média	DP	Média	DP
1º Experimento	Controle	7,57		15,49		-	-
	Cama de aviário	7,60	0,02	18,53	0,75	-	-
	Esterco de galinhas	7,65	0,01	20,02	1,02	-	-
	Palha de trigo	7,35	0,01	16,21	0,08	-	-
	Celulose	7,61		16,15		-	-
2º Experimento	Controle	7,65		-	-	11,00	
	Cama70+Silagem30	7,56	0,01	-	-	12,10	0,10
	Cama70+Palha30	7,50	0,01	-	-	12,03	0,15
	Cama70+Silagem15+Palha15	7,54	0,01	-	-	11,90	0,44
	Celulose	7,61		-	-	10,70	
3º Experimento	Controle	7,69		15,15		10,90	
	Esterco75+Palha25	7,56	0,02	20,69	0,71	12,57	0,40
	Esterco50+Palha50	7,48	0,01	19,11	0,51	11,57	0,35
	Esterco25+Palha75	7,45	0,01	18,80	0,47	11,33	0,31
	Celulose	8,17		17,04		10,20	

DP= Desvio Padrão

De acordo com o Quadro 07, todos os parâmetros estiveram regulares, sem alterações drásticas, o que significou o bom funcionamento do sistema de biodigestão em batelada. Isso demonstra que as bactérias se adaptaram ao meio, tornando o ambiente favorável a produção de biogás. Dessa forma, admite-se que é possível gerar biogás a partir da cama de aviário e combinações com palha e silagem.

No Quadro 08 são apresentados os valores médios de produção de biogás e de metano para os experimentos em batelada.

Quadro 08. Resultados médios de produção de biogás e metano, para os experimentos realizados em forma de batelada

		Produção de biogás		Produção de metano		
		l _N /kg _{ST}	DP	l _N CH ₄ /kg _{ST}	DP	%
1º Experimento	Cama de aviário	393,25	4,91	223,72	2,76	56,9
	Esterco de galinhas	398,37	1,03	229,68	1,88	57,7
	Palha de trigo	518,44	4,41	272,73	1,79	52,6
2º Experimento	Cama70+Silagem30	458,10	11,14	255,72	4,58	55,8
	Cama70+Palha30	419,77	4,80	244,83	1,50	58,3
	Cama70+Silagem15+Palha15	417,19	14,96	239,04	9,05	57,3
3º Experimento	Esterco75+Palha25	378,18	8,06	229,80	6,10	60,8
	Esterco50+Palha50	394,35	2,51	240,00	1,38	60,9
	Esterco25+Palha75	415,13	7,06	247,51	3,51	59,6

De acordo com o Quadro 08, entre os substratos utilizados, a palha de trigo apresentou a maior produção de biogás e metano, com 518,44 NI de biogás e 272,73 NI de metano para cada kg de sólidos totais. A cama pura apresentou 393,25 NI/kg_{ST} e 223,72 NI_{CH₄}/kg_{ST} de biogás e metano, respectivamente. Os resultados encontrados são bons, comparados aos de WEEB & HAWKES (1985), JAMILA (1990), SAVERY & CRUZAN (1972), LUCAS JR & SANTOS (2000), NAMIUCHI (2002), FUKAYAMA (2008), AIRES (2009) e GALBIATTI et al. (2010) e oferecem subsídios para o dimensionamento de sistemas de biodigestão, bem como geração de calor e energia.

2.4.3 Análise da demanda de energia para o período de aquecimento de frangos de corte e potencial de geração de energia em aviários

Em seguida são apresentados os Quadros 09 e 10, nos quais são apresentados os resultados da análise feita a partir de dados de literatura sobre consumo de energia no aquecimento de aviários, potencial de geração de energia a partir do biogás produzido pela cama de aviário, bem como dos custos na compra do combustível para realizar o aquecimento.

