

WILLIAM ROSÁRIO DOS SANTOS

**CONTROLE E AVALIAÇÃO DE UM CONJUNTO GASEIFICADOR-
COMBUSTOR DE FLUXO CONCORRENTE, UTILIZANDO COMO
COMBUSTÍVEL A BIOMASSA DE LENHA DE EUCALIPTO**

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

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2008**

WILLIAM ROSÁRIO DOS SANTOS

**CONTROLE E AVALIAÇÃO DE UM CONJUNTO GASEIFICADOR-
COMBUSTOR DE FLUXO CONCORRENTE, UTILIZANDO COMO
COMBUSTÍVEL A BIOMASSA DE LENHA DE EUCALIPTO**

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

APROVADA: 26 de novembro de 2008

Prof. Delly Oliveira Filho
(Co-Orientador)

Prof. Juarez de Sousa e Silva

Prof. José Márcio Costa

Dr. Volkhard Scholz

Prof. Jadir Nogueira da Silva
(Orientador)

A minha esposa Simone

Aos meus pais Samuel e Mirian

Ao meu sogro Sebastião e sogra Regina

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A 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.

À coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

Ao professor Jadir Nogueira da Silva, pela orientação, incentivo e confiança.

Aos professores Delly Oliveira Filho e Marcio Arêdes Martins, pelo apoio e pelas sábias e oportunas sugestões.

Ao professor Paulo Monteiro pelo auxílio no momento oportuno.

Aos colegas da Pós-graduação e aos funcionários do Setor de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas, Douglas, Edson, Jofran, Hamilton, Sebastião “Catitu”, pela colaboração na montagem do experimento, e em especial a Fábio Zanatta e Samuel Martin pela colaboração e sugestões.

As estudantes de graduação Svetelana e Emanuelle, pelo auxílio direto na coleta de dados.

Aos meus irmãos Hidekel e Quédima, e cunhados Carlos Henrique, Cristiane, Graça, Luiz Antônio e Sérgio pelo incentivo.

E a todos aqueles que de alguma forma contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, a todos muito obrigado.

BIOGRAFIA

WILLIAM ROSÁRIO DOS SANTOS, filho de Samuel Ramos dos Santos e Mirian Rosário dos Santos, nasceu em 17/03/1972, na cidade de Angra dos Reis, Estado do Rio de Janeiro.

Em dezembro de 1991, concluiu o curso Técnico de Processamento de Dados no Colégio Verbo Divino em Barra Mansa/RJ.

Em março de 2001, graduou-se em Licenciatura de Física pela Universidade Federal de Viçosa.

Em 2003, concluiu o curso de Especialização em Ensino de Física pela Universidade Federal de Viçosa.

Em outubro de 2006 iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa na Área de Energia na Agricultura, concluindo o curso em novembro de 2008.

CONTEÚDO

LISTA DE QUADROS	x
LISTA DE FIGURAS	xiii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvii
1. INTRODUÇÃO	- 1 -
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	- 3 -
2.1. Gaseificação de biomassa	- 3 -
2.2. Classificação dos gaseificadores	- 3 -
2.3. Modelos de gaseificadores	- 4 -
2.4. Aplicações de gaseificadores	- 5 -
2.5. Combustível	- 6 -
2.6. Análise química elementar	- 6 -
2.7. Umidade	- 7 -
2.8. Poder calorífico	- 7 -
2.9. Ar estequiométrico ou teórico	- 9 -
2.10. Manutenção	- 10 -
2.11. Combustor	- 11 -
2.12. Controle da temperatura em fornalhas	- 11 -
3. MATERIAL E MÉTODOS	- 12 -
3.1. O experimento	- 12 -
3.2. Construção do gaseificador - combustor	- 12 -
3.3. Características do gaseificador - combustor	- 12 -
3.3.1. Croqui do gaseificador - combustor	- 12 -
3.3.2. Base do reator	- 13 -
3.3.3. Reator	- 13 -

3.3.4.	Tampa	- 14 -
3.3.5.	Entradas de ar primário no reator	- 14 -
3.4.	Grelha	- 15 -
3.5.	Saída dos gases do reator	- 15 -
3.6.	Cinzeiro	- 16 -
3.7.	Combustor	- 16 -
3.7.1.	Câmara de Combustão	- 16 -
3.7.2.	Tubo metálico	- 17 -
3.7.3.	Entrada de ar primário no combustor	- 18 -
3.7.4.	Entradas de ar secundário no combustor	- 18 -
3.7.5.	Teto do Combustor	- 19 -
3.7.6.	Sistema de Ventilação	- 19 -
3.7.7.	Custo na construção do gaseificador	- 20 -
3.8.	Combustível	- 20 -
3.8.1.	Características do combustível	- 20 -
3.8.2.	Composição elementar	- 21 -
3.8.3.	Umidade	- 21 -
3.8.4.	Poder calorífico	- 22 -
3.8.5.	Granulometria	- 22 -
3.9.	Instrumentos e medições	- 22 -
3.9.1.	Velocidade do Ar	- 22 -
3.9.2.	Vazão de ar	- 22 -
3.9.3.	Temperatura	- 23 -
3.9.4.	Umidade relativa e temperatura do ar	- 23 -
3.9.5.	Inversor de freqüência	- 23 -
3.9.6.	Medida da potência do motor	- 23 -
3.10.	Funcionamento e operação do sistema	- 24 -
3.10.1.	Configuração das entradas de ar no combustor	- 24 -
3.10.2.	Tratamentos utilizados para as entradas de ar no combustor	- 24 -
3.10.3.	Abastecimento	- 25 -
3.10.4.	Ignição	- 25 -
3.10.5.	Determinação das vazões de operação	- 26 -
3.10.6.	Calor produzido	- 26 -
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	- 28 -
4.1.	Propriedades avaliadas do combustível	- 28 -

4.1.1.	Umidade	- 28 -
4.1.2.	Granulometria	- 28 -
4.1.3.	Poder calorífico	- 28 -
4.2.	Potência elétrica	- 29 -
4.2.1.	Motor do ventilador	- 29 -
4.2.2.	Curva do ventilador	- 29 -
4.3.	Vazão volumétrica de ar	- 31 -
4.3.1.	Entrada de ar primário no reator	- 31 -
4.3.2.	Entrada do ar primário no combustor	- 32 -
4.3.3.	Vazão volumétrica do ar de exaustão	- 33 -
4.3.4.	Vazão volumétrica de ar no reator, combustor e exaustão	- 34 -
4.4.	Temperatura e energia disponível no ar de exaustão em função da vazão volumétrica do ar de exaustão	- 36 -
4.5.	Vazão volumétrica de ar em função das áreas de entrada de ar no combustor, para diferentes potências do motor	- 39 -
4.6.	Custo na Construção do gaseificador	- 40 -
4.7.	Ignição da combustão no reator com e sem casca de eucalipto	- 42 -
5.	RESUMO E CONCLUSÕES	- 43 -
6.	COMENTÁRIOS FINAIS	- 44 -
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	- 45 -
8.	ANEXOS	- 48 -

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Composição elementar de biomassa em % (base seca) ____	- 6 -
Quadro 2: Poder calorífico superior de biomassa, em kJ.kg^{-1} (base seca) _____	- 8 -
Quadro 3: Abertura das entradas de ar primário no combustor _____	- 24 -
Quadro 4: Abertura das entradas de ar secundário no combustor ____	- 24 -
Quadro 5: Tratamentos utilizados para as entradas de ar primário e secundário _____	- 25 -
Quadro 6: Potência ativa média do motor do ventilador em função da frequência do inversor de frequência _____	- 29 -
Quadro 7: Material necessário para a construção do gaseificador ____	- 41 -
Quadro 8: Serviços de terceiros e encargos diversos necessários para a construção do gaseificador _____	- 41 -
Quadro 9: Custo com equipamento para o controle da vazão de ar ____	- 42 -
Quadro 10: Total dos custos para a construção do gaseificador _____	- 42 -
Quadro 11: Dados relativos ao percentual de umidade da lenha, início dos testes dia 06/06/08 às 17h00min e fim dos testes dia 07/06/08 às 17h00min _____	- 48 -
Quadro 12: Granulometria médias do combustível _____	- 49 -
Quadro 13: Dados referentes as leituras da potência ativa para as frequência de 10 a 35 Hz _____	- 50 -
Quadro 14: Dados referentes as leituras da potência ativa para as frequência de 40 a 60 Hz _____	- 51 -
Quadro 15: Dados referentes a temperatura ambiente e umidade relativa para todos os testes _____	- 52 -

Quadro 16: Dados referentes a potência ativa média e temperatura dos testes realizados com o tratamento C0 S0, com 3 repetições _____	- 53 -
Quadro 17: Dados referentes a potência ativa média e temperatura dos testes realizados com o tratamento C0 S1, com 3 repetições _____	- 54 -
Quadro 18: Dados referentes a potência ativa média e temperatura dos testes realizados com o tratamento C0 S2, com 3 repetições _____	- 55 -
Quadro 19: Dados referentes a potência ativa média e temperatura dos testes realizados com o tratamento C1 S0, com 3 repetições _____	- 56 -
Quadro 20: Dados referentes a potência ativa média e temperatura dos testes realizados com o tratamento C1 S0, com 3 repetições _____	- 57 -
Quadro 21: Dados referentes a potência ativa média e temperatura dos testes realizados com o tratamento C1 S20, com 3 repetições _____	- 58 -
Quadro 22: Dados referentes às áreas de entrada e saída de ar para as configuração utilizadas _____	- 59 -
Quadro 23: Dados referentes a vazão volumétrica média de ar ($m^3 s^{-1}$) para a configuração de C0 S0 _____	- 60 -
Quadro 24: Dados referentes a vazão volumétrica média de ar ($m^3 s^{-1}$) para a configuração de C0 S1 _____	- 61 -
Quadro 25: Dados referentes a vazão volumétrica média de ar ($m^3 s^{-1}$) para a configuração de C0 S2 _____	- 62 -
Quadro 26: Dados referentes a vazão volumétrica média de ar ($m^3 s^{-1}$) para a configuração de C1 S1 _____	- 63 -
Quadro 27: Dados referentes a vazão volumétrica média de ar ($m^3 s^{-1}$) para a configuração de C1 S2 _____	- 64 -
Quadro 28: Dados referentes a vazão volumétrica média de ar ($m^3 s^{-1}$) de exaustão, utilizando as configurações C0 S0, C0 S1, C0 S2, C1 S1 e C1 S2 _____	- 65 -

Quadro 29: Dados referentes a vazão mássica média de ar (kg s^{-1})
para as configurações C0 S0, C0 S1, C0 S2 , C1 S1 e
C1 S2 _____ - 66 -

Quadro 30: Dados referentes a energia média contida no ar de
exaustão de ar (kJ s^{-1}) para as configurações C0 S0, C0 S1,
C0 S2 , C1 S1 e C1 S2 _____ - 67 -

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Tipos de gaseificadores: (a) contra-corrente, (b) concorrente, (c) fluxo cruzado e (d) leito fluidizado. _____ - 4 -
- Figura 2: Croqui do gaseificador-combustor, mostrando suas entradas de no reator e no combustor. _____ - 12 -
- Figura 3: Base do reator. _____ - 13 -
- Figura 4: Reator do gaseificador. _____ - 13 -
- Figura 5: Detalhes do topo reator: (a) canaleta contendo areia e (b) Tampa _____ - 14 -
- Figura 6: Detalhes da comporta: (a) comporta para controle do ar primário antes da instalação e (b) comporta soldada no reator _____ - 14 -
- Figura 7: Detalhes da grelha: (a) Altura da grelha (b) Largura da grelha e (c) Comprimento da grelha _____ - 15 -
- Figura 8: Abertura para saída dos gases do reator _____ - 15 -
- Figura 9: Cinzeiro _____ - 16 -
- Figura 10: Vista superior da célula de queima dos gases _____ - 17 -
- Figura 11: Visor da câmara de combustão durante um dos testes, com a visão de uma chama vinda do reator _____ - 17 -
- Figura 12: Tubo no interior do combustor. _____ - 18 -
- Figura 13: Entrada de ar primário no combustor, antes de ser instalada sobre o combustor _____ - 18 -
- Figura 14: Entrada de ar secundário no combustor, tipo comporta. ____ - 19 -
- Figura 15: Construção da laje do combustor _____ - 19 -
- Figura 16: (a) ventilador e motor e (b) motor _____ - 20 -

Figura 17: Combustível cortado conforme a necessidade do projeto	_	- 21 -
Figura 18: Curva do ventilador (pressão versus vazão volumétrica) para as potências ativa média 93, 121 e 136 W	_____	- 30 -
Figura 19: Curva do ventilador (pressão versus vazão volumétrica) para as potências ativa média 142, 151, 165 e 180 W	_____	- 30 -
Figura 20: Curva do ventilador (pressão versus vazão volumétrica) para as potências ativa média de 200, 229, 270 e 326 W	___	- 31 -
Figura 21: Vazão volumétrica de ar na entrada do reator, em função da potência ativa média do motor, para o reator vazio e com lenha (13,0 kg)	_____	- 32 -
Figura 22: Vazão volumétrica do ar através da entrada do ar primário no combustor, em função da potência ativa média, para três áreas de aberturas do combustor	_____	- 33 -
Figura 23: Vazão volumétrica do ar de exaustão em função da potência ativa média do motor, para o reator vazio e com lenha (13,0 kg)	_____	- 34 -
Figura 24: Vazão volumétrica de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) nas entradas de ar (reator e combustor) e exaustão, para a potência ativa média de 326 W, em função da área de entrada de ar no combustor	_	- 35 -
Figura 25: Vazão volumétrica de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) nas entradas de ar (reator e combustor) e exaustão, para a potência ativa média de 229 W, em função da área de entrada de ar no combustor	_	- 35 -
Figura 26: Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) do ar de exaustão em função da vazão volumétrica do ar de exaustão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), para diferentes valores de área de abertura no combustor.	_____	- 37 -
Figura 27: Energia disponível no ar de exaustão por unidade de tempo (kJ s^{-1}) em função da vazão volumétrica, para diferentes valores de área de abertura no combustor	_____	- 38 -
Figura 28: Valores máximos de energia disponível no ar de exaustão, em função das aberturas de entrada de ar no combustor	___	- 39 -
Figura 29: Vazão volumétrica de ar de exaustão em função das aberturas de entrada de ar no combustor, para diferentes valores de potência ativa média do motor	_____	- 40 -

RESUMO

SANTOS, William Rosário dos, M.Se., Universidade Federal de Viçosa, novembro de 2008. **Controle e avaliação de um conjunto gaseificador-combustor de fluxo concorrente, utilizando como combustível a biomassa de lenha de eucalipto.** Orientador: Jadir Nogueira da Silva. Co-orientadores: Delly Oliveira Filho e Marcio Arêdes Martins.

