

UNIOESTE – UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ *CAMPUS DE*  
CASCABEL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM ENERGIA NA  
AGRICULTURA – PPGA

ARLINDO FABRÍCIO CORRÊIA

**ENERGIA SOLAR E BIOGÁS COMO FONTES ALTERNATIVAS DE  
ENERGIA PARA SISTEMAS DE SECAGEM**

CASCABEL  
PARANÁ – BRASIL  
FEVEREIRO – 2013

ARLINDO FABRÍCIO CORRÊIA

**ENERGIA SOLAR E BIOGÁS COMO FONTES ALTERNATIVAS DE  
ENERGIA PARA SISTEMAS DE SECAGEM**

Dissertação apresentada a Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura – Nível Mestrado, para obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Armin Feiden

CASCADEL  
PARANÁ – BRASIL  
FEVEREIRO – 2013

Catálogo na Publicação elaborada pela Biblioteca Universitária  
UNIOESTE/Campus de Toledo.  
Bibliotecária: Marilene de Fátima Donadel - CRB – 9/924

C824e Corrêia, Arlindo Fabrício  
Energia solar e biogás como fontes alternativas de energia para  
sistemas de secagem / Arlindo Fabrício Corrêia. -- Cascavel, PR :  
[s. n.], 2013.  
x, 40 f. : il., tabs., figs. (algumas color.) ; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Armin Feiden  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual do Oeste do  
Paraná. Campus de Cascavel. Centro de Ciências Exatas e  
Tecnológicas. Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em  
Energia na Agricultura.

1. Agricultura e energia 2. Energia solar 3. Biogás 4. Coletores  
solares 5. Secadores 6. Fontes alternativas de energia 6. Energia  
térmica 7. Plantas medicinais - Secagem 8. Materiais recicláveis I.  
Feiden, Armin, Orient. II. T.

CDD 20. ed. 631.371  
631.56

**ARLINDO FABRÍCIO CORRÊIA**

**“Energia Solar e Biogás como fontes alternativas  
de energia para sistemas de secagem”**

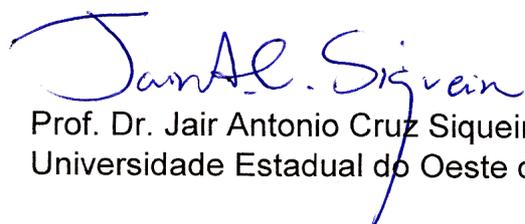
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Energia na Agricultura em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Energia na Agricultura, área de concentração Agroenergia, **aprovado** pela seguinte Banca Examinadora:

Orientador:



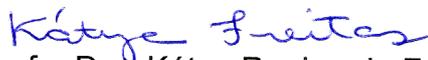
Prof. Dr. Armin Feiden

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel



Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira

Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE/Cascavel



Profa. Dra. Kátya Regina de Freitas

Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR/Cornélio Procópio

Cascavel, 26 de fevereiro de 2013.

*À minha noiva Caroline Stefany Depieri;  
À minha mãe Helena (in memoriam) e à minha avó Helena (in memoriam);*

*Dedico este trabalho.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Armin Feiden, agradeço pela oportunidade de concretização desta pesquisa, por sua confiança e principalmente por sua amizade.

Agradeço à Coordenação do Programa de Pós-graduação em Energia na Agricultura, especialmente a Vanderléia Luzia Sockmann Schmidt e a Tatiane Alves Pidorodeski.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Energia na Agricultura, pela experiência e ensinamentos compartilhados com dedicação e compromisso.

Ao Prof. Dr. Jair Antonio Cruz Siqueira e ao Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira pela disponibilidade e contribuição especial na condução dos experimentos.

Aos colegas do GEMaQ – Grupo de Pesquisas em Manejo na Aquicultura, pela amizade e pela destreza na realização de diferentes projetos de Pesquisa e Extensão.

Aos Professores e amigos Dr. Aldi Feiden, Dr. Wilson Rogério Boscolo, Dr. Altevir Signor, Dr. Arcângelo Signor, Dr. Fábio Bittencourt, Dr. Nardel Luiz Soares da Silva e Dr. Wilson João Zonin por toda contribuição e suporte para a realização do Mestrado.