Quadro 09. Consumo, geração de energia e custos dos combustíveis usados para o aquecimento de aviários, de acordo com dados da literatura para aquecimento à lenha

		Zanatta (2007)	Santos (2008)	Catelan (2007)	Abreu (2003)	Vigoderis (2006)
Produção	Dimensões (m)	8x60x2,7	8x60x2,9	12x100x2,7	12x100x2,7	12x100x3
	Área (m ²)	480	480	1.200	1.200	1.200
	Nº Aves (n^o)	7.500	8.800	13.300	18.000	18.400
	Densidade (aves/m ²)	15,63	18,33	11,08	15,00	15,33
	Produção de cama (kg)	12.750	14.960	22.610	30.600	31.280
Combustível	Combustível	Lenha	Lenha	Lenha	Lenha	Lenha
	Consumo (m ³)	20,5	20,58	20	21	13,53
	PCI (kJ/kg)	12.588	12.661,25	11.304,36	12.661,25	12.661,25
	ρ madeira (kg/m ³)	412	450	450	450	450
	Consumo eletricidade (kW)	374,75				
Aquecimento	Forma de aquecimento	central	central	central	central	central
		indireto	indireto	indireto	indireto	indireto
	Equipamento	Fornalha	Queimador	Fornalha	Fornalha	Fornalha
	Época	Inverno	Inverno	Maior	Inverno	Inverno
Energia	Combustível Lote (GJ)	106,32	117,26	101,74	119,65	77,09
	Energia elétrica (GJ)	1,35		0,00	0,00	0,00
	Energia total para aquecimento (GJ)	107,67	117,26	101,74	119,65	77,09
	Cons. Energia Total (GJ/1000 aves)	14,36	13,32	7,65	6,65	4,19
Custos	Custo da lenha R\$ (R\$/m ³ 45,00)	922,50	926,10	900,00	945,00	608,85
	Custo da energia elétrica R\$ (R\$/kWh 0,213980)	80,19	0,00	0,00	0,00	0,00
	Custo Total R\$	1.002,69	926,10	900,00	945,00	608,85
	Custo (R\$/1000aves)	133,69	105,24	67,67	52,50	33,09
	Custo específico (R\$/GJ)	9,31	7,90	8,85	7,90	7,90
Opções	Quantidade de metano produzida (m ³)	1.996,52	2.342,59	3.540,50	4.791,65	4.898,14
	Quantidade de energia produzida pela cama (GJ)	69,88	81,99	123,92	167,71	171,43
	Quantidade de energia produzida pela cama (GJ/1000aves)	9,32	9,32	9,32	9,32	9,32
Local	Barbacena/MG	Barbacena, MG	Cascavel/PR		Videira/SC	

Quadro 10. Consumo, geração de energia e custos dos combustíveis usados para o aquecimento de aviários, de acordo com dados da literatura para aquecimento à GLP

	Abreu (1998)	Ferreira (2004)	Santos (2008)	Catelan (2007)	Funck e Fonseka (2008)	Santos (2001)	Abreu (2003)	Vigoderis (2006)	
Produção	Dimensões (m)	9x12	8x60x2,8	12x100x2,7	12x100x2,7		12x100x2,7	12x100x3	
	Área (m ²)		480	1200	1200	1176	1200	1200	
	Nº Aves (nº)	500	5.500	8.800	13.300	13.300	15.000	18.000	18.400
	Densidade (aves/m ²)	-	-	18,33	11,08	11,08	12,76	15,00	15,33
	Produção de cama (kg)	850	9.350	14.960	22.610	22.610	25.500	30.600	31.280
Combustível	Combustível	GLP	GLP	GLP	GLP	GLP	GLP	GLP	
	Consumo (kg)	53,39	241,8	516	429	429	548	702	537,933
	PCI (kJ/kg)	46.473	46.473	46.473	47.310,84	47.234	46.473	49.185	46.473
Aquecimento	Forma de aquecimento	localizado	localizado	central	localizado	localizado	localizado	localizado	
		direto	direto	direto	direto	direto	direto	direto	
	Equipamento	Campânula	Campânula	Fornalha	Campânula	Campânula infravermelha	Campânulas	Campânulas	Campânula
	Época		outono	inverno	Maio		Ano inteiro	Inverno	Inverno
Energia	Combustível Lote (GJ)	2,48	11,24	23,98	20,30	20,26	25,47	34,53	25,00
	Energia elétrica (GJ)	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Energia total para aquecimento (GJ)	2,48	11,24	23,98	20,30	20,26	25,47	34,53	25,00
	Cons. Energia Total (GJ/1000 aves)	4,96	2,04	2,73	1,53	1,52	1,70	1,92	1,36
Custos	Custo da lenha R\$ (R\$/m ³ 45,00)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Custo do gás R\$ (R\$/kg 3,08)	164,44	744,74	1.589,28	1.321,32	1.321,32	1.687,84	2.162,16	1.656,83
	Custo da energia elétrica R\$ (R\$/kWh 0,213980)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Custo Total R\$	164,44	744,74	1.589,28	1.321,32	1.321,32	1.687,84	2.162,16	1.656,83
	Custo (R\$/1000aves)	328,88	135,41	180,60	99,35	99,35	112,52	120,12	90,05
	Custo específico (R\$/GJ)	66,28	66,28	66,28	65,10	65,21	66,28	62,62	66,28
Opções	Quantidade de metano produzida (m ³)	133,10	1.464,12	2.342,59	3.540,50	3.540,50	3.993,05	4.791,65	4.898,14
	Quantidade de energia produzida pela cama (GJ)	4,66	51,24	81,99	123,92	123,92	139,76	167,71	171,43
	Quantidade de energia produzida pela cama (GJ/1000aves)	9,32	9,32	9,32	9,32	9,32	9,32	9,32	9,32
Local	Concórdia, SC	Viçosa/MG	Barbacena, MG		Cascavel/PR	Sertãozinho/SP		Videira/SC	