Nos dias atuais, há uma preocupação com questões ecológicas associadas à preservação dos recursos naturais visando à qualidade de vida atual e futura. Nesse contexto, a gaseificação de biomassa é uma tecnologia sustentável para a geração de energia, por apresentar baixa emissão de gases poluentes. Um dos problemas do uso do gaseificador para o aquecimento do ar em aviários é o desperdício de energia no período diurno, tendo em vista que o equipamento não dispõe de sistema de controle de potência térmica gerada. Nesse período, a diferença de temperatura entre o ar ambiente e a necessária para as aves no interior dos galpões é menor quando comparada com o período noturno. Outra forma de controle da temperatura é o desligamento do sistema, o que acarreta uma constante atenção por parte do operador. Desse modo, há um potencial de economia de energia, caso venha a ser controlada a potência térmica em função da demanda, que pode ser representada pelo gradiente de temperatura. Objetivou-se com este trabalho avaliar o controle de um conjunto gaseificador-combustor de fluxo concorrente, por meio do controle da velocidade do motor do ventilador e das entradas de ar primário e

secundário no combustor. O experimento foi realizado nos laboratórios da Área Pré-processamento de Produtos Agrícolas e de Energia do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. O sistema de aquecimento de ar foi constituído por um gaseificador de biomassa de fluxo concorrente conectado a um combustor, onde foi queimado o gás produzido. Na saída do combustor foi colocado um ventilador centrífugo, com capacidade para $20 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ acionado por um motor de 552 W, 220 V trifásico. As medidas de temperaturas do ar exaustão e ambiente foram realizadas por meio de termopares blindados do tipo K, de Cromel+Alumel. A biomassa utilizada foi lenha de eucalipto, tendo um diâmetro médio de $6,0 \pm 2,0 \text{ cm}$ e comprimento médio de $4,0 \pm 2,0 \text{ cm}$. As áreas mínimas e máximas utilizadas para as entradas de ar primário no combustor foram de 0 e 112 cm^2 , e secundário de 0, 180 e 360 cm^2 . O intervalo de frequências escolhidas e fornecidas pelo inversor ao motor foram de 10 a 60 Hz, com variação de 5 Hz, com isso foi obtido um intervalo de potência ativa média para o motor de 93 a 326 W. A diferença de temperatura e potência ativa média do motor foi medida para as entradas de ar no combustor fechadas, foi respectivamente de $127,7 \text{ }^\circ\text{C}$ e 233 W, e para a área de entradas de ar no combustor igual 472 cm^2 , foi respectivamente de: $10 \text{ }^\circ\text{C}$ e 97 W. Após analisar os resultados conclui-se que: O controle de temperatura do ar de exaustão pode ser efetuado pelo fluxo de ar que passa pelas entradas de ar no combustor, por meio do controle da área da entrada de ar no combustor ou pela variação da velocidade do motor do ventilador. A variação da área de entrada de ar no combustor implica em uma variação na temperatura do ar de exaustão. Entretanto, o controle da velocidade do motor proporciona uma variação da temperatura do ar de exaustão, e uma diminuição no consumo de energia elétrica. A operação do gaseificador-combustor utilizando o inversor de frequência combinado com as aberturas de entrada de ar no combustor flexibiliza a consumo de potência térmica.

ABSTRACT

SANTOS, William Rosário dos, M.Se., Universidade Federal de Viçosa, November 2008. **Control and evaluation of a set gasifier-combustor with co-current flow using eucalyptus wood as a fuel.** Advisor: Jadir Nogueira da Silva. Co-advisors: Delly Oliveira Filho and Marcio Arêdes Martins.

Recently, concern has grown considering environmental issues associated with the preservation of natural resources with the intention of improving the present and future quality of life. Biomass gasification shows to be a sustainable technology for power generation with low greenhouse gas emissions. One of the problems by using the gasifier for air heating purposes in poultry facilities is the waste of energy during the day, since the equipment does not have control of the thermal power generated. During this period, the temperature difference between the air outside and the birds inside the building is lower when compared with the nocturnal period. Another way to control the temperature is the shutdown of the system, which requires the constant attention of the operator. Thus, there is a potential for energy savings if the thermal power could be controlled according to the demand, which can be represented by the temperature gradient. The purpose of this study was to evaluate the control of a set combustor-gasifier with downdraught co-current flow, through the control of speed of the fan engine and also controlling the contributions of primary and secondary air in the combustor. The experiment was carried out in the Energy and Pre-processing Areas of the Department of Agricultural Engineering, at the Federal University of Viçosa, Viçosa, Minas Gerais State. The air heating system was composed of a biomass gasifier with co-current air flow connected to a combustor for burning the gas produced. At the combustor

exit was a centrifugal fan with capacity for $20 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 552 W, 220 V three-phase motor. The exhaustion and environmental air temperatures were measured by thermocouples K (Cromel + Alumel). Eucalyptus wood biomass, with an average diameter $6.0 \pm 2.0 \text{ cm}$ average length $4.0 \pm 2.0 \text{ cm}$ was used as fuel to the gasifier. The areas used for the primary air contributions to the combustor were 0 and 112 cm^2 , and for the secondary air contribution to the combustor were: 0, 180 and 360 cm^2 . The frequencies chosen and applied by the frequency inverter to the motor were from 10 to 60 Hz, with steps of 5 Hz, obtaining a range of average actual power from the motor from 93 to 326 W. The difference of temperature and average actual power from the motor was measured with the combustor air inlets closed were respectively $127.7 \text{ }^\circ\text{C}$ and 233 W. When the combustor air inlet area was 472 cm^2 , $10 \text{ }^\circ\text{C}$ and 97 W were found. After evaluating the results, it could be concluded that: the control of exhaustion air temperature can be done by controlling the air flow to the combustor or changing the speed of the fan motor. The variation of the input area of air in the combustor implicates in a variation in the temperature of the exhaustion air. However, controlling the speed of the fan motor provides a change in exhaustion air temperature and a decrease in electric power consumption. The operation of the gasifier-combustor using a frequency inverter combined with the combustor openings of air eases the consumption production of thermal power.

1. INTRODUÇÃO

A cada ano que passa cresce o consumo dos recursos energéticos com o objetivo de manter e aumentar o padrão de desenvolvimento dos povos. Entretanto, a produção de bens e conforto para a humanidade tem causado o aumento da poluição e o esgotamento dos recursos naturais, reduzindo a qualidade de vida (FERNANDES et al., 2003).

Nos dias atuais, há uma preocupação com questões ecológicas associadas à preservação dos recursos naturais visando à qualidade de vida atual e futura (FERREIRA et. al, 2006). Por isso, tem-se procurado desenvolver novas tecnologias que, de forma sustentável, auxiliem o desenvolvimento sócio-econômico atual e futuro (VIEIRA, 2005).

Na tentativa de diminuir o ritmo da poluição causada pela emissão de gases na atmosfera e o crescente consumo de recursos energéticos não renováveis, tem-se procurado novas tecnologias para a conversão de biomassa em fontes de energia (SANTOS, 2003).

Nesse contexto, a gaseificação de biomassa coloca-se como uma tecnologia sustentável para a geração de energia, com baixa emissão de gases poluentes (FERNANDES, 2000).

O uso do gás combustível gerado por gaseificador de biomassa pode ter diversos fins, tais como térmicos (secadores ou aquecedores), geração de eletricidade ou substituição de combustíveis derivados do petróleo em veículos (MARTIN, 2005).

O acoplamento do reator de gaseificação de biomassa a uma câmara de combustão dos gases mostrou-se uma alternativa tecnicamente viável para aquecimento direto de ar, obtendo-se ar quente e limpo para várias aplicações (VIEIRA, 2005).

Zanatta (2007), em testes usando gaseificador-combustor para o aquecimento do ar em aviários, com fogo direto, durante um período de 25 dias e funcionando 24 horas por dia, obteve uma economia de 26% de lenha em relação à fornalha, a fogo indireto. As concentrações de CO e CO₂ estiveram dentro dos limites de segurança, que são de 10 ppm e 3.000 ppm, respectivamente (WHATES, 1999).

Um dos problemas detectado por Zanatta (2007) foi o desperdício de energia no período diurno, tendo em vista que o equipamento utilizado por ele não dispunha de sistema de controle de potência térmica gerada. Nesse período, a diferença de temperatura entre o ar ambiente e a necessária para as aves no interior dos galpões foi menor quando comparada com o período noturno. Durante o dia, a temperatura dentro do aviário foi controlada por meio de cortinas do galpão, sem que houvesse uma diminuição na queima de biomassa, o que caracterizou o desperdício de energia. Desse modo, há um potencial de maior economia de energia, caso venha a ser controlada a potência térmica em função da demanda, que pode ser representada pelo gradiente de temperatura.

Neste contexto, há de se determinar os limites máximos e mínimos de potência térmica, de modo que se possa encontrar a flexibilidade de operação do gaseificador-combustor. Essa flexibilidade de operação trará melhor controle e uso racional de energia elétrica e da biomassa na produção de ar quente. Isto permitirá adequar a produção de energia de acordo com a demanda.

Tendo em vista o exposto, objetivou-se com este trabalho controlar a temperatura de exaustão de um conjunto gaseificador-combustor de fluxo concorrente e realizar avaliação técnico-econômica, relativo aos custos de construção.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Gaseificação de biomassa

A gaseificação é definida como o processo de conversão da biomassa, ou de qualquer combustível sólido em um gás energético, por meio da oxidação parcial em temperaturas elevadas. Utiliza-se para gaseificação valores de 20 e 40% da quantidade teórica de ar, de tal modo que ocorram, além de reações de oxidação (completa e parcial), principalmente reações de redução, promovendo a formação de gás combustível (MARTIN, 2006).

O processo de gaseificação de biomassa ocorre em duas etapas. Na primeira, a biomassa sofre uma pirólise, produzindo coque (com teor de carbono de até 90%), produtos solúveis (ácidos pirolenhosos), produtos insolúveis (alcatrões) e gases (hidrogênio, monóxido e dióxido de carbono e nitrogênio). A etapa seguinte é a gaseificação, na qual ocorre a oxidação do carbono (coque) em monóxido de carbono, ao mesmo tempo em que ocorre o craqueamento térmico dos produtos solúveis e insolúveis (VELÁZQUEZ, 2006).

Um gaseificador ideal deverá: produzir um gás combustível limpo e de alta qualidade a partir de uma grande variedade de biomassa; trabalhar eficientemente sem exigir atenção constante de um operador; responder rapidamente às alterações de carga; ter um baixo custo e ser durável (SÁNCHEZ, 2007).

2.2. Classificação dos gaseificadores

Segundo Sánchez (2007), os gaseificadores são classificados quanto aos seguintes parâmetros:

- Poder calorífico do gás produzido;
- Tipo de agente gaseificador;
- Direção do movimento relativo da biomassa e do ar;
- Pressão de trabalho; e
- Tipo e forma da biomassa.

2.3. Modelos de gaseificadores

A direção do movimento da biomassa e do agente de gaseificação define quatro tipos de gaseificadores que são mostrados na Figura 1. As espessuras das zonas de: secagem, pirólise, redução e combustão, são variáveis para cada caso.

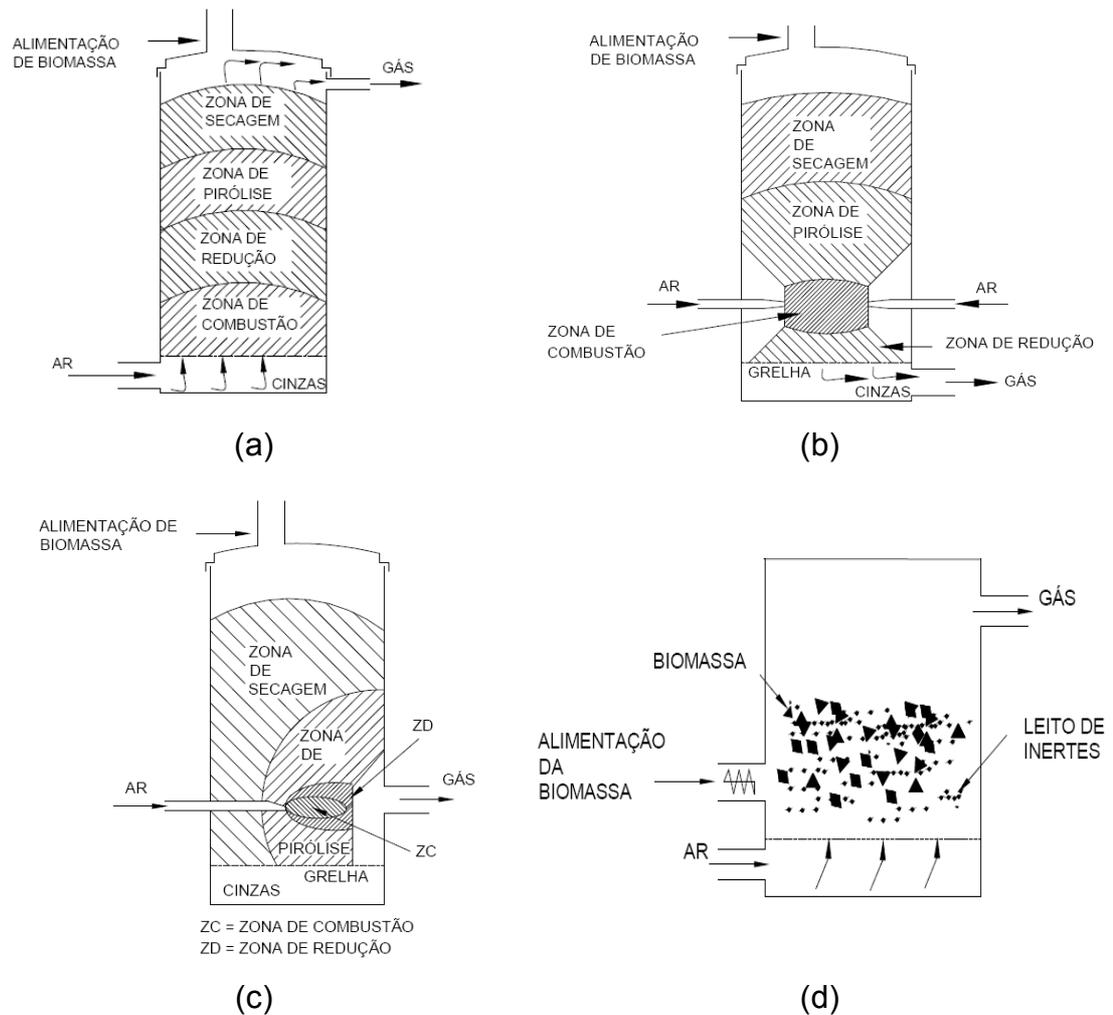


Figura 1: Tipos de gaseificadores: (a) contra - corrente, (b) concorrente, (c) fluxo cruzado e (d) leito fluidizado.

Segundo Silva et al. (2000), a gaseificação proporciona as seguintes vantagens:

- Alta eficiência térmica, variando de 60% a 90%, dependendo do sistema implementado;
- O aquecimento do ar a partir da queima dos gases é menos poluente;

- A demanda de energia pode ser controlada e, conseqüentemente, a taxa de gaseificação pode ser monitorada; e
- O uso da biomassa trás um impacto nulo ao meio ambiente, pois o carbono lançado para a atmosfera é absorvido pelas plantas durante seu crescimento (KINTO e UDAETA, 2001).

Entretanto, Silva et al. (2000), citam as seguintes desvantagens:

- A biomassa deverá ser limpa, sem a presença de elementos que possam comprometer o processo de gaseificação;
- O tamanho da biomassa deverá ser adequado ao gaseificador, devendo ser cortada anteriormente;
- Há o risco de fusão de cinzas que poderá alterar o desempenho do gaseificador quando se usa a biomassa com alto teor de cinzas, ou temperaturas inadequadas; e
- Se não completamente queimados o alcatrão formado durante o processo de gaseificação, poderá gerar monóxido de carbono (CO).

2.4. Aplicações de gaseificadores

Dentre as aplicações dos gases produzidos a partir da gaseificação de biomassa tem-se a combustão em motores ou em turbinas para a geração de potência, de energia elétrica, para a geração direta de calor ou como matéria prima na síntese da amônia e do metano (SÁNCHEZ, 2007).

O trabalho realizado por Santos (2003) mostra que a produção de energia elétrica em geradores a gás, a partir da gaseificação de biomassa, pode contribuir para todo o país, principalmente, na região amazônica onde há déficit no suprimento de energia elétrica e de outras formas de energia.

Testes têm sido realizados para produção de ar quente para a secagem de produtos agrícolas e outros fins em gaseificador de biomassa, com combustão subsequente do gás produzido (MARTIN, 2005; VIEIRA, 2005). E chegaram à conclusão que o um gaseificador pode competir com os métodos tradicionais para geração de calor.

2.5. Combustível

Os combustíveis que podem ser utilizados em um gaseificador são os mais variados, tais como: lenha, carvão vegetal, resíduos florestais, resíduos de madeira (serragem, lascas etc.), resíduos agrícolas (bagaço de cana, sabugo de milho, talos de mandioca, e casca de arroz) (MURARO, 2006; KINTO e UDAETA, 2001; ALTAFINI e WANDER, 2001; FERNANDES et al., 2000). Em gaseificadores de fluxo concorrente só é possível gaseificar materiais com até 30 % de umidade, uma vez que o excesso de água prejudica a qualidade do gás, tornando instável a zona de combustão (ZANATTA, 2007).