Ao Instituto Água Viva de Pesquisa e Extensão em Aquicultura, Meio Ambiente e Processamento de Recursos Pesqueiros, em especial ao Presidente Douglas Jardelino de Camargo pela disponibilização de espaço e recursos para realização da pesquisa.

Às empresas Köhler Biodigestores Ltda – Bioköhler, Ivair Aquecedores e JAT Assistência Técnica, um agradecimento especial aos seus responsáveis pela oportunidade de aprendizagem conjunta.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro durante a realização do Mestrado em Energia na Agricultura.

A todos que estiveram presentes e acompanharam esse período, agradeço.

## ÍNDICE

<b>LISTA DE TABELAS .....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>vii</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>x</b>
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>1</b>
<b>2. CAPÍTULO I – AVALIAÇÃO DE UM MODELO DE COLETOR SOLAR CONSTRUÍDO COM GARRAFAS PET PARA SECAGEM DE PRODUTOS AGRÍCOLAS .....</b>	<b>3</b>
Resumo .....	3
Abstract .....	3
<b>2.1 Introdução .....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Material e Métodos .....</b>	<b>6</b>
<b>2.3 Resultados e Discussões .....</b>	<b>11</b>
<b>2.4 Conclusões .....</b>	<b>16</b>
<b>3. CAPÍTULO II – AVALIAÇÃO DO POTENCIAL CALORÍFICO DO BIOGÁS PARA O USO EM SECADORES DE PLANTAS MEDICINAIS .....</b>	<b>18</b>
Resumo .....	18
Abstract .....	18
<b>3.1 Introdução .....</b>	<b>19</b>
<b>3.2 Material e Métodos .....</b>	<b>22</b>
<b>3.3 Resultados e Discussões .....</b>	<b>28</b>
<b>3.4 Conclusões .....</b>	<b>34</b>
<b>4. CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>35</b>
<b>5. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>36</b>

## LISTA DE TABELAS

### **CAPÍTULO I – AVALIAÇÃO DE UM MODELO DE COLETOR SOLAR CONSTRUÍDO COM GARRAFAS PET PARA SECAGEM DE PRODUTOS AGRÍCOLAS**

Tabela 1 – Características dos tubos coletores quanto ao modelo, tamanho de origem da garrafa, quantidade de garrafas por tubo, área absorvedora (cm<sup>2</sup>), volume do tubo (L) e respectivo tratamento ..... 10

Tabela 2 – Características de condição climática como umidade relativa (UR%), precipitação (mm de chuva), radiação solar média diária (W.m<sup>-2</sup>) e temperatura ambiente (°C) considerando valores médios diários sobre as repetições ..... 12

Tabela 3 – Teste de médias para os valores de temperatura de saída (conjunto A-H) e a variação de temperatura (temperatura de saída menos a temperatura média ar) ..... 14

### **CAPÍTULO II – AVALIAÇÃO DO POTENCIAL CALORÍFICO DO BIOGÁS PARA O USO EM SECADORES DE PLANTAS MEDICINAIS**

Tabela 1 – Valores médios de consumo de biogás para cada tratamento e correspondente em kcal.m<sup>-3</sup> ..... 28

Tabela 2 – Dados médios de aquecimento registrado pelos sensores de temperatura junto ao sistema aquisitor de dados ..... 29

Tabela 3 – Resultados do teste de médias para dados registrados no sistema de aquecimento ..... 30

Tabela 4 – Resultados do teste de médias para dados registrados na câmara de secagem .... 31

Tabela 5 – Dados médios registrados para temperatura do ar ambiente, a 5 cm do teto do abrigo, ar aquecido na saída do queimador, ar aquecido na entrada da câmara de secagem e a diferença entre a perda de temperatura no tubo de passagem ..... 31

## LISTA DE FIGURAS

### **CAPÍTULO I – AVALIAÇÃO DE UM MODELO DE COLETOR SOLAR CONSTRUÍDO COM GARRAFAS PET PARA SECAGEM DE PRODUTOS AGRÍCOLAS**