A partir dos resultados apresentados nos Quadros 09 e 10, considerando a produção média de 1,7 kg de cama de aviário por frango alojado (500 g de maravalha ou outro substrato e 1200 g de dejetos oriundos da criação de aves), segundo dados de ALBUQUERQUE (1987), OLIVEIRA (1996) e SANTOS et al. (2005), tem-se uma produção de 30600 kg cama em um aviário com 18000 aves. Considerando-se a umidade da cama em torno de 30%, a matéria seca passa a ser de 21420 kg. Considerando-se os dados de produção média de metano encontrados neste experimento para a cama (223,72 NI biogás/kg_{ST}), pode-se concluir que o potencial de geração de metano é da ordem de 4791650,0 NI de metano (4791,65 Nm³). Levando-se em conta um PCI de 35,0 MJ/Nm³, isso corresponde 167,71 GJ de energia disponível. Considerando-se o consumo de 34,53 GJ no aquecimento a gás para o mesmo aviário que tem potencial para produzir 167,71 GJ de energia, o consumo para o aquecimento representa apenas 20,59% do potencial de produção de energia a partir da cama de aviário. Esses resultados são para aviários com grande capacidade de alojamento.

SANTOS & LUCAS JR (2004), realizando estudos sobre o balanço energético em galpões de frangos de corte, encontrou um consumo médio GLP para o aquecimento de aviários na ordem de 6.085,8 Mcal (25.480,03 MJ) e um potencial de produção de energia pelo biogás gerado da cama de 14,805,2 Mcal (61.986,4 MJ), considerando a produção média de biogás de 0,1001 m³/kg de cama *in natura* e produção média de cama de 27.702,5 kg. Com isso, a energia gasta no período de aquecimento representa 41,11% do potencial de produção de energia que pode ser alcançado pela biodigestão da cama produzida no aviário.

Para menores capacidades de alojamento os resultados não são tão expressivos, uma vez que o consumo específico de energia é maior, necessitando de uma quantidade maior de cama para gerar a energia necessária ao aquecimento. Mesmo assim, o aquecimento de aviários com a utilização de biogás se mostra promissor, uma vez que funcionaria da mesma forma que o aquecimento utilizando GLP, que consome menos energia que o aquecimento a lenha.

Na Figura 06 apresenta-se o consumo específico de energia e o potencial de energia que pode ser gerada a partir da cama, para o aquecimento a GLP e lenha em função do número de aves alojadas nos aviários, de acordo com os dados dos Quadros 09 e 10.