2.6. Análise química elementar

A análise química elementar da biomassa apresenta as porcentagens em massa dos elementos constituintes, que são principalmente: carbono, enxofre, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, umidade e resíduo (SÁNCHEZ, 2007).

A composição elementar fornece a base para a análise dos processos de combustão, tais como: cálculos dos volumes de ar, gases e entalpia, determinando o poder calorífico do combustível.

A composição elementar de dois diferentes tipos de biomassa, lenha e carvão vegetal é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1: Composição elementar de biomassa em % (base seca)

Biomassa	Composição elementar (%)					
	Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio	Enxofre	Resíduo
Pinus ¹	49,25	5,99	44,36	0,06	0,03	0,3
Eucalipto ²	49,00	5,87	43,97	0,30	0,01	0,72
Eucalipto ³	47,50	6,00	44,00	1,00	1,50	-
Carvão ³	82,70	3,8	13,50	-	-	-

Fonte:¹JENKINS (1990), citado por LORA et al (1997); ²VLASSOV (2001);

³ LOPES(2002).

2.7. Umidade

A determinação da umidade é feita pelo método do forno de secagem conforme a norma ADTM D-3173. Este método estabelece que a amostra deve ser secada em fornos com circulação natural de ar a temperatura entre 104 a 110°C até que não ocorra mais variação da massa SÁNCHEZ (2007). A determinação da umidade é feita por meio da Equação 1.

$$U_{BU} = \frac{M_U - M_S}{M_U} \quad (1)$$

em que

- U_{BU} = teor de umidade na base úmida, kg kg⁻¹;
- M_U = massa da amostra de biomassa úmida, kg; e
- M_S = massa da amostra de biomassa seca, kg.

2.8. Poder calorífico

É a quantidade de energia por unidade de massa que se desprende durante a combustão completa do combustível, expressa em kJ.kg⁻¹. Define-se poder calorífico superior (PCS), quando a água proveniente da combustão é considerada na forma líquida e poder calorífico inferior (PCI) quando a água proveniente da combustão é considerada na forma de vapor (SÁNCHEZ, 2007).

O poder calorífico superior (PCS) pode ser medido em calorímetros, ou pode ser estimado a partir da composição elementar do combustível, em base seca, e da entalpia de reação dos elementos combustíveis com o oxigênio, utilizando-se a fórmula de Dulong, expressa pela Equação 2 (LOPES et al., 2000).

$$PCS = 33.774 C + 141.744 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 9.238 S \quad (2)$$

em que

- PCS = Poder calorífico superior do combustível seco, kJ kg⁻¹;
- C = Razão entre a massa de carbono e a massa de

- combustível seco, kg kg^{-1} ;
- H_2 = Razão entre a massa de hidrogênio e a massa de combustível seco, kg kg^{-1} ;
- O_2 = Razão entre a massa de oxigênio e a massa de combustível seco, kg kg^{-1} ; e
- S = Razão entre a massa de enxofre e a massa de combustível seco, kg kg^{-1} .

No Quadro 2 encontra-se o PCS de alguns biocombustíveis sólidos.

Quadro 2: Poder calorífico superior de biomassa, em kJ.kg^{-1} (base seca)

Biomassa	Poder calorífico superior (kJ.kg^{-1})
Pinus ¹	20.020
Eucalipto ¹	19.420
Eucalipto ²	18.420
Carvão ²	30.900

Fonte: ¹ JENKINS (1990), citado por LORA et al. (1997); ² LOPES (2002).

O poder calorífico inferior (PCI) é definido como a quantidade de energia contida em uma unidade de massa, expressa em kJ.kg^{-1} , sem a presença de vapor d'água, de acordo com a Equação 3 (LOPES, 2002).

$$\text{PCI} = \text{PCS} - h_w (9 \text{H}_2) \quad (3)$$

em que

- PCI = Poder calorífico inferior do combustível seco, kJ kg^{-1} ;
- h_a = Entalpia de vaporização da água na temperatura de referência igual a 25°C (2.440 kJ kg^{-1}); e
- 9H_2 = Parcela de vapor d'água formado pela combustão do hidrogênio.

2.9. Ar estequiométrico ou teórico

A quantidade exata de ar para proporcionar a combustão completa de carbono, hidrogênio, enxofre e de outros elementos presentes no combustível que possam se oxidar é denominada “ar teórico” ou ar estequiométrico (LOPES et al., 2002).

Ar estequiométrico é a quantidade de ar teoricamente necessária para a combustão total de um quilograma de combustível e se calcula a partir das reações de combustão dos elementos que o compõem (reações estequiométricas). Estas reações estequiométricas de combustão são as reações dos componentes elementares do combustível com o oxigênio (LORA e HAPP, 1997).

A determinação da quantidade mínima de oxigênio necessário e suficiente para oxidar completamente os elementos combustíveis é feita com base na análise elementar do combustível. Para um combustível isento de umidade e constituído por carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre, as equações químicas de reação estequiométrica entre estes elementos e o oxigênio conduzem à Equação 4, que permite determinar a massa teórica do oxigênio necessária à combustão (PERA, 1990).

$$m_{O_2}^{ts} = \frac{32}{12} C + 8 H_2 - O_2 + S \quad (4)$$

em que $m_{O_2}^{ts}$ é a massa teórica de oxigênio por unidade de massa de combustível, $kg.kg^{-1}$.

O consumo de oxigênio e de ar comburente por quilograma de combustível úmido, por apresentar certo teor de água pode ser expresso pela Equação 5.

$$m_{O_2}^{tu} = m_{O_2}^{ts} (1 - U_{bu}) \quad (5)$$

em que $m_{O_2}^{tu}$ é a massa teórica de oxigênio por unidade de massa de combustível úmido, $kg.kg^{-1}$.

Segundo (SÁNCHEZ, 2007), a maioria dos processos industriais de combustão utiliza o ar ambiente como fonte de fornecimento de oxigênio para a combustão, sendo que a sua composição gravimétrica corresponde a 23 % de oxigênio e 77 % de nitrogênio.

A massa teórica de ar seco necessário para a combustão pode ser calculada por meio da Equação 6.

$$m_{\text{ar.seco}}^{\text{ts}} = \frac{100}{23} m_{\text{O}_2}^{\text{ts}} \quad (6)$$

em que $m_{\text{ar.seco}}^{\text{ts}}$ é a massa teórica de ar comburente seco por unidade de massa de combustível seco, kg.kg^{-1} .

O consumo estequiométrico de ar comburente seco, por quilograma de combustível úmido pode ser obtido por meio da Equação 7.

$$m_{\text{ar.seco}}^{\text{tu}} = \frac{100}{23} m_{\text{O}_2}^{\text{tu}} \quad (7)$$

em que $m_{\text{ar.seco}}^{\text{tu}}$ é a massa teórica de ar comburente seco por unidade de massa de combustível úmido, kg.kg^{-1} .

Como na composição do ar úmido existe vapor d'água, o consumo de ar teórico úmido, por unidade de combustível úmido, pode ser calculado por meio da Equação 8.

$$m_{\text{ar.úmido}}^{\text{tu}} = m_{\text{ar.seco}}^{\text{tu}} (1 + W) \quad (8)$$

em que

$m_{\text{ar.úmido}}^{\text{tu}}$ = massa teórica de ar comburente úmido por unidade de massa de combustível úmido, kg kg^{-1} ; e

W = razão entre a massa de vapor d'água e a massa de ar seco, kg kg^{-1} .

2.10. Manutenção

A zona de combustão é o local, nos gaseificadores, em que o reator está submetido à maior temperatura. Nesse local, há uma grelha que requer manutenção como substituição total ou parcial devido aos danos térmicos.

A temperatura do motor deve ser controlada, pois caso ocorra aquecimento sua eficiência pode diminuir, e causar danos em seus componentes.

O tijolo refratário, localizado no interior do reator, pode ser deslocado ou danificado pelo movimento da biomassa entre o topo e a grelha.

No topo do reator é colocada uma tampa apoiada sobre areia, que tem a função de impedir a passagem de gases. Por isso deve-se manter a quantidade e a qualidade da areia necessária para a vedação.

O cinzeiro, localizado abaixo da zona de redução, precisa ser mantido fechado, para evitar a entrada de ar, e em intervalos de tempos regulares de funcionamento deve-se retirar as cinzas.

2.11. Combustor

A combustão é o conjunto de reações químicas exotérmicas nas quais intervém o oxigênio, produzindo energia de forma aproveitável (OLIVEIRA FILHO, 1987).

No dimensionamento de combustores, é importante propiciar a temperatura mínima capaz de permitir que a combustão inicie e se mantenha. A temperatura de ignição é definida como a temperatura na qual a quantidade de energia térmica produzida durante a reação é maior do que a quantidade de energia térmica perdida para o ambiente, permitindo que a combustão prossiga (MARTIN, 2005).

2.12. Controle da temperatura em fornalhas

Segundo Lopes (2000), a produção de calor a fogo indireto feita na maioria das fornalhas a lenha não dispõem de mecanismo de controle do processo de combustão. Essas fornalhas requerem supervisão constante do operador e, na maioria das vezes, são operadas inadequadamente, e tendo como consequência combustão incompleta, contaminando o ar de secagem por resíduos da combustão, prejudicando a manutenção constante da temperatura do ar durante a secagem.

Segundo Zanatta (2007), o controle de temperatura pode ser feito por um sensor ligado ao painel, com termostato e regulagem que pode ser programada ou feita diretamente pelo operador. O intervalo de temperatura geralmente usado é de 2°C, onde o motor utilizado para a sucção do ar é desligado quando atinge a temperatura máxima programada para o dia e ligado quando a temperatura diminui 2°C abaixo da máxima.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. O experimento

O experimento foi realizado nos Laboratórios da Área Pré-processamento de Produtos Agrícolas e de Energia do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. O sistema de aquecimento foi constituído por: reator de fluxo concorrente, combustor para queima dos gases produzidos, misturador (ar quente + ar ambiente); sistema de ventilação composto por ventilador e motor; sistema de aquisição de dados e controle de vazão de ar.

3.2. Construção do gaseificador - combustor

O sistema de aquecimento de ar foi constituído por um gaseificador de biomassa de fluxo concorrente conectado a um combustor, onde foi queimado o gás produzido, baseado no modelo desenvolvido por Martin et al. (2006). Na saída do combustor foi colocado um ventilador centrífugo, com capacidade para $20 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ acionado por um motor de 552 W, 220 V trifásico.

3.3. Características do gaseificador - combustor

3.3.1. Croqui do gaseificador - combustor

Na Figura 2 é mostrado um croqui do sistema gaseificador combustor para efeito de melhor entendimento.

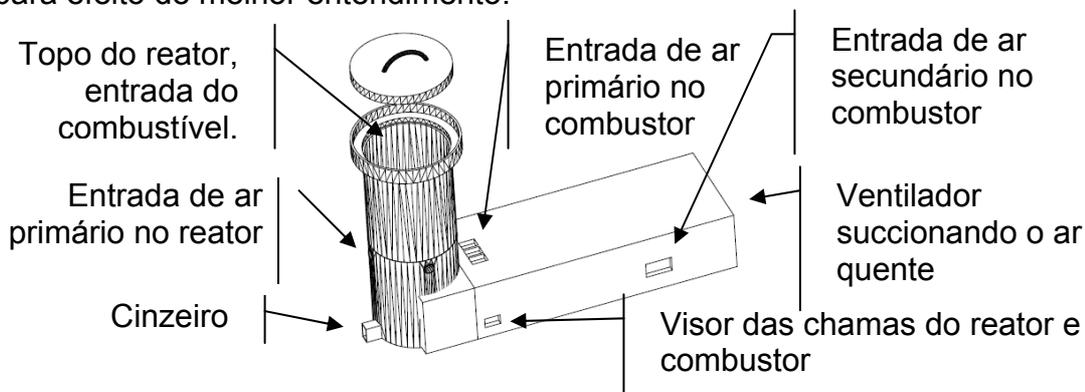


Figura 2: Croqui do gaseificador - combustor, mostrando suas entradas de ar no reator e no combustor.

3.3.2. Base do reator

O reator foi construído sobre uma base de tijolo refratário, de 1,0 m² e 0,20 m de altura, e revestido com argamassa refratária. As dimensões do tijolo refratário utilizado foram de 23 x 11,5 x 6,5 cm. E o traço da massa utilizada foi de 4:4:1 (argamassa refratária, terra comum e pó de carvão vegetal). A base do reator é apresentado na Figura 3.



Figura 3: Vista da base do reator.

3.3.3. Reator

O reator do gaseificador foi constituído de dois tubos de ferro de 0,80 m e 0,70m de altura, 0,40 m de diâmetro e 0,04 m de espessura. No interior do reator foi construída uma parede de tijolo refratário formando um anel de 0,10 m de espessura e 1,00 m de altura. O tubo foi dividido em duas partes para diminuir a dificuldade de construção da parede interna com tijolos refratários. Para fixação dos tijolos foi utilizada argamassa refratária devido à temperatura que essa região era submetida. A uma altura de 0,80 m foram colocadas quatro entradas de ar primário. A vista do reator é apresentada na Figura 4.



Figura 4: Reator do gaseificador.

3.3.4. Tampa

A tampa do reator foi feita de ferro de 0,60 m de diâmetro e 0,10 m de altura, contendo uma alça para melhor manuseio. Para que ocorresse a vedação dos gases, a tampa ficou apoiada sobre areia, que foi colocada dentro de uma canaleta de metal de 0,80 m de diâmetro e 0,10 m de altura. Essa canaleta foi soldada no lado externo e no topo do reator. A Figura 5 mostra o topo do reator com a canaleta e a tampa.



(a)



(b)

Figura 5: Detalhes do topo reator: (a) canaleta contendo areia e (b) tampa.

3.3.5. Entradas de ar primário no reator

Para a entrada de ar primário no reator, foram feitos quatro entradas utilizando um tubo metálico de 0,05 m de diâmetro interno, a 0,60 m de altura da base. O controle da entrada foi feito por meio de comportas com movimento horizontal. Uma das comportas para entradas de ar antes e após a fixação no reator é mostrada na Figura 6.



(a)



(b)

Figura 6: Detalhes da comporta: (a) comporta para controle do ar primário antes da instalação e (b) comporta soldada no reator.

3.4. Grelha

A grelha foi construída com vergalhão de 0,02 m de diâmetro, tendo 0,42 m de altura e 0,20 m de diâmetro. A área livre da grelha foi de 0,0167 m². A Figura 7 mostra a grelha antes de ser colocada dentro do reator.

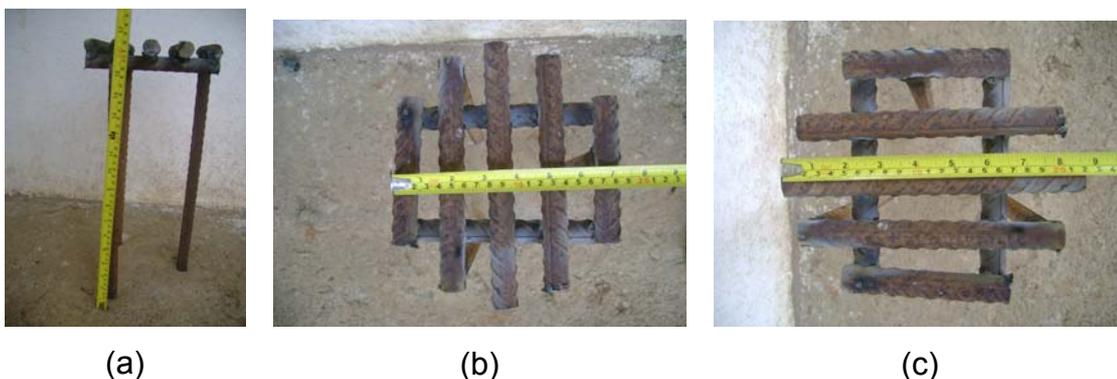


Figura 7: Detalhes da grelha: (a) altura da grelha (b) largura da grelha e (c) comprimento da grelha.