Figura 1 – Vista frontal da composição dos tubos coletores e painel com inclinação e orientação determinados ..... 8

Figura 2 – Esquema de disposição dos tubos confeccionados com garrafas PET de 2 L (tubos de 1 a 4) e 3 L (tubos de 5 a 8) e disposição do ponto de coleta de dados identificado por letras maiúsculas representando cada termopar .....9

Figura 3 – Médias diárias de radiação solar global ( $W.m^{-2}$ ) e temperatura do ar ambiente ( $^{\circ}C$ ) para os horários entre 10:00 e 16:00 h em cada repetição ..... 13

Figura 4 – Gráficos da análise de regressão linear relacionando Área Absorvedora com Incremento de Temperatura (A) e Temperatura de Saída sob a Radiação Solar (B) ..... 15

### **CAPÍTULO II – AVALIAÇÃO DO POTENCIAL CALORÍFICO DO BIOGÁS PARA O USO EM SECADORES DE PLANTAS MEDICINAIS**

Figura 1 – Sistema de processamento estabelecido para a utilização de biogás como fonte energética e destinação final ..... 21

Figura 2 – (A) Vista parcial da Unidade experimental de produção de Biogás na Estação Experimental Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos Pessoa (UNIOESTE) e (B) Corte BB com detalhe básico de funcionamento do BioKöhler B20 ..... 23

Figura 3 – (A) Estrutura de queima de biogás, ignição e tubo de aquecimento com sistema desligado e (B) a estrutura de abrigo para o sistema em operação ..... 25

Figura 4 – Vista geral da estrutura de aquecimento câmara de secagem ..... 26

Figura 5 – Diagrama funcional do sistema de aquecimento e câmara de secagem com a disposição dos sensores de temperatura (termopares tipo J) .....	27
Figura 6 – Gráfico de correlação dos dados de consumo de biogás ( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ) pela temperatura (5 cm acima do queimador) .....	29
Figura 7 – Gráficos efeitos da análise de regressão linear relacionando (A) consumo de biogás com a (A) temperatura no centro da câmara de secagem ( $^{\circ}\text{C}$ ) e (B) temperatura da chama ( $^{\circ}\text{C}$ ) .....	32

## RESUMO

CORRÊIA, Arlindo Fabrício M. Sc., Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Janeiro – 2013. **Energia solar e biogás como fontes alternativas de energia sistemas de secagem.** Orientador: Prof. Dr. Armin Feiden.