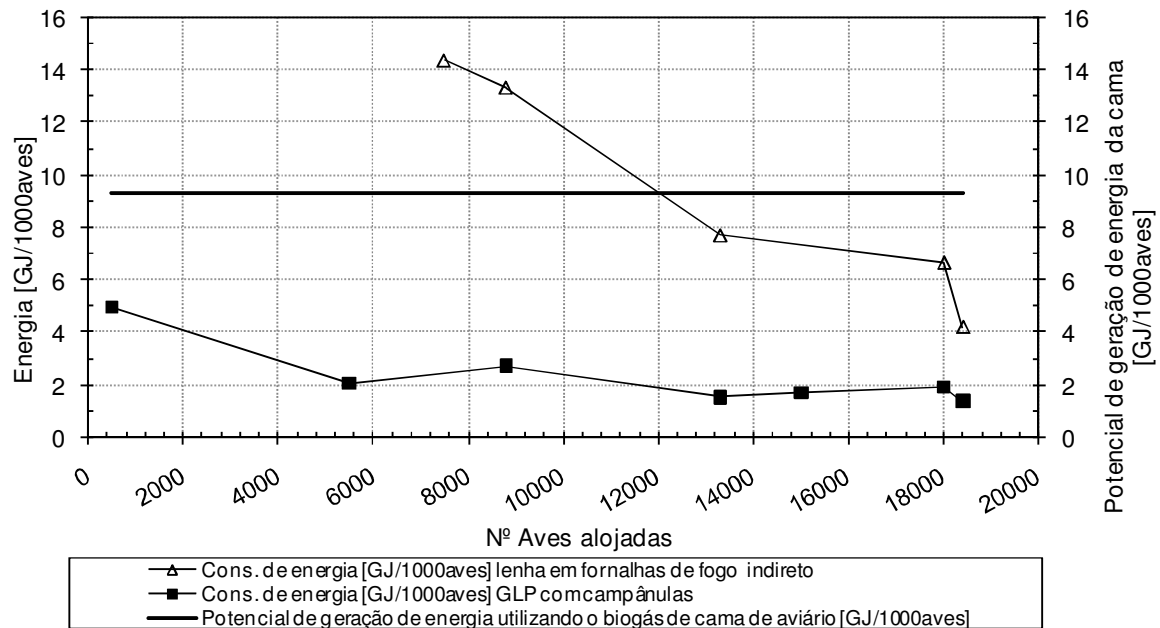


Figura 06. Consumo de energia e potencial de geração de energia a partir do biogás da cama de aviários, para aquecimento a GLP e lenha de acordo com a quantidade de aves alojadas no aviário.

Pela Figura 08 é possível perceber que quanto maior o aviário (maior o número de aves alojadas) menor é a quantidade específica de energia gasta com o aquecimento do lote, tanto a GLP como lenha. Isso pode ser explicado pela minimização das perdas de calor quando do aumento da instalação e pelo calor gerado pelas próprias aves. Dessa forma, considerando-se uma situação de frio e um aviário de 8 m de largura por 60 m de comprimento alojando em torno de 8.000 aves, tem-se uma determinada perda de energia pelas paredes e teto para o ambiente externo. Já um aviário com os mesmos 8 m de largura, porém com 120 m de comprimento e com o dobro de aves do primeiro, pode-se considerar a junção de dois aviários de 8x60 m. Como a temperatura no interior das duas instalações é a mesma, considera-se que na área de contato entre os dois aviários não aconteçam trocas térmicas, diminuindo assim a quantidade de calor perdido para o meio externo (considerando-se a situação de frio), pois somente três das quatro paredes laterais de cada aviário estão perdendo calor. Além disso, os aviários maiores geralmente são de construção mais recente e com mais tecnologia, com o emprego de um maior número de artifícios para conservar boas condições térmicas no interior da instalação, como aumento do número de cortinas, forração no teto e novos materiais construtivos.

De qualquer forma, o potencial de geração de energia a partir da cama de aviário, através do biogás, é sempre muito superior à quantidade de energia gasta no aquecimento a GLP. A comparação ao GLP é necessária, pois caso seja usado o biogás como fonte para a geração de calor, a forma de aquecimento será semelhante (aquecimento localizado feito de forma direta, sem a necessidade de trocadores de calor). A comparação do uso do biogás com sistemas de aquecimento a lenha não é interessante, pois são sistemas de funcionamento distinto.

Caso o avicultor deseje substituir o sistema de aquecimento à lenha por biogás, este deverá providenciar a troca da fornalha por campânulas a GLP adaptadas para o uso de biogás. Assim, não é conveniente dizer que o uso do biogás é vantajoso em relação ao uso da lenha somente a partir de certa quantidade de aves alojadas (aproximadamente 13000 aves), como observado na Figura 08, porque quando ocorrer esta substituição, a quantidade de energia gasta no aquecimento com biogás será semelhante ao aquecimento realizado com GLP.