3.5. Saída dos gases do reator

Para a saída dos gases do reator para o combustor foi feito uma abertura de 0,10 m de altura e 0,30 m de comprimento, perpendicular ao combustor e paralelo ao cinzeiro. A Figura 8 mostra a abertura para a saída.



Figura 8: Abertura para saída dos gases do reator.

3.6. Cinzeiro

Para que fossem retiradas as cinzas foi feito uma abertura na parte inferior do reator, de 0,20 m de altura e 0,10 m de largura. As cinzas são depositadas por gravidade. Para evitar a entrada de ar pelo cinzeiro foi colocado um tijolo refratário e vedado com uma lã de vidro. A Figura 9 mostra o cinzeiro.



Figura 9: Vista do cinzeiro.

3.7. Combustor

O combustor é formado por: câmara de combustão, tubo metálico e aberturas para entrada de ar.

3.7.1. Câmara de Combustão

A câmara de combustão tem início logo após a saída do gás do reator, e foi revestida com tijolo refratário, tendo três entradas de ar primário na parte superior no sentido horizontal e um visor lateral no sentido vertical para melhor visualizar a chama. No centro da câmara de combustão foi colocada uma célula de queima.

Para queima dos gases na câmara de combustão foi construída uma célula de queima de 0,31 m de comprimento, 0,20 m de altura e 0,30 m de largura, feita de vergalhão de 0,02 m de diâmetro. A Figura 10 apresenta a vista superior da célula de queima dentro da câmara de combustão.



Figura 10: Vista superior da célula de queima dos gases.

Na lateral da câmara de combustão foi feito uma abertura de 0,10 m de largura e 0,10 m de altura, protegida por um vidro refratário. Através dessa abertura pode-se visualizar a chama produzida no combustor ou a chama vinda do reator e conduzida para a câmara de combustão. Na Figura 11 é mostrado o visor da chama, com a combustão do gás.



Figura 11: Visor da câmara de combustão durante um dos testes, mostrando chama vinda do reator.

3.7.2. Tubo metálico

Após a câmara de combustão foi colocado um tubo metálico de 0,40 m de diâmetro e 2 m de comprimento, que teve como função manter a queima do gás devido possíveis variações no comprimento da chama, e melhor direcionar a saída do ar quente para o ventilador. O tubo foi colocado dentro de uma caixa de alvenaria, onde foram feitas as aberturas para entrada do ar primário e do ar secundário no combustor. A Figura 12 mostra o tudo antes de ser colocado na caixa de alvenaria.



Figura 12: Vista do tubo no interior do combustor.

3.7.3. Entrada de ar primário no combustor

Para que ocorra a queima completa dos gases produzidos no reator, foi construída uma abertura para entrada de ar primário. Foram feitas três janelas tipo comporta, de 0,24 m de comprimento. A largura da janela central foi de 0,145 m e as demais 0,11 m. A Figura 13 apresenta as janelas tipo porta antes de serem fixadas no combustor.



Figura 13: Vista das comportas de entrada de ar primário no combustor, antes de ser instalada sobre o combustor.

3.7.4. Entradas de ar secundário no combustor

Para auxiliar na combustão dos gases e no controle da temperatura do ar de exaustão foram construídas duas entradas de ar nas laterais do combustor, no sentido vertical e tendo aberturas tipo comporta. As entradas

possuem 0,19 m de largura e 0,16 m de altura. A Figura 14 mostra uma das aberturas.



Figura 14: Entrada de ar secundário no combustor, tipo comporta.

3.7.5. Teto do Combustor

Para a construção do teto do combustor foram colocadas telhas apoiadas sobre as paredes do combustor para que uma laje de cimento de 0,10 m de espessura fosse construída. A Figura 15 mostra a telha sobre as paredes do combustor antes de colocar a laje de cimento, a abertura para entrada de ar primário no combustor e o tubo metálico dentro do combustor.



Figura 15: Construção da laje do combustor.

3.7.6. Sistema de Ventilação

Um ventilador centrífugo com capacidade para $20 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ foi acoplado a um motor elétrico trifásico 220 V, com potência 552 W. O eixo do

ventilador está acoplado a um mancal, que por meio de uma polia e correia é ligada ao motor elétrico. A Figura 16 mostra o sistema de ventilação.

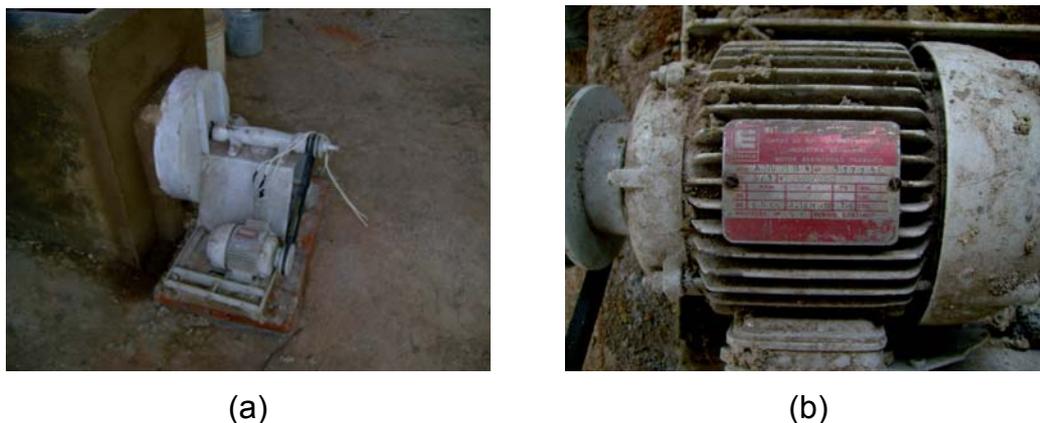


Figura 16: Vistas (a) ventilador e (b) motor.

3.7.7. Custo na construção do gaseificador

A cotação dos custos para a construção do gaseificador-combustor foram realizados no comércio da cidade de Viçosa, com exceção do inversor de frequência que foi adquirido em São Paulo. Parte do material utilizado foi reaproveitado de outras fornalhas e gaseificador montado anteriormente. Os valores referentes a mão de obra foram obtidos a partir de cotação com profissionais de Viçosa.

3.8. Combustível

3.8.1. Características do combustível

O combustível utilizado para a gaseificação foi lenha de eucalipto proveniente do setor de parques e jardins da Universidade Federal de Viçosa. A lenha selecionada teve diâmetro de $6,0 \pm 2,0$ cm. Em seguida transportada para área experimental e cortada com o auxílio de uma serra circular, em pedaços com largura de aproximadamente $4,0 \pm 2,0$ cm. Os cortes foram feitos com o auxílio de um gabarito. A Figura 17 mostra a lenha após ser cortada conforme a necessidade do projeto.



Figura 17: Vista do combustível cortado conforme a necessidade do projeto.

Algumas toras maiores, tanto no diâmetro quanto na largura, foram colocadas entre a grelha e a entrada de ar primário, antes do início da ignição. Essas toras não puderam ser colocadas depois que o sistema estava em regime permanente para não obstruir a passagem da lenha pelo reator.

3.8.2. Composição elementar

Os valores utilizados para a composição elementar da lenha de eucalipto foram os citados por VLASSOV (2001), tidos como referência, conforme Quadro 1.

3.8.3. Umidade

A determinação da umidade da lenha foi feita, conforme a norma ADTM D-3173, utilizando-se uma estufa, com circulação forçada de ar, e uma balança eletrônica com capacidade de 2,2 kg e sensibilidade de 0,01 g. Foram coletadas amostras cortadas em pequenos pedaços, e após determinadas as massas, foram colocados na estufa, a temperatura de 103 ± 3 °C, até atingirem massa constante, quando então tiveram a massa e a umidade determinada novamente.

3.8.4. Poder calorífico

Para a determinação do poder calorífico superior (PCS) da lenha de eucalipto, foram coletados 3 amostras de lenha de eucalipto em pontos diferentes do local de armazenamento, e utilizada uma bomba calorimétrica, no Laboratório de Energia da Madeira, no Departamento de Engenharia Florestal da UFV, segundo as normas ASTM D-2015-66.

Já as determinações do poder calorífico inferior (PCI) e do poder calorífico inferior úmido (PClu) foram calculadas pelas equações 2 e 3, respectivamente, utilizando-se dados da Quadro 2 citados por Vlassov (2001).

3.8.5. Granulometria

A determinação da granulométrica média da biomassa foi feita utilizando-se um paquímetro, no qual foram retiradas 10 amostras para determinação das variações tanto do diâmetro quanto do comprimento das toras, e em seguida calculadas a media.

3.9. Instrumentos e medições

3.9.1. Velocidade do Ar

A velocidade do ar foi medida na saída de exaustão e entradas de ar primário no reator e entradas de ar primário e secundário no combustor, por meio de um anemômetro de pás rotatórias, que mede velocidades de até $45,0 \text{ m s}^{-1}$, e com precisão de $\pm 0,1 \text{ m s}^{-1}$.

3.9.2. Vazão de ar

Para se determinar as vazões volumétricas de ar nas entradas do reator e combustor, e na saída do ventilador utilizou-se o valor da velocidade do ar medido nessas aberturas e suas respectivas áreas, por meio da equação 9.

$$\dot{V}_{AR} = V A \quad (9)$$

em que \dot{V}_{AR} é a vazão volumétrica de ar, $m^3 s^{-1}$.

3.9.3. Temperatura

As medidas de temperaturas foram realizadas por meio de termopares blindados do tipo K, de Cromel+Alumel, que permitiram medir temperatura no intervalo de - 50 ° a 1300 °C, com uma queda de tensão de 39,4 $\mu V \text{ } ^\circ C^{-1}$. Foram efetuadas medições de temperatura na saída do ventilador e a temperatura ambiente.

3.9.4. Umidade relativa e temperatura do ar

A determinação da umidade relativa do ar foi feita por meio de Termo-Higrômetro Digital, com resolução para temperatura de 0,01 °C e para umidade relativa 0,01 %. O medidor foi colocado a sombra e afastado do gaseificador de modo que não sofresse influência da radiação solar direta e do ar aquecido pelo sistema.

3.9.5. Inversor de frequência

O controle da velocidade do motor do ventilador foi realizado por meio de um inversor de frequência, tensão 200-240 V e 3 AC, com sensibilidade de 0,01 Hz. As frequências utilizadas, fornecidas pelo inversor, para os testes foram a partir de 10 a 60 Hz, com variação de 5 Hz.

3.9.6. Medida da potência do motor

As medidas de potência demandada pelo motor foram feitas por meio de Alicate multímetro, com precisão para corrente de 0,1 A e para tensão de 0,1 V. Para se realizar a leitura da potência, envolveu-se uma das fases com o alicate para se obter a corrente, e as outras duas fases eram usadas para

se obter a leitura da tensão. Para a determinação da potência ativa do motor foram utilizadas as frequências fornecidas pelo inversor conforme a seção 3.9.5.

3.10. Funcionamento e operação do sistema

3.10.1. Configuração das entradas de ar no combustor

Cada entrada de ar, primário e secundário, no combustor foi dividida em três partes iguais. As áreas que correspondem às configurações utilizadas para as aberturas de entrada de ar primário no combustor são apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3: Abertura das entradas de ar primário no combustor

	C0	C1	C2	C3
Área (cm ²)	0	112	224	336

O Quadro 04 apresenta as áreas que correspondem às configurações utilizadas para as aberturas de entrada de ar secundário no combustor.

Quadro 4: Abertura das entradas de ar secundário no combustor

	S0	S1	S2
Área (cm ²)	0	180	360

3.10.2. Tratamentos utilizados para as entradas de ar no combustor

Para a realização dos testes, foram feitas combinações das entradas de ar primário e secundário no combustor. Os testes foram feitos na seqüência dos tratamentos apresentados no Quadro 5, e com 3 repetições.

Quadro 5: Tratamentos utilizados para as entradas de ar primário e secundário

Tratamento	Fatorial	Área da entrada de ar no combustor (cm ²)		Área total (cm ²)
		Primário	Secundário	
1	C0 S0	-	-	-
2	C0 S1	-	180	180
3	C0 S2	-	360	360
4	C1 S0	112	-	112
5	C1 S1	112	180	292
6	C1 S2	112	360	472

Em testes preliminares não se obteve gaseificação e combustão para áreas maiores que 360 cm², de entrada de ar primário e secundário no combustor, desse modo foram utilizados apenas os tratamentos em que ocorreu gaseificação e combustão.

3.10.3. Abastecimento

Antes de se iniciar a ignição, foi colocado entre a grelha e as entradas de ar no reator, toras com diâmetros e larguras maiores daquelas usadas quando o sistema estava em regime permanente. Próximo a entrada de ar primário no reator foi colocado 0,5 kg de casca de eucalipto para auxiliar na ignição. E acima das entradas de ar primário foram colocadas toras com diâmetros de $6,0 \pm 2$ cm e larguras $4,0 \pm 2$ cm, dimensões essas que foram utilizadas quando em regime permanente. Para o início da ignição o reator foi abastecido com 10 kg de biomassa de lenha de eucalipto.

3.10.4. Ignição

Com o sistema de ventilação desligado, a ignição da chama piloto localizado na célula de combustão, foi realizado com um lança-chamas, alimentado com gás liquefeito (GLP).

Em seguida, as entradas de ar primário e secundário do combustor foram fechadas e foi acionado o motor do ventilador na máxima velocidade, com o inversor de frequência a 60 Hz. O lança-chamas foi introduzido na entrada de ar primário para dar início a combustão da biomassa, e desligado apenas no momento em que foi observado uma saída de ar sem fumaça na saída de exaustão. O tempo médio para o início da gaseificação foi cerca de 10 minutos.

3.10.5. Determinação das vazões de operação

Para a escolha das vazões de operação, as entradas de ar primário e secundário no combustor foram abertas conforme os tratamentos citados na secção 3.10.2. Para cada configuração de abertura, o valor da frequência do inversor foi diminuído até o ponto em que a vazão imposta pelo ventilador, por meio do motor, fosse suficiente para que ocorresse a produção de ar quente e limpo. A verificação do processo de combustão foi feita visualmente por meio da abertura lateral, (visor da chama) no combustor. A vazão máxima de operação para todos os testes foi sempre a mesma.

3.10.6. Calor produzido

A quantidade de calor produzido, por meio do ar quente, foi calculada pela equação 10, na diferença de temperatura ΔT , com base na vazão mássica do ar (\dot{m}_{ar}) obtida pela equação 11, a partir da vazão volumétrica do ar (\dot{V}_{ar}) e da massa específica do ar aquecido, no intervalo de temperatura considerado.

$$\dot{Q}_{ar} = \dot{m}_{AR} C_p \Delta T \quad (10)$$

em que

\dot{Q}_{ar} = calor necessário para aquecer o ar, kJ s^{-1} ;

\dot{m}_{AR} = vazão mássica de ar, kg s^{-1} ;

C_p = calor específico a pressão constante, $1,0062 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; e
 ΔT = diferença de temperatura, $^\circ\text{C}$.

O valor de C_p utilizado, por questões práticas, foi o valor do ar atmosférico, pois nas condições de pressão e temperatura de operação o ar quente de exaustão comporta-se um gás perfeito.

A vazão mássica de ar (\dot{m}_{ar}) foi calculada utilizando-se a equação 11.

$$\dot{m}_{ar} = \rho_{AR} \dot{V}_{AR} \quad (11)$$

em que

\dot{m}_{ar} = vazão mássica de ar, kg s^{-1} ;
 ρ_{AR} = massa específica média do ar, kg m^{-3} ; e
 \dot{V}_{AR} = vazão volumétrica de ar, $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$.