Este trabalho tem como objetivo a avaliação da aplicação de fontes alternativas de energia em secadores de baixo custo para plantas medicinais. A abordagem principal foi realizada por meio da instalação de protótipos para o aproveitamento de energia solar e biogás na forma de energia térmica. A dissertação encontra-se no formato de capítulos. O primeiro capítulo trata do desenvolvimento de um coletor solar construído com garrafas PET para o aquecimento direto do ar. O segundo capítulo trata do desenvolvimento de um protótipo para aproveitamento da energia térmica do biogás. A justificativa para execução desta proposta é que, de um lado tem-se como necessários estudos em relação ao cultivo e processamento pós-colheita de plantas medicinais e de outro o desenvolvimento técnico/científico da utilização e implantação de fontes alternativas de energia. No Capítulo I é relatado a implantação de um protótipo de coletor solar construído com garrafas PET, embalagens *tetra pak* e papelão formando tubos coletores. Foi avaliado com tratamentos TxTay, onde T representa o tipo da garrafa ( $x = 2$  ou  $3$  L) e Ta o tamanho de cada tubo coletor ( $y = 4, 6, 8$  ou  $10$  unidades). Todos os tratamentos obtiveram aquecimento com significativa diferença sob a área absorvedora, para as condições de variação de temperatura e radiação solar global no período, portanto esse coletor solar pode ser utilizado para fins de aquecimento, para sistemas de baixa temperatura. O Capítulo II trata da construção do protótipo para a queima de biogás objetivando o aquecimento de ar e sua utilização em uma câmara de secagem, tendo como objetivo principal a obtenção de dados para a otimização de um sistema capaz de atender o fornecimento de energia térmica para a secagem de plantas medicinais, apresentando características simples quanto à construção e manutenção e, ainda, considerando a qualidade fitossanitária do produto final. A composição do biogás utilizado foi de 60,0% de metano ( $\text{CH}_4$ ) e os tratamentos realizados por meio da diferença de pressão gasoduto, originando os tratamentos T0 (controle – sem aquecimento), T1 (pressão de 1,3-2,0 bar), T2 (pressão de 2,0-2,7 bar) e T3 (pressão de 2,7-3,4). Para tanto, um aparelho de aquecimento de água a gás (GLP) foi adaptado para uso com biogás tendo os bicos injetores de gás modificados quanto à espessura adequados à 1,0 mm e a distância entre bicos injetores e a entrada do queimador anulada, diminuindo a entrada de oxigênio para assim obter a combustão do biogás e instalado uma válvula para gás liquefeito de petróleo (GLP) com vazão de  $7 \text{ kg.h}^{-1}$  e saída de pressão de 2,8 kPa. A câmara de secagem foi construída com placas de MDF (*Medium Density Fiberboard*) com espessura de 2,5 cm e internamente isolada com placas de isopor de 2,0 cm de espessura e vedada com espuma de poliuretano, perfazendo volume útil de  $0,544 \text{ m}^3$ . A velocidade do ar no tubo de passagem foi de  $1,58 \text{ m.s}^{-1}$ . A queima do biogás gerou  $3608,64 \text{ KJ.h}^{-1}$ ,  $6895,08 \text{ KJ.h}^{-1}$  e  $7603,93 \text{ KJ.h}^{-1}$  para os tratamentos T1, T2 e T3 respectivamente com aquecimento na câmara de secagem em operação nas temperaturas de  $43,05 \text{ }^\circ\text{C}$  (T1),  $52,56 \text{ }^\circ\text{C}$  (T2) e  $53,56 \text{ }^\circ\text{C}$  (T3). O sistema de aquecimento acompanhado da câmara de secagem mostraram-se eficazes para a secagem de plantas medicinais.

**Palavras-chave:** coletor solar; energia térmica; secadores.

## ABSTRACT

CORRÊIA, Arlindo Fabrício M. Sc., Western Paraná State University – UNIOESTE, January – 2013. **Solar and biogas as alternative energy sources for drying systems.** Adviser: Prof. Dr. Armin Feiden.

This study aims to evaluate the implementation of alternative energy sources in use at low cost dryers for medicinal plants. The main approach was accomplished by installing prototype for harnessing solar energy and biogas in the form of thermal energy. The dissertation is in the form of chapters, where the first deals with the development of a solar collector built with PET bottles for direct heating of the air as the development of a prototype for harnessing thermal energy from biogas is reported in the second chapter. The rationale for implementing this proposal is that one side has a need for studies regarding the cultivation and post-harvest processing of medicinal plants and the development of other scientific/technical use and deployment of alternative energy sources. In Chapter I is discussed the implementation of a prototype solar collector built with PET bottles, *tetra pak* packaging and cardboard. The treatments were as described TxTay, where T represents the type of bottle ( $x = 2$  or  $3$  L) and Ta the size of each header pipe ( $y = 4, 6, 8,$  or  $10$  units). All treatments had significant difference in heating the area absorber for the conditions of temperature and global solar irradiation period. It is concluded, therefore, that the solar collector proposed can be used for heating purposes, for systems of low temperature. Chapter II is the construction of a prototype for burning biogas aiming the air heating and its use in a drying chamber. The main objective was to obtain data for the optimization of a system able to meet the supply of thermal energy for drying medicinal plants presenting features simple in construction and maintenance, considering the phytosanitary quality of the final product. The composition of biogas was 60.0% methane ( $\text{CH}_4$ ) and the treatments performed by means of the pressure difference biogas originating the T0 (control – without heating), T1 (pressure 1.3 to 2.0 bar), T2 (pressure 2.0 to 2.7 bar) and T3 (pressure 2.7 to 3.4). A water heater gas (LPG) was adapted for use with biogas. The injectors nozzles had modified gas on the thickness of 1.0 mm with getting output. The distance between the nozzle and the inlet of the burner was annulled by decreasing the oxygen inlet to thereby obtain the burning of biogas. It was installed a valve for gas (LPG) with a flow rate of  $7 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  and output pressure of 2.8 kPa. The drying chamber was built with slabs of MDF (Medium Density Fiberboard) with a thickness of 2.5 cm and its inner part, insulated with Styrofoam plates 2.0 cm thick and seal with polyurethane plates, making useful volume of  $0.544 \text{ m}^3$ . The air velocity in the pipe passage was  $1.58 \text{ ms}^{-1}$ . The burning of biogas used  $3608.64 \text{ KJ}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $6895.08 \text{ KJ}\cdot\text{h}^{-1}$  and  $7603.93 \text{ KJ}\cdot\text{h}^{-1}$  for T1, T2 and T3 respectively generating heating in the drying chamber for operation in temperatures of  $43.05 \text{ }^\circ\text{C}$  (T1),  $52.56 \text{ }^\circ\text{C}$  (T2) and  $53.56 \text{ }^\circ\text{C}$  (T3). The heating system together with the drying chamber were effective for drying medicinal plants.