Na Figura 07 apresenta-se o custo específico dos combustíveis com a venda da cama e sem a venda da cama, para o aquecimento a GLP e lenha, de acordo com a quantidade de aves alojadas no aviário.

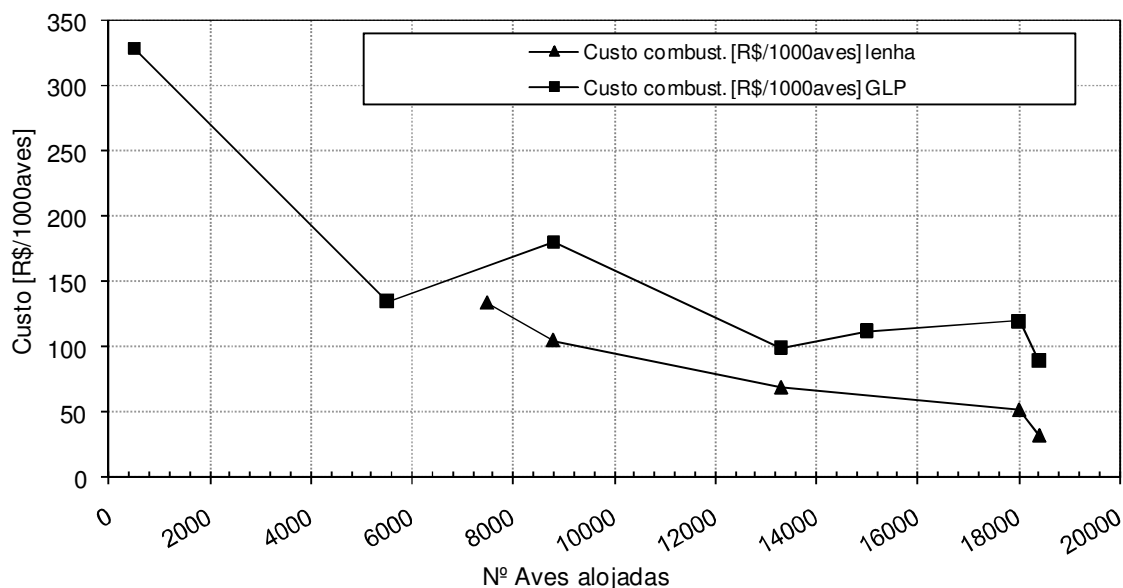


Figura 07. Custo específico dos combustíveis usados para o aquecimento, com e sem a venda da cama, para aquecimento a GLP e lenha, de acordo com a quantidade de aves alojadas no aviário.

A partir da análise da Figura 07 é possível perceber que o custo dos combustíveis utilizados para o aquecimento decrescem com o aumento do número de aves alojadas no aviário, e que está de acordo com o consumo específico de energia apresentado na Figura 06.

De acordo com os resultados, o aquecimento a lenha é mais vantajoso do ponto de vista do custo do combustível, uma vez que pode ser da metade do custo necessário para o aquecimento realizado com GLP. Ou seja, é muito mais vantajoso do ponto de vista econômico utilizar lenha para realizar o aquecimento, mesmo com as fornalhas apresentando uma eficiência energética menor que as campânulas, porque o preço do GJ da energia da lenha é muito inferior do preço do GJ de energia do GLP.

Por fim, deve-se observar que, quando são substituídas as fontes de aquecimento tradicionais por biogás, o avicultor ganha em vários aspectos, pois além de economizar com o combustível necessário ao aquecimento (lenha ou GLP) passa a ter disponível para sua lavoura o biofertilizante, resíduo do processo de biodigestão, diminuindo os custos relacionados a aquisição de fertilizantes.

2.5 CONCLUSÕES

A partir dos resultados encontrados e das condições em que foram realizados os experimentos conclui-se que:

- a cama de aviário, esterco de galinhas, palha de trigo e suas combinações foram capazes de gerar biogás, com quantidade razoável de metano em condições mesofílicas;
- quanto maior a percentagem de palha de trigo na mistura com cama de aviário, maior a produção de biogás;
- apenas 25% da cama de um aviário de 18000 aves seria suficiente para gerar a energia necessária no período de aquecimento, restando até 75% desta para ser utilizada em outras finalidades, como fertilizante, para geração de energia elétrica, etc.; e
- recomenda-se o uso da cama de aviário com vistas a produção de biogás, pois pode tornar a avicultura numa atividade energeticamente mais eficiente e de maior rentabilidade.