A massa específica média do ar aquecido foi calculada a partir da Equação 12, utilizando R_{AR} da tabela das propriedades termodinâmicas do ar, encontradas em VAN WYLEN et al. (2003).

$$\rho_{m_{AR}} = \frac{P_{atm}}{R_{AR} T_{m_{AR}}} \quad (12)$$

em que

$\rho_{m_{AR}}$ = massa específica do ar, kg m^{-3} ;
 P_{atm} = pressão atmosférica local, kN m^{-2} ;
 R_{AR} = constante universal para o ar, $\text{kN m kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$; e
 $T_{m_{AR}}$ = temperatura média do ar, K.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Propriedades avaliadas do combustível

4.1.1. Umidade

A média do percentual de umidade da lenha de eucalipto utilizada como combustível nos testes, para a primeira e segunda coleta, foram de $14,86\% \pm 0,71\%$ e $23,96\% \pm 3,13\%$ respectivamente, e a média das de todas as amostras foi de $19,41\% \pm 5,11\%$.

Como se pode observar a umidade da lenha de eucalipto variou bastante entre as duas coletas, indicando um combustível homogêneo dentro do seu grupo de coleta. Apenas uma amostra teve um percentual de umidade pouco acima de 30 %, e as demais abaixo desse valor, que é a exigência para o funcionamento do sistema.

4.1.2. Granulometria

A determinação da granulométrica do combustível foi realizada conforme seção 3.8.5. As toras de eucalipto analisadas foram escolhidas aleatoriamente dentre as armazenadas para os testes. O valor médio do diâmetro foi de $6,0 \pm 2,0$ cm e comprimento foi de $4,0 \pm 2,0$ cm.

4.1.3. Poder calorífico

Conforme laudo emitido pelo Laboratório de Painéis e Energia da Madeira do DEF/UFV, o poder calorífico superior para a amostra de lenha usada no gaseificador atingiu o valor médio de $4.771,58 \text{ kcal g}^{-1}$. Alterando-se a unidade, onde 1 cal equivale a 4,1868 joule, então o PCS da lenha de eucalipto utilizada nos testes foi equivalente a $19.977,67 \text{ kJ kg}^{-1}$ de combustível seco. Este valor está próximo dos citados na literatura Quadro 2 para a lenha de eucalipto.

4.2. Potência elétrica

4.2.1. Motor do ventilador

A medida da potência ativa para os valores de frequência do motor do ventilador foi realizada conforme seção 3.9.6, e os valores da potência ativa média em função da frequência do inversor são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6: Potência ativa média do motor do ventilador em função da frequência do inversor de frequência

Frequência (Hz)	Potência ativa média (kW)
10	0,093
15	0,121
20	0,136
25	0,142
30	0,151
35	0,165
40	0,180
45	0,200
50	0,229
55	0,270
60	0,326

De acordo com o Quadro 6 a potência ativa média do motor é linearmente proporcional a frequência fornecida pelo inversor de frequência, o que resulta em menor potência mecânica no eixo e menor vazão de ar através do ventilador. O coeficiente de determinação (R^2) calculado para a curva de tendência foi de 0,973.

4.2.2. Curva do ventilador

A vazão do ventilador foi determinada de acordo com as normas da Associação Internacional de Controle e Movimento do Ar (AMCA), para as potências ativa média do motor do ventilador, conforme a seção 4.2.1 para as frequências de 10 a 60 Hz, fornecida pelo inversor de frequência, com um

intervalo de 5 Hz. Os resultados obtidos para as vazões são apresentados nas Figura 18, Figura 19 e Figura 20.

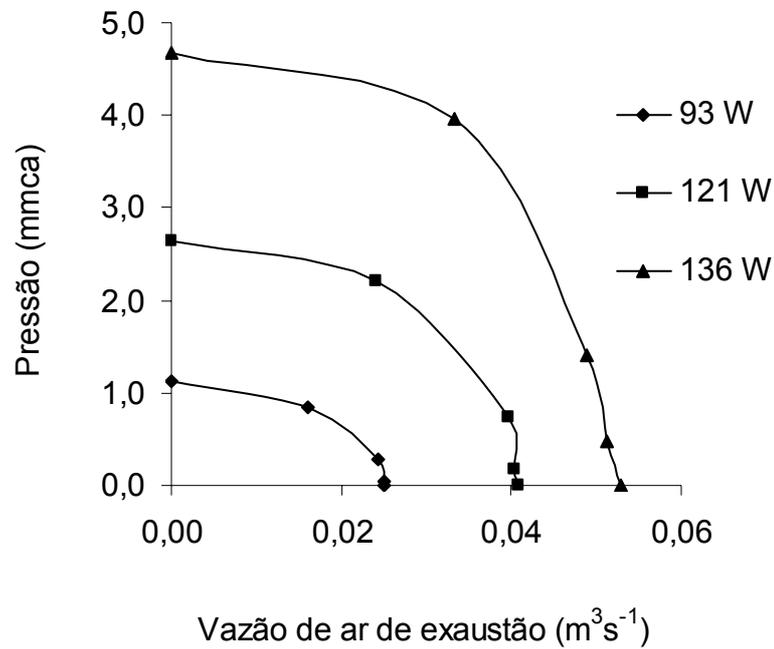


Figura 18: Curva do ventilador (pressão versus vazão volumétrica) para as potências ativa média 93, 121 e 136 W.

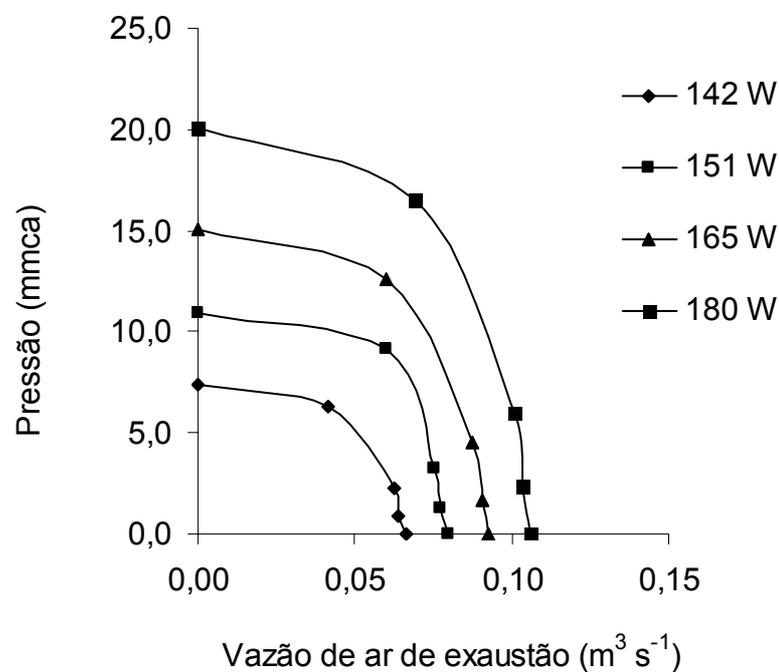


Figura 19: Curva do ventilador (pressão versus vazão volumétrica) para as potências ativa média 142, 151, 165 e 180 W.

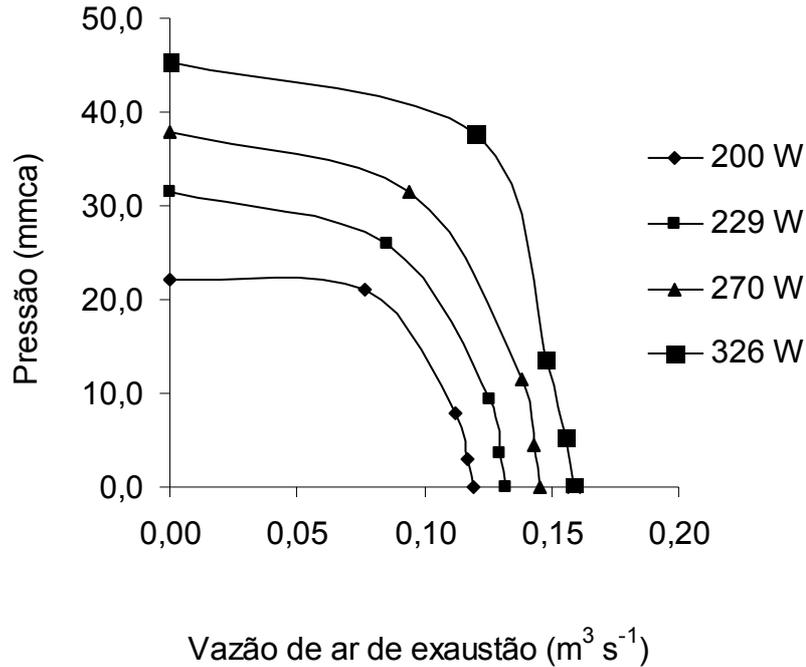


Figura 20: Curva do ventilador (pressão versus vazão volumétrica) para as potências ativa média de 200, 229, 270 e 326 W.

As Figura 18, Figura 19 e Figura 20 apresentam as curvas do ventilador (pressão versus vazão volumétrica) para todas as potências ativa média do motor usadas nos testes.

4.3. Vazão volumétrica de ar

4.3.1. Entrada de ar primário no reator

A Figura 21 apresenta a variação média da vazão volumétrica de ar através da entrada de ar no reator, em função da potência ativa média do motor. Os testes foram feitos para o reator vazio e com lenha (13,0 kg), com as entradas de ar no combustor, primária e secundária, foram mantidas fechadas. Os cálculos da vazão volumétrica foram feitos utilizando a equação 10, para o valor da área de entrada de ar e de velocidade do ar através dessas entradas.

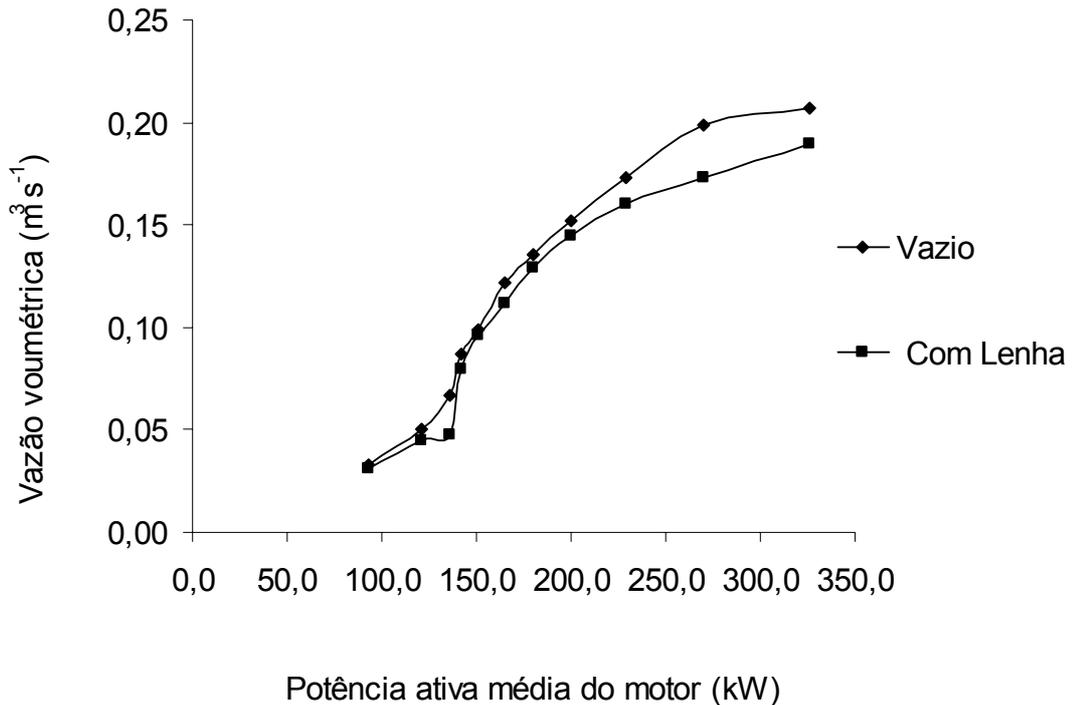


Figura 21: Vazão volumétrica de ar na entrada do reator, em função da potência ativa média do motor, para o reator vazio e com 13,0 kg de lenha sem combustão.

Na Figura 21 observa-se que o fluxo de ar através da entrada no reator varia com a presença de lenha no interior do reator. A presença da lenha diminuiu os espaços vazios, criando uma resistência ao fluxo de ar no interior do reator. Para uma mesma quantidade de lenha verificou-se nos teste que, acomodação da lenha no interior do reator ocorreu durante seu movimento do topo até a grelha, sempre de forma aleatória devido suas dimensões. E para as duas situações, com e sem lenha no interior do reator, o fluxo de ar sempre aumentou com a potência ativa do motor na entrada do reator.

4.3.2. Entrada do ar primário no combustor

A Figura 22 mostra a variação da vazão volumétrica do ar primário no combustor, para três áreas de abertura, em função da potência ativa média do motor. As áreas utilizadas nos testes foram de: 112, 224 e 336 cm², que correspondem as configurações: C1, C2 e C3, e as entradas de ar secundário no combustor foram mantidas fechadas.

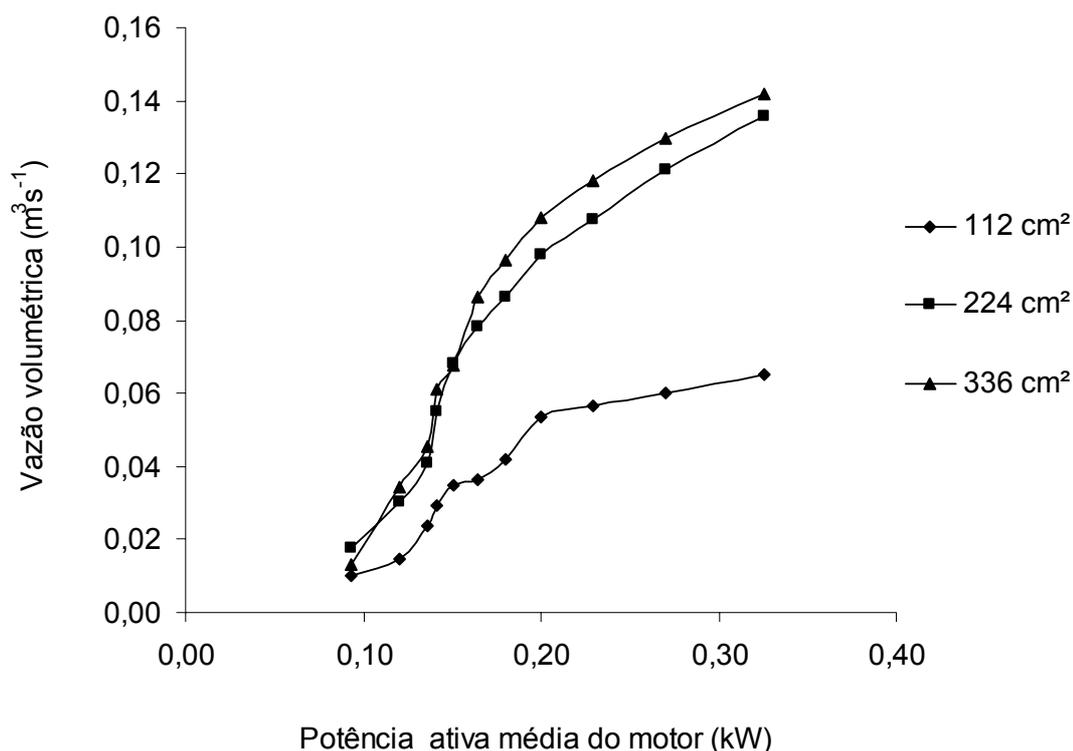


Figura 22: Vazão volumétrica do ar através da entrada de ar primário no combustor, em função da potência ativa média, para três áreas de aberturas do combustor, e entrada de ar secundário no combustor fechada.