**Keywords:** solar collector; heat energy; dryers.

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A ciência tem sido responsável por grande parcela do desenvolvimento humano e tecnológico no mundo contemporâneo, destacando-se na produção de conhecimento e processos inovadores. O conhecimento científico, entretanto, necessita da aplicação prática para sua viabilidade e agregação de valor – econômico, social, ambiental – a fim de sobressair-se (GUIMARÃES, 2011). Neste caso, porém, temos de um lado uma necessidade de estudos em relação ao cultivo e processamento pós-colheita de plantas medicinais associado ao contínuo desenvolvimento técnico/prático da utilização e implantação de fontes alternativas de energia. A finalidade deste trabalho de pesquisa é investigar sobre estes dois temas, as necessidades e possibilidades com intuito de gerar conhecimento aplicável.

A importância dirigida ao uso de fitoterápicos extraído de plantas medicinais no Brasil é relatada de forma histórica e cada vez mais discutida em diferentes estudos, atraindo assim, a atenção de novos pesquisadores (MING *et al.*, 2012). Como destacam Carvalho *et al.* (2010) altos níveis de contaminação encontrados em amostras de produtos fitoterapêuticos, devido a baixa qualidade no pós-processamento de colheita de plantas medicinais têm comprometido a sua utilização e a confiabilidade de utilização por parte de consumidores, acarretando em maior risco sob o uso.

No mesmo sentido, há preocupação crescente com o desenvolvimento de novas fontes de energia a fim de substituir gradativamente a matriz energética convencional. Esta matriz consolidada por meio de combustíveis fósseis têm alto impacto ambiental e atualmente é vista como perversa, porém, impulsionou o desenvolvimento tecnológico das últimas décadas nas diferentes áreas do conhecimento. O desenvolvimento de novas fontes deve, contudo, suprir as necessidades populacionais e as atividades agroindustriais não deixando de apresentar características como baixo custo (aquisição, produção, distribuição e utilização) e a sustentabilidade dos recursos naturais.

Ainda como exemplo, os autores Nonclercq *et al.* (2009) trabalharam com o desenvolvimento de um secador solar na África e destacam que o propósito construtivo e tecnológico deve apresentar características simples e eficientes. Assim, aproveitando a disponibilidade de materiais no local e, a facilidade com a construção e manutenção, a implantação do sistema proporcionou vantagens aos agricultores envolvidos, como a otimização no acondicionamento e aumento da durabilidade de produtos a custos

relativamente baixos (NONCLERCQ *et al.*, 2009). Não há, porém, uma teoria universal para aplicação em modelos de secagem, considerando a diferentes tecnologias utilizadas e a variedade de material, assim como a disponibilidade de energia em cada região do planeta (MUJUMDAR, 2006). De acordo com esta premissa este trabalho foi fundamentado na necessidade de difundir a utilização de energias limpas, acessíveis e de tecnologia aplicável, por meio do processo investigativo e prático, tendo como objetivo o estudo e avaliação da aplicação de fontes alternativas de energia como energia solar e biogás no uso em secadores de plantas medicinais.