2.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, P.G. Modelos de aquecimento. IN: IV Simpósio Brasil Sul de Avicultura. 2003, **Anais...** Chapecó, SC. p. 65-77, 2003.
- ABREU, P. G. Sistemas de aquecimento em piso, com resistência elétrica para a criação de aves. Viçosa, MG: UFV, 1998. 105p. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.
- AIRES, A. M. Biodigestão anaeróbia da cama de frangos de corte com ou sem separação das frações sólida e líquida. 2009. 134p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia). Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.
- ALBUQUERQUE, R. Desempenho de aves para corte criadas sobre cama de casca de vagem de feijão. **Avicultura Industrial**, v.77, n.935, p.13-6, novembro, 1987.
- BARRERA, P. Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural. Editora Icone. 106p. 1993.
- CATELAN, F. Sistemas de aquecimento automáticos na produção de frangos de corte. 2007. 52p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2007.
- COSTA, D. F. Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto. 2006, 194p. Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia)- Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- DAGNALL, S.; HILL, J.; PEGG, D. Resource mapping and analysis of farm livestock manures - assessing the opportunities for biomass-to-energy schemes. **Bioresource Technology** V.71, 2000. p.225-234.
- DEUBLEIN, D. e STEINHAUSER A. **Biogas from Waste and Renewable Resources. An Introduction.** © 2008 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008. ISBN 978-3-527-31841-4

- FERREIRA, W. P. M. **Avaliação de uma fornalha a carvão vegetal para aquecimento de aviário**. 2004. 137 p. Tese (Doutorado Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.
- FUKAYAMA, E. H. Características quantitativas e qualitativas da cama de frango sob diferentes reutilizações: efeitos na produção de biogás e biofertilizante. 2008, 99p. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Jaboticabal, 2008.
- FUNCK, S. R. e FONSECA, R. A. Avaliação energética e de desempenho de frangos com aquecimento automático a gás e a lenha. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande. v.12, n.1, 2008. p.91–97.
- GALBIATTI, J. A.; CAMELO, A. D.; SILVA, F. G.; GERARDI, E. A. B.; CHICONATO, D. A. Estudo quali-quantitativo do biogás produzido por substratos em biodigestores tipo batelada. **Agriambi** V.14, n.4, p.432–437, 2010.
- GERARDI, M. H. *The microbiology of anaerobic digesters*. 2003, John Wiley & Sons. USA, 177p. 2003. ISBN 0-471-20693-8.
- JAMILA, A. Optimisation of factors allowing best gas yield from anaerobic fermentation of poultry manure: energy and the environment, into the 90s. In: **WORLD RENEWABLE ENERGY CONGRESS**, 1, 1990, Reading. Proceedings... p.2061-4.
- LUCAS JR., J.; ORTOLANI, A.F.; BENINCASA, M.; YMADA, R.Y. Avaliação do uso de inóculo no desempenho de biodigestores abastecidos com estrume de frangos de corte com cama de maravalha. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, XXII**, Anais... Ilhéus: SBEA, CEPLAC, 1993 p.915-30.
- LUCAS JUNIOR, J. ; SANTOS, T. M. B.; OLIVEIRA, R. A. . Uso da cama de frangos com maravalha em biodigestores batelada. In: **XXV CONGRESSO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E II CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE INGENIERIA AGRÍCOLA**, Anais... Bauru: SBEA, 1996, 9p.

LUCAS JR., J. de; SANTOS, TÂNIA M. B. APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA INDÚSTRIA AVÍCOLA PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS. **Simpósio sobre resíduos da produção avícola**. 2000. Concórdia-SC.

MATEUS, T. A Suinocultura e a Fermentação Anaeróbica: o potencial energético do biogás através de efluentes da agro-pecuária. Disponível em: www.quercus.pt/xFiles/scContentDeployer_pt/docs/articleFile32.pdf. Acesso em 22/01/2009.

MOGAMI, C. A. Influência de diferentes dietas nas características dos dejetos de cabras leiteiras com vistas à produção de biogás. 2005 48p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

NAMIUCHI, N. N. Biodigestão anaeróbia e características da cama de frangos obtida sob diferentes quantidades iniciais de casca de arroz e três tipos de cobertura de galpões em Dourados – MS. 2002. 123p. Tese (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2002.