De acordo com a Figura 22, a vazão do ar primário no combustor cresce com o aumento da potência ativa média do motor, e com a área livre da entrada de ar primário. O comportamento das vazões de ar para as configurações C2 e C3 são praticamente iguais, e semelhantes a configuração C1.

4.3.3. Vazão volumétrica do ar de exaustão

A vazão volumétrica do ar de exaustão em função da presença de lenha sem combustão no interior do reator, para diferentes valores de potência ativa do motor, é apresentada na Figura 23. Nos testes a entrada de ar no reator foi mantida totalmente aberta, e as entradas de ar primário e secundário no combustor mantidas fechadas.

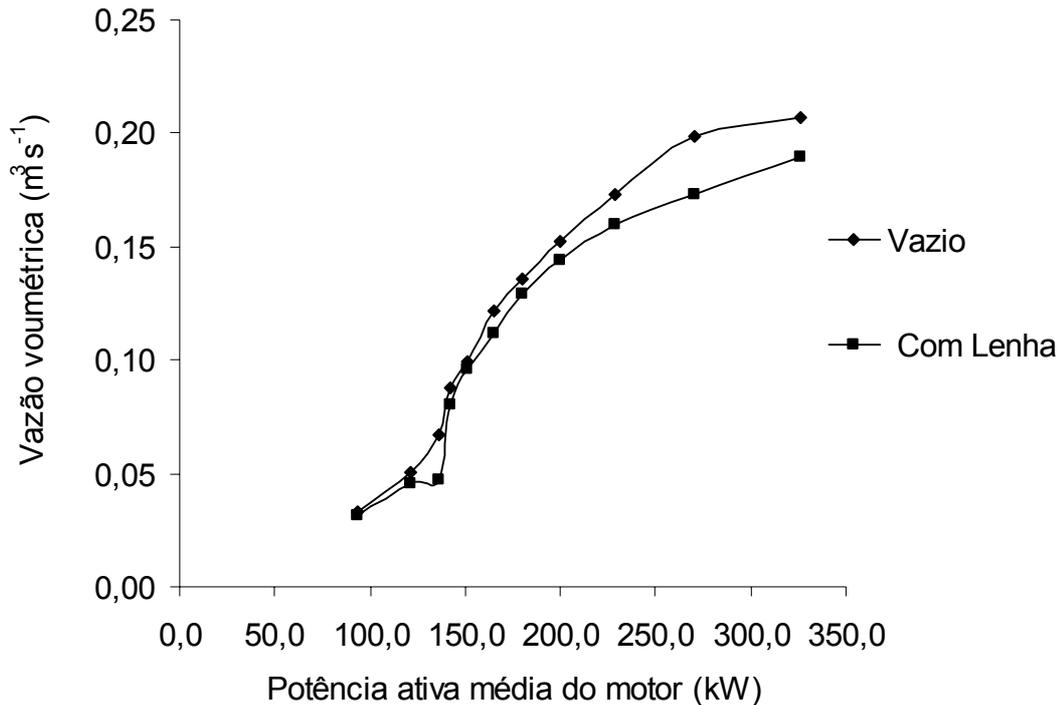


Figura 23: Vazão volumétrica do ar de exaustão em função da potência ativa média do motor, para o reator vazio e com lenha (13,0 kg), sem combustão.

Observando a Figura 23, verifica-se que a vazão volumétrica de ar de exaustão, tendo no interior do reator a presença ou não de lenha, praticamente não se alterou, entretanto era esperado que, conforme a Figura 21 ocorresse uma variação no fluxo de exaustão. A não variação do fluxo de ar nas duas situações, com e sem a presença de lenha no reator, possivelmente ocorreu devido a vazamentos de ar, através do: cinzeiro, entrada de ar primário e secundário no combustor e visor lateral da chama no combustor.

4.3.4. Vazão volumétrica de ar no reator, combustor e exaustão

A variação das vazões volumétricas de ar através das entradas no reator, combustor e saída de exaustão, durante o processo de gaseificação, para as potências ativa média de 326 W e 229 W do motor, em função da variação da área de entrada de ar no combustor, são apresentadas nas Figura 24 e Figura 25.

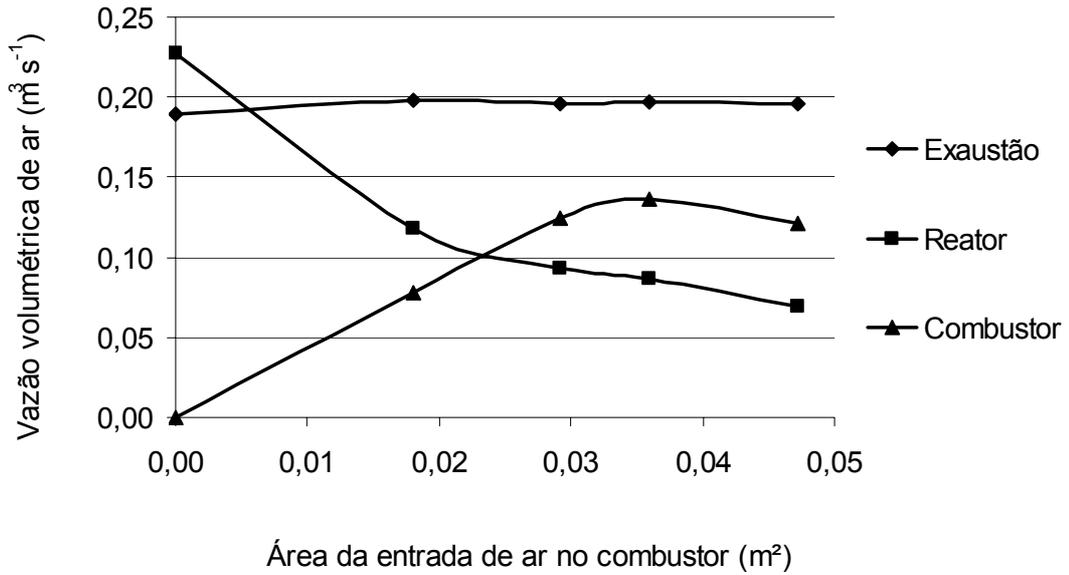


Figura 24: Vazão volumétrica de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) nas entradas de ar (reator e combustor) e exaustão, para a potência ativa média de 326 W, em função da área de entrada de ar no combustor, durante o processo de gaseificação.

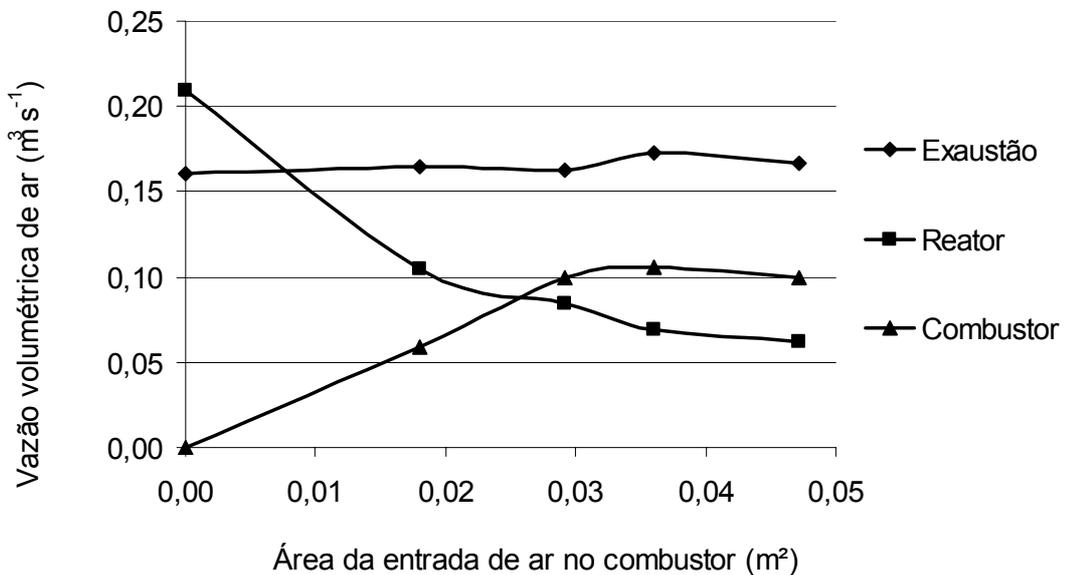


Figura 25: Vazão volumétrica de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) nas entradas de ar (reator e combustor) e exaustão, para a potência ativa média de 229 W, em função da área de entrada de ar no combustor, durante o processo de gaseificação.

A área total de entrada de ar no reator, para todos os testes, foi de 78,75 cm², e a área de entrada de ar no combustor variou, de forma crescente, de 0 a 472 cm², conforme a secção 3.10.2.

A média das vazões volumétricas do ar de exaustão, para as potências ativa média de 326 W e 229 W do motor, escolhidas aleatoriamente, foram respectivamente iguais a: $0,195 \pm 0,002 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $0,180 \pm 0,003 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. De acordo com as Figura 24 e Figura 25, para uma dada potência ativa do motor, a vazão volumétrica do ar de exaustão manteve-se praticamente constante, mesmo sendo variada a área de entrada de ar no combustor.

Observa-se que, o aumento da área de entrada de ar no combustor, implica em uma diminuição na vazão de ar através da entrada do reator, com isso ocorreu uma diminuição da temperatura do ar de exaustão, devido a entrada de maior fluxo de ar a temperatura ambiente, e menor fluxo de ar passando pelo através do reator.

As vazões volumétricas de ar no reator e combustor não alteraram significativamente a vazão volumétrica de ar de exaustão, entretanto alteraram a temperatura do mesmo.

4.4. Temperatura e energia disponível no ar de exaustão em função da vazão volumétrica do ar de exaustão

Os resultados das médias de temperatura do ar de exaustão em função da vazão volumétrica ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$), para diferentes áreas de abertura (primário e secundário) do combustor são apresentados na Figura 26. As configurações de abertura das entradas de ar primário e secundário no combustor foram: C0 S0, C1 S0, C0 S1, C1 S1, C0 S2 e C1 S2, que correspondem as áreas 0, 112, 180, 292, 360, e 472 cm², respectivamente.

A leitura da temperatura do ar de exaustão foi realizada para valores decrescentes de vazão volumétrica de ar de exaustão.

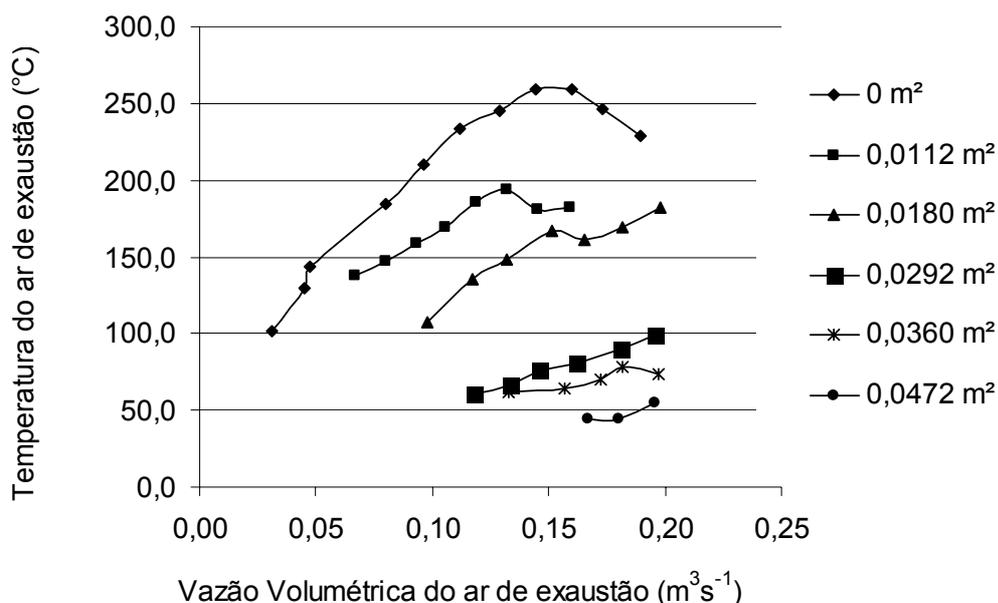


Figura 26: Temperatura (°C) do ar de exaustão em função da vazão volumétrica do ar de exaustão ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), para diferentes valores de área de abertura no combustor.

Observa-se pela Figura 26 que, em geral, a temperatura do ar de exaustão cresce com o aumento da vazão volumétrica do ar de exaustão, para todas as configurações de aberturas de entrada de ar no combustor.

Pode se observar também que, para uma determinada vazão, o aumento da abertura da entrada de ar no combustor implica em menor valor de temperatura do ar de exaustão. Isso se deve a uma redução da vazão através das entradas de ar no reator e o aumento da vazão de ar pelas entradas de ar no combustor, a temperatura ambiente, conforme apresentado nas Figura 24 e Figura 25.

Para o teste realizado com todas as entradas de ar no combustor fechadas (C0 S0), a temperatura de do ar de exaustão aumentou com o aumento da vazão volumétrica, do mesmo modo que os outros testes. Entretanto a partir da vazão volumétrica igual a $0,150 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ocorreu uma diminuição da temperatura com o aumento da vazão. Como esse teste foi o primeiro a ser realizado, e o mesmo não foi observado nos demais testes, atribuiu-se o não funcionamento do gaseificador em regime permanente durante esse período, como a possível causa de ter a redução na temperatura com maior vazão.

Os valores de energia disponível por unidade de tempo no ar de exaustão, em função da vazão volumétrica e aberturas de entrada de ar no combustor, são apresentados na Figura 27.

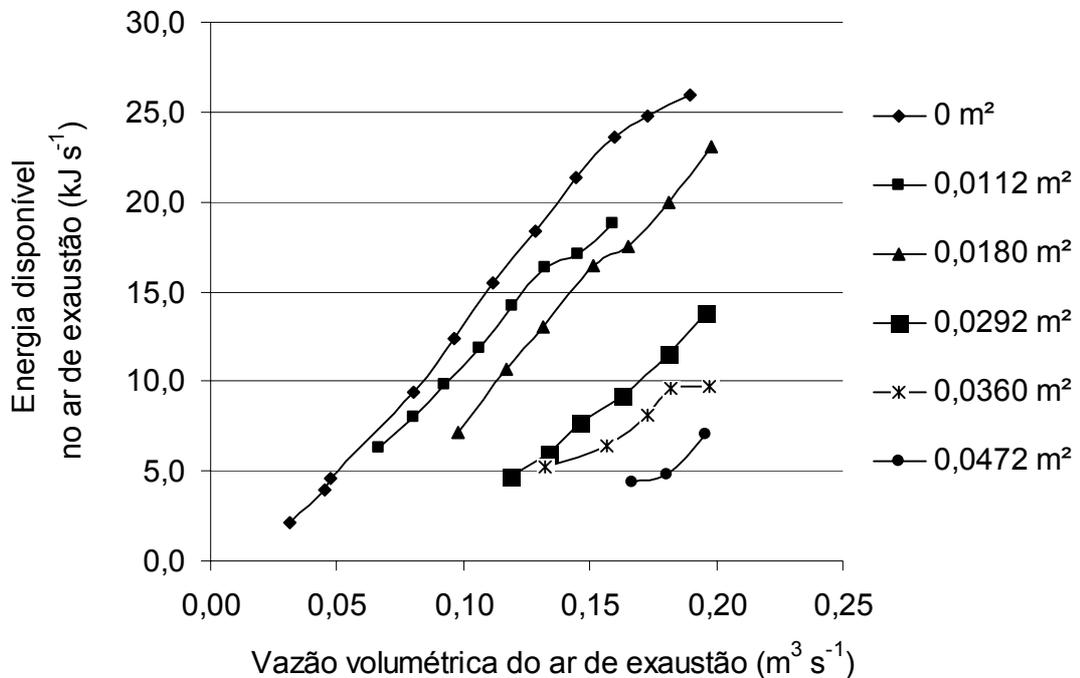


Figura 27: Energia disponível no ar de exaustão por unidade de tempo (kJ s^{-1}) em função da vazão volumétrica, para diferentes valores de área de abertura no combustor.