A dissertação é composta por dois artigos dispostos em 2 capítulos. O primeiro capítulo trata do desenvolvimento de um coletor solar construído com garrafas PET para o aquecimento direto do ar e o desenvolvimento de um protótipo para aproveitamento da energia térmica do biogás é relatado no segundo capítulo.

## 2. CAPÍTULO I

### **AVALIAÇÃO DE UM MODELO DE COLETOR SOLAR CONSTRUÍDO COM GARRAFAS PET PARA SECAGEM DE PRODUTOS AGRÍCOLAS**

**RESUMO:** O presente trabalho descreve a avaliação de um modelo de coletor solar construído com garrafas PET para aproveitamento da energia solar e geração de energia térmica. A proposta é uma alternativa para uso em secadores de baixo custo no processamento de produtos agrícolas e plantas medicinais. O objetivo principal foi avaliar a eficiência do coletor para o aquecimento direto de ar. Para isso foi implantado um protótipo de coletor solar constituído por 8 diferentes tubos coletores construídos com garrafas PET, embalagens *tetra pak* e papelão. A avaliação ocorreu durante o período de inverno onde aproveitou-se dos dias que apresentaram incidência de radiação solar maior que  $200 \text{ W.m}^{-2}$  de média diária, totalizando 16 dias de coleta de dados. Os dados de temperatura foram registrados por meio de termopares tipo J em aquisidores de dados com frequência de 5 minutos. Os tratamentos descritos como TxTay onde T representa o tipo da garrafa ( $x = 2$  ou  $3 \text{ L}$ ) e Ta o tamanho constituído por cada unidade utilizada ( $y = 4, 6, 8$  ou  $10$  unidades). Todos os tratamentos obtiveram aquecimento com significativa diferença em relação à área absorvedora, para as condições de variação de temperatura e radiação solar global. Verificou-se, portanto, que o coletor solar proposto pode ser utilizado para fins de aquecimento, para sistemas de baixa temperatura. Entretanto, há necessidade de testes para estimar a capacidade do aproveitamento líquido da energia térmica gerada.

**Palavras-chave:** energia solar, secadores, fontes alternativas.

### **EVALUATION OF A MODEL SOLAR COLLECTOR DESIGNED WITH PET BOTTLES FOR DRYING**

**ABSTRACT:** This paper presents the evaluation of a model of solar collector built with PET bottles for harnessing solar energy and thermal power generation. The proposal is an alternative for use in low cost dryers for agricultural products, medicinal herbs and processed products. The main objective was to evaluate the efficiency of the collector for direct heating of air. For that was deployed a prototype solar collector consists of 8 different collector tubes constructed with PET bottles, tetra pak packaging and cardboard. The evaluation took place during a period of 31 days during winter. The temperature data were recorded by thermocouples J into data loggers with a frequency of 5 minutes. The total period were discarded that day had an incidence of solar radiation below  $200 \text{ W.m}^{-2}$  daily average, totaling 16 days of data collection. The treatments were as described TxTay where T represents the type of bottle ( $x = 2$  or  $3 \text{ L}$ ) and Ta size per unit used ( $y = 4, 6, 8,$  or  $10$  units). All treatments reached heating with significant difference compared to the absorber area, for the conditions of temperature and global solar irradiation. It is concluded, therefore, that the solar collector proposed can be used for heating purposes, for systems of low temperature. However, there is a need for tests to estimate the ability of the liquid recovery of thermal energy generated.

**Keywords:** solar energy, dryers, alternative energy sources.

## **2.1 Introdução**

A herança de consumo ocasionada pelo modelo desenvolvimentista do século XX impulsionou a corrida por avanços na diversificação e otimização de processos geradores de energia, a fim de garantir a segurança energética necessária à manutenção e crescimento das atividades sociais, produtivas e econômicas. Mesmo que atrelada ao alto consumo de recursos naturais, inclusive combustíveis fósseis, a humanidade empenha-se em torno da adequação de alternativas viáveis ao modelo energético atual. Diante disso, pesquisadores têm alcançado êxito ao explorar “novos” recursos para atender as expectativas almejadas e assim sustentar o conforto e tecnologia gerados até o momento.