OLIVEIRA, A. de L., Conseqüências ambientais. **Cadastro técnico**. Escola de Veterinária UFMG, n. 17, p. 69-73, 1996.

OLIVEIRA, J. E.; SAKOMURA, N. K., FIGUEIREDO, A. N., LUCAS JR, J., SANTOS, T. M. B. Efeito do isolamento térmico de telhado sobre o desempenho de frangos de corte alojados em diferentes densidades. **Rev. Bras. Zootec.**, Viçosa, v. 29, n. 5, Oct. 2000 . doi: 10.1590/S1516-35982000000500021.

PALHARES, J. C. P. Uso da cama de frango na produção de biogás. 2009. Disponível em: www.cnpsa.embrapa.br/down.php?tipo=artigos&cod_artigo=233. Acesso em 22/01/09.

PAYNE, V. W. E; DONALD, J. O. Poultry waste management and environmental protection manual. Alabama: Auburn University, Cooperative Extensive Service, 1991. 50p.

- SANTOS, P. A. Qualidade do ar, conforto térmico e desempenho de frango de corte em dois sistemas de aquecimento e de ventilação. 2008. 96 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa , Viçosa, 2008.
- SANTOS, T.M.B. Balanço energético e adequação do uso de biodigestores em galpões de frangos de corte. 2001. 167 f. Tese (Doutorado em Produção Animal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2001.
- SANTOS, TÂNIA M. B.; LUCAS JR, J. Balanço energético em galpão de frangos de corte. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, v.24, n.1, jan./abr. 2004, p.25-36.
- SANTOS, T. M. B.; LUCAS JR, J. . Utilização de resíduos da avicultura de corte para a produção de energia. In: ZOOTEC'2003 - V Congresso Internacional de Zootecnia; XIII Congresso Nacional de Zootecnia, 2003, Uberaba-MG. Anais do 5o. Congresso Internacional de Zootecnia (e) 13o. Congresso Nacional de Zootecnia. Uberaba : ABCZ:ABZ:FAZU, 2003. p. 131-141.
- SANTOS, T. M. B.; LUCAS JR, J. e SAKOMURA, N. K. Efeitos de densidade populacional e da reutilização da cama sobre o desempenho de frangos de corte e produção de cama. **RPCV** (2005) 100 (553-554) 45-52.
- SAVERY, C. W.; CRUZAN, D. C. Methane recovery from chicken manure digestion. **Journal Water Pollution Control Federation**, v.44, n.12, p.2349-54, 1972.
- SILVESTINNI, G. Indústria de aves vai produzir biogás. GAZETA MERCANTIL, Finanças e Mercados, outubro de 2001. Disponível em: <http://www.unilivre.org.br/centro/experiencias/experiencias/422.html>.
- UBABEF, <http://www.brazilianchicken.com.br/industria-avicola/o-frango-pelo-mundo.php>
Acesso em 26/01/2011.

UBA – União Brasileira de Avicultura. Estatísticas. Disponível em: <<http://www.uba.org.br/estatisticas>>. Acesso em 01-12-2008.

VDI 4630, Fermentation of organic materials. Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests. **Verein Deutscher Ingenieure**. April 2006.

VIGODERIS, R. B. Sistemas de aquecimento de aviários e seus efeitos no conforto térmico ambiental, qualidade do ar e performance animal, em condições de inverno, na região sul do Brasil. 2006. 104 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.

WEBB, A.R, HAWKES, F.R. The anaerobic digestion of poultry manure: variation of gas yield with influent concentration and ammonium-nitrogen levels. **Agricultural Wastes**, v.14, n.2, p.135-56, 1985.

ZANATTA, F. L. Gaseificador de biomassa no aquecimento de aviários e sua relação com conforto térmico, qualidade do ar e desempenho produtivo de frangos de corte. 2007, 111p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 2007.

ZANATTA, F. L.; SILVA, J. N. da; TINÔCO, I. de F. F.; MARTIN, S.; BEZERRA, M. da C. T. Consumo de energia e custos no aquecimento de aviários. SIMCRA 2009. **Anais...** Campina Grande-PB. 2009.