Observando as Figura 26 e Figura 27 percebe-se que há um valor mínimo e máximo de temperatura e energia disponível para todas as configurações de aberturas de entrada de ar no combustor. Esses valores máximos e mínimos fornecem os limites de operação do sistema, ou seja, sua capacidade de produção de ar quente.

Os valores máximos de energia disponível no ar de exaustão em função da área de abertura da entrada de ar no combustor são apresentados na Figura 28.

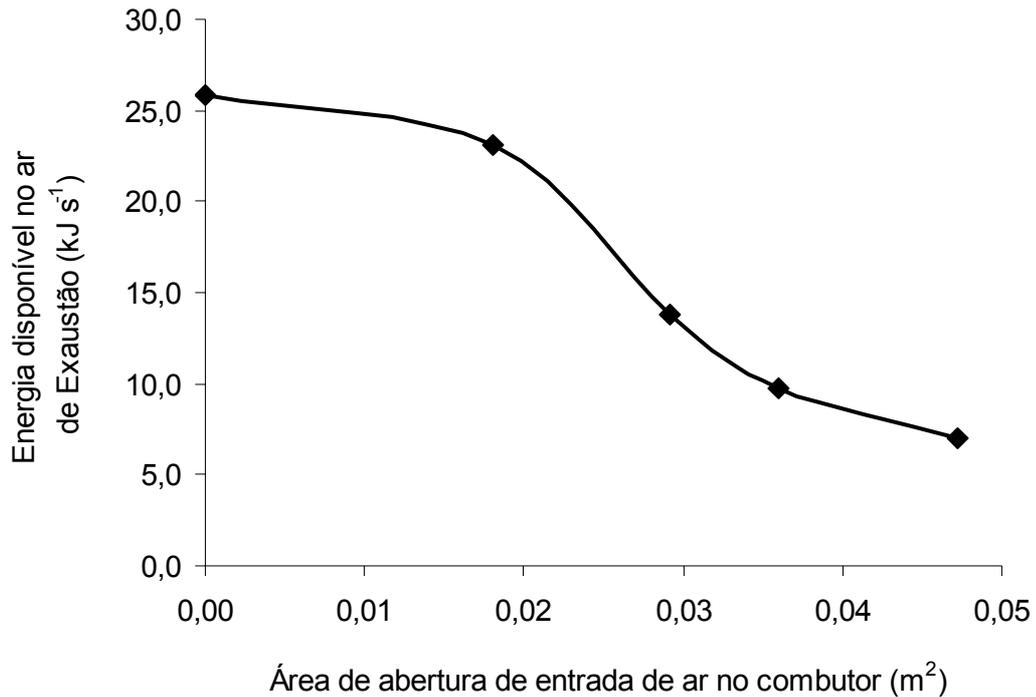


Figura 28: Valores máximos de energia disponível no ar de exaustão, em função das aberturas de entrada de ar no combustor.

Foi observado que a máxima saída de energia disponível no ar de exaustão, para todas as configurações de abertura das entradas de ar no combustor, ocorreu para uma potência do motor de 326 W, entretanto houve uma diminuição da energia disponível do ar de saída em função do aumento da área da abertura de entrada de ar no combustor. Observa-se na Figura 28 que o controle da área de entrada de ar no combustor possibilita uma variação da energia disponível do ar de saída, para uma determinada potência do motor.

4.5. Vazão volumétrica de ar em função das áreas de entrada de ar no combustor, para diferentes potências do motor

Os valores de vazão volumétrica do ar de exaustão, para uma potência ativa média do motor, em função das áreas de entrada de ar no combustor são mostrados na Figura 29.

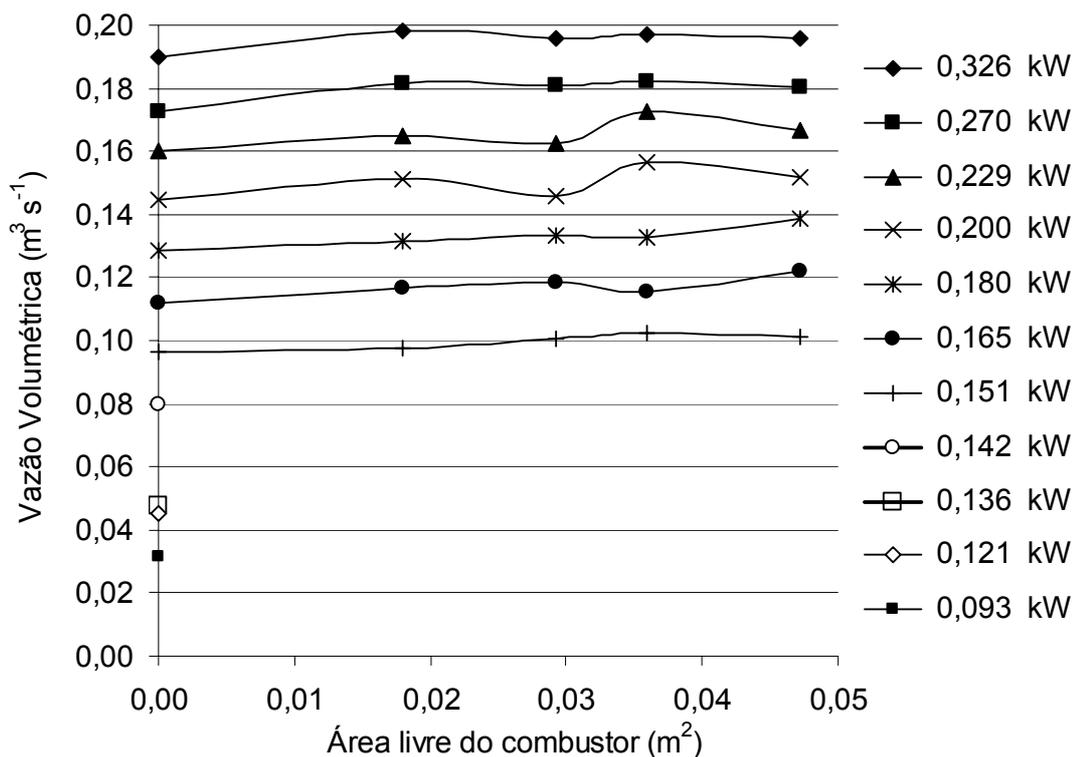


Figura 29: Vazão volumétrica de ar de exaustão em função das áreas de aberturas de entrada de ar no combustor, para diferentes valores de potência ativa média do motor.

A Figura 29 mostra que a vazão volumétrica de ar de exaustão manteve-se praticamente constante para uma mesma potência ativa do motor do ventilador. Para as sete maiores potências ativas do motor obteve-se uma maior variedade de áreas de abertura do combustor. Enquanto que para as quatro menores potências do motor, houve apenas uma configuração de abertura, que foi fechada.

4.6. Custo na Construção do gaseificador

Os Quadros 7, Quadro 8, Quadro 9, e Quadro 10 apresentam os valores correspondentes aos custos para a construção do gaseificador-combustor e a aquisição do inversor de frequência.

Quadro 7: Material necessário para a construção do gaseificador

Especificação	Unidade	Quantidade	Valor (R\$)	Valor total (R\$)
Chapa metálica nº 16 e 14 *	un	4	182,00	728,00
Tubo de ferro Ø 50 mm *	m	1	30,00	30,00
Cantoneira de ferro 1.½" *	un	2	25,00	50,00
Material de construção	un	1	200,00	200,00
Tijolo refratário *	un	300	1,50	450,00
Argamassa refratária (10 kg)	sc	10	9,90	99,00
Material elétrico	un	1	250,00	250,00
Motor elétrico *	un	1	330,00	330,00
Ventilador *	Un	1	560,00	560,00
Total				2697,00

* material reaproveitado o DEA nos Laboratórios da Área Pré-processamento de Produtos Agrícolas e de Energia do Departamento de Engenharia Agrícola da UFV.

Parte do material necessário para a construção do gaseificador-combustor foi reaproveitado de outras fornalhas e gaseificadores montados anteriormente. Isso implica em menor custo na construção a partir do aproveitamento de materiais. Os valores referentes aos custos com material para a construção do gaseificador-combustor, exceto o inversor de frequência, foram cotados no comércio da cidade de Viçosa.

Quadro 8: Serviços de terceiros e encargos diversos necessários para a construção do gaseificador

Descrição	Valor (R\$)
Mão-de-obra para acoplamento das partes (serralheiro)	550,00
Mão de obra para construção das partes em alvenaria (pedreiro)	500,00
Eletricista	150,00
Total	1200,00

Toda a mão de obra utilizada na construção do gaseificador-combustor foi cedida pela Universidade Federal de Viçosa, e os valores

referentes a esses serviços foram estimados a partir de entrevistas com profissionais de cada área, com valores típicos da cidade de viçosa.

Quadro 9: Custo com equipamento para o controle da vazão de ar

Especificação	Unidade	Quantidade	Valor (R\$)	Valor total (R\$)
Inversor de frequência	un	1	700,00	700,00
Total				700,00

Para o controle da vazão do ar foi adquirido um inversor de frequência, modelo CFW08 0040 T 2024 PSZ, tensão 200-240V e 3AC, conforme as características do de operação do motor usado no ventilador.

Quadro 10: Total dos custos para a construção do gaseificador

Descrição	Total (R\$)
Material	3397,00
Serviços de terceiros e encargos diversos	1200,00
Equipamento para o controle da vazão de ar	700,00
Total	5297,00

4.7. Ignição da combustão no reator com e sem casca de eucalipto

O processo de ignição da combustão no reator demorou cerca de 5 minutos quando colocado casca de eucalipto próximo as entradas de ar primário, e cerca de 15 minutos quando havia apenas lenha de eucalipto. Por isso em todos os testes, após essa observação foram usados durante a ignição, casca de eucalipto.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Este trabalho foi realizado nos Laboratórios da Área Pré-processamento de Produtos Agrícolas e de Energia do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

Foram realizados testes no controle da vazão de ar em um gaseificador, com reator do tipo concorrente, acoplado a uma câmara de combustão do gás produzido. Na saída do combustor foi colocado um ventilador centrífugo, com capacidade para $20 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ acionado por um motor de 552 W, 220 V trifásico, e controlado por meio de um inversor de frequência, com variação de frequência de 10 a 60 Hz, com variação de 5 Hz.

Os testes foram realizados utilizando como combustível apenas biomassa de eucalipto. A escolha do combustível teve como base a facilidade de aquisição junto a UFV. Para todos os testes a biomassa teve que ser cortada em tamanhos adequados conforme a necessidade.

Para o controle da vazão do ar foram realizados testes variando a potência do motor do ventilador e das aberturas da entrada do ar, primário e secundário, no combustor.

Os parâmetros monitorados foram: a temperatura ambiente, a temperatura do ar de exaustão, a vazão volumétrica do ar de exaustão, a vazão de energia por meio do ar quente produzido e a potência do motor do ventilador.

Com este estudo permitiu as seguintes conclusões.

- A entalpia do ar quente de exaustão pode ser controlada a um valor desejado utilizando-se um inversor de frequência, para controle da vazão do ventilador, ou por meio das aberturas de entrada de ar no combustor.
- A automação do motor do ventilador proporciona o controle da vazão de ar e economia de energia elétrica;
- O controle da vazão de ar quente apenas por meio das aberturas da entrada de ar no combustor não implica em redução na energia elétrica gasta pelo motor do ventilador;

- A taxa de gaseificação de biomassa pode ser controlada por meio da vazão de ar primário no reator, alterando as aberturas das entradas de ar no combustor ou controlando a vazão do ventilador; e
- Em locais que necessitam de funcionamento constante de um sistema de aquecimento de ar, o controle da vazão de energia por meio de um inversor de frequência é uma alternativa viável, por permitir produção de energia térmica de acordo com a demanda.

6. COMENTÁRIOS FINAIS

Para a melhoria do sistema de produção de ar quente, utilizando um gaseificador acoplado a um combustor dos gases produzidos, sugere-se para trabalhos futuros:

- Automação no sistema de reabastecimento de biomassa, visando o funcionamento do sistema em regime permanente;
- Controle automático das aberturas de entrada de ar no reator e combustor por meio da temperatura desejada do ar de saída; e
- Controle automático do motor, de acordo com a necessidade de vazão de ar.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTAFINI, C. R.; WANDER, P. R. **Análise dos Parâmetros de Funcionamento de um Gaseificador de Resíduos de Madeira.** In: IV Simpósio de Ciência e Tecnologia, 2001, Caxias do Sul. IV Simpósio de Ciência e Tecnologia. Caxias do Sul: Gráfica da Universidade de Caxias do Sul - UCS, 2001. v. 1. p. 19-19.
- DANTON, C. G.; Barros, A. C. S. A.; PESKE, S. T; MENEZES, N. L. **A secagem de sementes.** Ciência Rural, Santa Maria, v.34, n.2, p.603-608, mar/abr, 2004.
- FERNANDES, M. C., SÁNCHEZ, C. G.; ANGULO, M. B. **Custos da gaseificação de gramínea para eletrificação rural.** In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3., 2000, Campinas.
- FERREIRA, W. P. M; SILVA, J. S.; SILVA, J. N.; SOUZA, C. F. **Dimensionamento de uma fornalha a carvão vegetal para aquecimento de aviário.** Revista. Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, v.14, n.4, 258-267, Out./Dez, 2006.
- KINTO, O. T.; UDAETA, M. E. M. **Produção local de energia através da gaseificação da biomassa para geração de EE no MPP.** 2001. 105p. dissertação (Projeto de Formatura) - ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, 2001.
- LOPES, R. P.; OLIVEIRA FILHO, D.; DONZELES, S. M. L. **Controle da combustão em fornalhas a lenha.** In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3°, 2000, Campinas.
- LOPES, R. P. **Desenvolvimento de um sistema gerador de calor com opção para aquecimento direto e indireto do ar.** Viçosa: 2000. 220p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.
- LORA, E.S; HAPP, J.F.; CORTEZ, L.A.B. Caracterização e disponibilidade de biomassa. In: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.S. **Tecnologias de conversão energética da biomassa.** Manaus: EDUA/EFEI, p 5-37. 1997.
- MARTIN, S. **Desenvolvimento de um gasificador de biomassa de fluxo concorrente.** 2005. 78 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.
- MARTIN, S.; SILVA, J. N.; TINOCO, I. F. F.; VIEIRA, A. C.; ZANATTA, F. L.; MELO, L. D. **Projeto e construção de em gasificador de biomassa de fluxo concorrente.** Engenharia na Agricultura, Viçosa, MG, v.14, n.4, 238-238 249, Out./Dez, 2006.

- MURARO, W. **Avaliação do funcionamento de motor ice com gás de baixo poder calorífico proveniente da gaseificação de casca de arroz**. 2006. 86p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, 2006.
- OLIVEIRA FILHO, D. **Aquecimento de ar**. Viçosa: CENTREINAR, 1987. 16p.
- PERA, H. **Geradores de Vapor: um compêndio sobre conversão de energia com vistas a preservação ambiental**. São Paulo: Fama, 1990. 2.ed.
- SÁNCHEZ, C. G. **Tecnologia da gaseificação** (Capítulo III). Disponível em: <ftp://ftp.fem.unicamp.br/pub/IM338/Gaseif-Cap3.pdf>. Acesso em: 2 de outubro de 2007.
- SANTOS, I. S. **Reator de gaseificação de biomassa em fluxo contracorrente**. 2003. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.
- SILVA, J. N.; SAIKI, E. T.; VILARINHO, M. C. **Gasificador/combustor a cavacos de lenha na secagem de café despulpado**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3º, 2000, Campinas.
- VALE, A. T.; RESENDE, R.; GONÇALEZ, J. C.; COSTA, F. **Estimativa do consumo residencial de lenha em uma pequena comunidade rural do município de São João D’Aliana**, Ciências Florestal, dezembro, ano 13/volume 002, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, pp. 159-165. GO, 2003,
- VAN WYLEN, G. J.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2003. (Tradução da 6º edição americana).
- VELÁZQUEZ, S. M. S. G. **Perspectivas para a geração de excedentes de energia elétrica no segmento de papel e celulose com a utilização de sistemas de gaseificação/turbina a gás**. 261p. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, 2006.
- VIEIRA, A. C. **Gaseificação de briquetes de casca de eucalipto**. 2005, 83p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.
- VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. Curitiba: Editora da UFPR, 2001.
- WHATES, C. M. **Strive for clean air in your poultry house**. World Poultry, V.15, n.13, 1999. p.17-79.