Nesse sentido mostram-se como destaque fontes variadas de energia, entre estas a eólica, solar, biomassa e ainda a hidrelétrica em formatos diferenciados e inovadores. A aceitação destas fontes está fortemente conectada ao conceito sustentável ou renovável sendo também consideradas energias limpas, que resumidamente podem ser compreendidas como “as de mínimo impacto sobre o meio ambiente” e, que ainda, podem ser produzidas em pequena escala, de maneira localizada e próxima ao ponto de consumo (LUCON & GOLDEMBERG, 2009).

A revolução energética, assim denominada por Sachs (2007), pode ser entendida como a possibilidade de utilização de uma fonte abundante sob um forte apelo econômico. Dessa maneira, as pesquisas, além de avançarem para a produção e disponibilização de combustíveis limpos, deverão demonstrar que tem capacidade de agregar uma potencial vantagem econômica para assim se sobressair.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a instalação experimental de um coletor solar construído com garrafas PET para o aquecimento direto de ar. Ademais, investigar a possibilidade de utilização em secadores de produtos agropecuários em relação ao seu potencial de aproveitamento de energia térmica atrelado aos seus aspectos construtivos.

### **2.1.1. Energia Solar e Coletores Solares**

Grandes investimentos têm sido feitos na busca de alternativas aos combustíveis fósseis, casos como fazendas eólicas e fotovoltaicas na América do norte, empreendimentos na geração distribuída de energia elétrica e produção de biocombustíveis no Brasil e, ainda, a utilização de biometano em rede para abastecimento

de veículos na Europa. Apesar de poucos, estes exemplos relatam a busca por alternativas em diferentes partes do planeta e demonstram a expressiva aplicação de tecnologia, que poderá resultar em dificuldade de acesso.

Segundo Othman *et al.* (2006) a energia solar apresenta-se como alternativa ao uso de combustíveis fósseis. No setor agroindustrial este recurso pode ser amplamente empregado, obtendo-se energia calorífica para o processamento de produtos, em especial na secagem. Contudo, não há uma ferramenta de apoio ao dimensionamento de sistemas eficazes de secagem (SANTOS *et al.*, 2005). Uma das apostas é a popularização dos sistemas para aquecimento de água, domiciliares e empresariais, como o aquecimento para hotéis, lavanderias e indústrias. Os pesquisadores El-Sebaii & Shalaby (2012) afirmam que sendo o componente mais importante do sistema de secagem solar, o aquecedor de ar – coletor solar – quando melhorado no aspecto desempenho melhora a eficiência do sistema, otimizando espaço, tempo e necessidade energética.

A utilização de coletores é antiga, de fácil construção e utiliza-se de uma pequena quantidade de recursos, agregando uma vasta diversidade de materiais (SANTOS & NASCIMENTO FILHO, 2002). Neste cenário desponta um caso alternativo que se destaca por sua eficiência e simplicidade, com a utilização de material reciclado para a construção de um sistema para aquecimento de água eficiente. Relatos de sucesso são facilmente encontrados, assim como relatado por Basso (2008) e Nogueira & Domingues (2007), onde apresentam que a melhoria da tecnologia é obtida por meio da popularização de sistemas convencionais e alternativos, e aprimorar sua utilização demonstra um impacto positivo na matriz energética, já que atenuam outros processos, como exemplo na diminuição no consumo de eletricidade.

Palz (1995, p. 153) relata que, além da agricultura a indústria também necessita dispor “enormes quantidades de energia para a secagem”. Assim, o emprego da energia solar torna-se uma alternativa para diferentes tipos de produtos. Porém, Silva *et al.* (2000, p. 177) ressaltam que a falta de regularidade da radiação solar é um empecilho para a adoção e difusão da energia solar, devido há “fatores que impedem coletar e usar eficientemente o total de energia incidente” e ainda que a utilização em sistemas que necessitem baixas temperaturas é de grande potencial. Ainda Santos & Nascimento Filho (2002) concordam que a energia solar pode ser empregada para secagem de grãos, atividades de conforto térmico e germinação de sementes.