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, Viçosa, 2007.

8. ANEXOS

Quadro 11: Dados relativos ao percentual de umidade da lenha, início dos testes dia 06/06/08 às 17h00min e fim dos testes dia 07/06/08 às 17h00min

Coleta	Amostra	Massa (g)					Umidade
		Recipiente	Recipiente +Madeira Úmida	Madeira Inicial	Recipiente +Madeira Seca	Madeira seca	
1°	1	6,34	22,74	16,40	20,46	14,12	13,90%
	2	6,57	35,55	28,98	31,19	24,62	15,04%
	3	6,73	33,76	27,03	29,55	22,82	15,58%
	4	6,58	30,30	23,72	26,96	20,38	14,08%
	5	6,69	33,26	26,57	28,98	22,29	16,11%
	6	5,87	31,58	25,71	27,86	21,99	14,47%
2°	7	6,20	35,92	29,72	28,20	22,00	25,98%
	8	5,97	34,94	28,97	28,11	22,14	23,58%
	9	6,16	38,69	32,53	28,88	22,72	30,16%
	10	5,77	34,66	28,89	30,02	24,25	16,06%
	11	6,72	35,90	29,18	28,56	21,84	25,15%
	12	6,07	37,70	31,63	30,47	24,40	22,86%
Média							19,41%

Quadro 12: Granulometria médias do combustível

Amostra	Diâmetro(cm)	Comprimento (cm)
1°	7,5	2,0
2°	4,5	4,5
3°	8,0	4,0
4°	6,0	4,5
5°	5,5	4,0
6°	6,5	3,5
7°	3,5	4,0
8°	7,5	3,5
9°	6,0	3,0
10°	4,5	4,0
Média	5,95 ± 1,2	3,7 ± 0,6

Quadro 13: Dados referentes as leituras da potência ativa para as freqüência de 10 a 35 Hz

Freqüência (Hz)		10	15	20	25	30	35
Potência (kW)	Leitura 1	0,0972	0,1320	0,1440	0,1444	0,1599	0,1640
	2	0,1026	0,1155	0,1332	0,1368	0,1480	0,1748
	3	0,1056	0,1406	0,1591	0,1665	0,1716	0,1794
	4	0,0936	0,0945	0,1147	0,1110	0,1312	0,1482
	5	0,1066	0,1476	0,1681	0,1760	0,2009	0,2058
	6	0,1073	0,1326	0,1521	0,1443	0,1521	0,1640
	7	0,0962	0,1190	0,1369	0,1482	0,1634	0,1739
	8	0,0740	0,0792	0,1102	0,1073	0,1080	0,1224
	9	0,1014	0,1353	0,1591	0,1804	0,1638	0,1720
	10	0,0456	0,1092	0,0840	0,1025	0,1107	0,1428
Média		0,0930	0,1206	0,1361	0,1417	0,1510	0,1647

Quadro 14: Dados referentes as leituras da potência ativa para as freqüência de 40 a 60 Hz

Freqüência (Hz)		40	45	50	55	60
Potência (kW)	Leitura 1	0,1848	0,2115	0,2385	0,2622	0,3072
	2	0,1824	0,1938	0,2378	0,2623	0,2788
	3	0,1862	0,1989	0,2028	0,2537	0,2752
	4	0,1806	0,1968	0,2173	0,2552	0,3290
	5	0,2296	0,2580	0,2816	0,3312	0,3666
	6	0,1927	0,2226	0,2322	0,2790	0,3431
	7	0,1950	0,1911	0,2337	0,2835	0,3478
	8	0,1088	0,1368	0,1800	0,2226	0,2970
	9	0,1890	0,2160	0,2491	0,3024	0,3700
	10	0,1558	0,1720	0,2162	0,2475	0,3408
Média		0,1805	0,1998	0,2289	0,2700	0,3256

Quadro 15: Dados referentes a temperatura ambiente e umidade relativa para todos os testes

Tratamento	Repetição	Média	
		Temperatura	Umidade Relativa UR (%)
C0 S0	1	24	65,34
C0 S0	2	24	70,87
C0 S0	3	24	73,73
C0 S1	1	26	65,73
C0 S1	2	23	67,39
C0 S1	3	22	70,29
C0 S2	1	22	77,00
C0 S2	2	22	77,95
C0 S2	3	23	76,60
C1 S0	1	21	65,58
C1 S0	2	22	65,46
C1 S0	3	22	64,79
C1 S1	1	20	74,05
C1 S1	2	21	76,40
C1 S1	3	21	77,44
C1 S2	1	20	77,00
C1 S2	2	19	78,74
C1 S2	3	19	79,32

Quadro 16: Dados referentes a potência ativa média e temperatura dos testes realizados com o tratamento C0 S0, com 3 repetições

Repetição	Potência Ativa		Temperatura (°C)				
	média (kW)	Secagem	Combustão	Oxidação	Combustor	Misturador	Saída
1	326	36	867	318	718	256	175
1	270	114	810	452	727	292	190
1	229	85	574	723	758	326	208
1	200	90	260	785	817	362	225
1	180	85	220	820	844	385	230
1	165	76	503	754	790	371	230
1	151	185	540	788	754	345	214
1	142	104	462	701	745	312	184
1	136	66	517	627	601	257	143
1	121	68	596	573	398	216	130
1	93	74	557	525	315	182	101
2	326	131	513	817	844	405	238
2	270	162	442	836	831	415	258
2	229	94	127	737	903	418	292
2	200	76	179	835	920	410	282
2	180	63	94	681	857	389	241
2	165	51	83	729	862	376	236
2	151	45	350	763	825	367	207
3	326	45	167	694	939	424	273
3	270	44	87	672	913	418	291
3	229	45	105	677	909	409	276
3	200	44	94	652	921	405	272
3	180	45	229	670	921	394	266
3	165	46	621	784	819	382	243
3	151	59	196	624	797	377	206

Quadro 17: Dados referentes a potência ativa média e temperatura dos testes realizados com o tratamento C0 S1, com 3 repetições

Repetição	Potência Ativa		Temperatura (°C)				
	média (kW)	Secagem	Combustão	Oxidação	Combustor	Misturador	Saída
1	326	94	528	622	555	316	199
1	270	96	214	639	497	294	160
1	229	63	390	628	462	278	160
1	200	67	317	637	426	253	201
1	180	78	344	612	376	218	175
1	165	92	205	582	359	216	173
2	326	95	254	631	395	250	193
2	270	113	188	640	395	257	204
2	229	86	320	591	350	236	186
2	200	90	411	559	331	215	168
2	180	99	629	579	296	186	147
2	165	158	773	522	275	167	132
2	151	115	707	495	252	155	122
3	326	102	888	605	341	195	155
3	270	125	955	638	294	192	144
3	229	127	954	675	286	175	137
3	200	221	700	594	278	180	131
3	180	134	844	636	262	159	122
3	165	275	743	595	212	127	101
3	151	177	747	570	194	116	93

Quadro 18: Dados referentes a potência ativa média e temperatura dos testes realizados com o tratamento C0 S2, com 3 repetições

Repetição	Potência Ativa		Temperatura (°C)				
	média (kW)	Secagem	Combustão	Oxidação	Combustor	Misturador	Saída
1	326	183	815	592	256	93	83
1	270	324	856	591	217	93	88
1	229	106	865	565	194	92	79
1	200	96	808	530	165	76	67
1	180	99	779	510	151	74	65
2	326	100	811	557	246	68	62
2	270	124	816	577	220	65	60
2	229	143	788	583	187	63	59
2	200	119	692	580	167	63	58
2	180	120	658	565	140	62	56
3	326	140	672	604	221	91	76
3	270	181	673	577	227	106	86
3	229	155	695	558	215	88	73
3	200	171	704	542	181	80	66
3	180	192	742	515	167	78	64

Quadro 19: Dados referentes a potência ativa média e temperatura dos testes realizados com o tratamento C1 S0, com 3 repetições

Repetição	Potência Ativa		Temperatura (°C)				
	média (kW)	Secagem	Combustão	Oxidação	Combustor	Misturado	Saída
1	326	66	116	621	685	205	175
1	270	42	276	706	571	199	166
1	229	59	278	687	623	212	212
1	200	48	72	672	651	234	192
1	180	51	66	677	479	226	186
1	165	73	76	684	533	221	175
1	151	83	101	654	440	191	156
1	142	72	103	590	293	162	138
2	326	65	327	729	636	230	193
2	270	83	364	726	657	237	199
2	229	98	167	753	560	232	188
2	200	99	187	743	575	222	187
2	180	121	734	674	480	197	161
2	165	142	773	694	399	179	146
2	151	139	656	655	339	168	138
3	326	216	820	749	567	220	180
3	270	266	744	797	568	215	178
3	229	185	530	737	386	215	181
3	200	166	695	724	503	207	178
3	180	188	583	708	487	195	162
3	165	195	670	666	438	185	154
3	151	249	490	606	289	177	148

Quadro 20: Dados referentes a potência ativa média e temperatura dos testes realizados com o tratamento C1 S0, com 3 repetições

Repetição	Potência Ativa		Temperatura (°C)				
	média (kW)	Secagem	Combustão	Oxidação	Combustor	Misturador	Saída
1	326	379	251	420	431	151	124
1	270	466	541	473	301	112	98
1	229	459	625	500	425	103	93
1	200	165	691	461	257	96	85
1	180	168	716	430	186	80	71
1	165	146	690	415	111	69	63
2	326	169	644	485	347	94	87
2	270	193	644	493	322	101	88
2	229	176	608	501	206	88	77
2	200	140	670	507	243	79	72
2	180	151	798	502	192	73	66
2	165	170	796	479	188	69	63
3	326	196	593	524	272	95	86
3	270	150	684	553	235	90	82
3	229	127	730	550	222	81	71
3	200	121	683	554	201	75	69
3	180	117	540	541	153	67	61
3	165	116	506	522	111	61	56

Quadro 21: Dados referentes a potência ativa média e temperatura dos testes realizados com o tratamento C1 S20, com 3 repetições

Repetição	Potência Ativa	Temperatura (°C)					
	média (kW)	Secagem	Combustão	Oxidação	Combustor	Misturador	Saída
1	326	181	690	560	189	79	60
1	270	169	695	541	194	55	50
1	229	180	648	525	124	49	45
2	326	236	615	558	246	60	54
2	270	209	390	531	116	51	46
2	229	211	416	516	101	47	42
3	326	243	565	541	107	53	49
3	270	253	282	534	88	47	43
3	229	211	637	520	80	43	42

Quadro 22: Dados referentes às áreas de entrada e saída de ar para as configuração utilizadas

Configuração	Área (m ²)			
	Entrada de ar no reator	Entrada de ar primário no combustor	Entrada de ar secundário no combustor	Saída de Exaustão
C0 S0		-	-	
C0 S1		-	0,018	
C0 S2	0,008	-	0,036	0,008
C1 S1		0,011	0,018	
C1 S2		0,011	0,036	

Quadro 23: Dados referentes a vazão volumétrica média de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) para a configuração de C0 S0

Potência Ativa Média (kW)	Vazão Volumétrica Média ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)		
	Reator	Combustor	Exaustão
326	0,227	-	0,190
270	0,223	-	0,173
229	0,210	-	0,160
200	0,194	-	0,144
180	0,170	-	0,129
165	0,155	-	0,112
151	0,126	-	0,096

Quadro 24: Dados referentes a vazão volumétrica média de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) para a configuração de C0 S1

Potência Ativa Média (kW)	Vazão Volumétrica Média ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)		
	Reator	Combustor	Exaustão
326	0,118	0,078	0,198
270	0,112	0,071	0,182
229	0,104	0,059	0,165
200	0,098	0,052	0,151
180	0,085	0,045	0,132
165	0,073	0,043	0,117
151	0,065	-	0,098

Quadro 25: Dados referentes a vazão volumétrica média de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) para a configuração de C0 S2

Potência Ativa Média (kW)	Vazão Volumétrica Média ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)		
	Reator	Combustor	Exaustão
326	0,087	0,136	0,197
270	0,073	0,116	0,182
229	0,070	0,106	0,173
200	0,062	0,091	0,157
180	0,058	0,089	0,133
165	0,049	0,083	0,115
151	0,044	0,071	0,103

Quadro 26: Dados referentes a vazão volumétrica média de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) para a configuração de C1 S1

Potência Ativa Média (kW)	Vazão Volumétrica Média ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)		
	Reator	Combustor	Exaustão
326	0,093	0,124	0,196
270	0,089	0,113	0,181
229	0,084	0,099	0,162
200	0,068	0,099	0,146
180	0,062	0,087	0,134
165	0,055	0,079	0,118
151	0,052	0,014	0,034

Quadro 27: Dados referentes a vazão volumétrica média de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) para a configuração de C1 S2

Potência Ativa Média (kW)	Vazão Volumétrica Média ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)		
	Reator	Combustor	Exaustão
326	0,069	0,121	0,196
270	0,059	0,113	0,180
229	0,062	0,100	0,167
200	0,049	0,095	0,152
180	0,045	0,079	0,139
165	0,040	0,057	0,122
151	0,033	0,045	0,101

Quadro 28: Dados referentes a vazão volumétrica média de ar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) de exaustão, utilizando as configurações C0 S0, C0 S1, C0 S2, C1 S1 e C1 S2

Potência Ativa					
média (kW)	C0 S0	C0 S1	C0 S2	C1 S1	C1 S2
326	0,190	0,198	0,197	0,196	0,196
270	0,173	0,182	0,182	0,181	0,180
229	0,160	0,165	0,173	0,162	0,167
200	0,144	0,151	0,157	0,146	0,152
180	0,129	0,132	0,133	0,134	0,139
165	0,112	0,117	0,115	0,118	0,122
151	0,096	0,098	0,103	0,034	0,101
142	0,080				
136	0,048				
121	0,045				
93	0,031				

Quadro 29: Dados referentes a vazão mássica média de ar (kg s^{-1}) para as configurações C0 S0, C0 S1, C0 S2 , C1 S1 e C1 S2

Potência Ativa					
média (kW)	C0 S0	C0 S1	C0 S2	C1 S1	C1 S2
326	0,12642	0,14525	0,19008	0,17591	0,19969
270	0,11118	0,13711	0,17323	0,16704	0,18966
229	0,10063	0,12705	0,16800	0,15364	0,17539
200	0,09061	0,11491	0,15566	0,13987	-
180	0,08296	0,10454	0,13236	0,13165	-
165	0,07396	0,09570	0,14129	0,11841	-
151	0,06649	0,08566	0,12562	-	-
142	0,05852	-	-	-	-
136	0,03817	-	-	-	-
121	0,03744	-	-	-	-
93	0,02807	-	-	-	-

Quadro 30: Dados referentes a energia média contida no ar de exaustão de ar (kJ s^{-1}) para as configurações C0 S0, C0 S1, C0 S2 , C1 S1 e C1 S2

Potência Ativa					
média (kW)	C0 S0	C0 S1	C0 S2	C1 S1	C1 S2
326	25,890	23,060	9,763	28,340	6,994
270	24,735	19,985	9,649	26,631	4,808
229	23,629	17,459	8,069	26,442	4,387
200	21,367	16,442	6,438	22,953	-
180	18,401	13,006	5,209	19,496	-
165	15,468	10,693	-	16,193	-
151	12,409	7,186	-	-	-
142	9,369	-	-	-	-
136	4,545	-	-	-	-
121	3,972	-	-	-	-
93	2,162	-	-	-	-