Tyagi *et al.* (2012) concluíram em seu trabalho que diferentes pesquisas tem sido

conduzidas em nível mundial sobre a utilização de secadores solares e afirmam que esta é uma alternativa considerada adequada para a secagem de produtos agrícolas. Ekechukwu & Norton (1999) afirmam que a adoção da secagem ao sol por agricultores em países em desenvolvimento apresenta limitações que acarretam perdas de produtos por variados efeitos. Essas perdas podem ser contidas com a utilização de secadores solares ou híbridos.

Para Cometta (2000), a utilização da energia solar deve contemplar a construção de um coletor solar contendo chapa transparente e absorvedora, tubo de ar e isolante térmico com fluxo de ar. Em secadores solares indiretos a radiação solar não incide diretamente sobre o material a ser processado, sendo, então, o ar aquecido em coletores e conduzido para a câmara de secagem (SHARMA et al., 2009).

Para exemplificar, Fudholi *et al.* (2010) explica que a secagem de chá-verde (*Camellia sinensis*) tem sido realizada se utilizando de secador solar utilizando-se de temperaturas em torno de 50 °C. Também segundo Janjai & Tung (2005) a redução de perdas, a melhoria da qualidade final do produto e o custo de investimento são critérios importantes a serem considerados quanto a adoção de secadores solares, considerando que um grande número de equipamentos não oferecem essas características satisfatoriamente.

## 2.2. Material e Métodos

O protótipo foi instalado nas dependências do Projeto CASA (Centro de Análises de Sistemas Alternativos de Energia) no *Campus* de Cascavel da UNIOESTE – Universidade Estadual do Oeste do Paraná (latitude 24°59'22" S e longitude 53°26'59" W). Para compreensão das condições climáticas utilizou-se da descrição de Caviglione *et al.* (2000), de clima local subtropical – Cfa<sup>1</sup>, com características de inverno frio (temperatura média no mês mais frio inferior a 18 °C – mesotérmico) com geadas pouco frequentes e verões quentes (temperatura média no mês mais quente acima de 22 °C) apresentando, ainda, precipitação média anual na faixa entre 1800 e 2000 mm.

Para montagem do experimento construiu-se um painel com chapas de compensados de madeira laminada em dimensões de 2,00 m por 2,00 m no local. A bancada experimental foi isolada em sua superfície com chapas de isopor com espessura de 2,00 cm. Para determinar a inclinação utilizou-se do conceito aplicado para a

---

1 De acordo com a classificação de Köeppen (1948).

orientação de sistemas fotovoltaicos descrito pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CRESESB *et al.* (2004), que orienta a utilização do ângulo adequado de acordo com a latitude do local acrescido de  $\pm 10^\circ$  (dependendo da estação do ano) para melhor aproveitamento da radiação solar. Obtêm-se assim como base a latitude local (-24,2892) acrescido de  $10^\circ$  para o período de inverno, e, de modo aproximado, o painel totaliza o ângulo de  $35^\circ$  ( $24,2892 + 10 = 34,2892$ ) direcionado à orientação Norte.

Um conjunto de coletores individuais foi depositado nesta bancada, durante o período de testes e registro de dados. Os coletores sob forma de protótipo não foram utilizados para a implantação de sistemas de secagem, porém a disposição e formato dos mesmos subsidiaram uma base para a efetiva construção de modelos funcionais. Desse modo, 8 tubos foram confeccionados com garrafas PET em dois modelos e quatro tamanhos. Os dois modelos diferenciam-se quanto ao tamanho interno da garrafa, lembrando que a escolha destas tem por características principais um material que apresentasse o mínimo de deformações em seu desenho e mantendo sua forma reta e sem ondulações. Assim os modelos se diferenciam na origem das garrafas (2 L e 3 L).

Quanto ao tamanho dos tubos coletores, buscou-se o melhor aproveitamento da garrafa sobre o aspecto construtivo, criando um modelo de tubo com condições plenas de receber a radiação solar e formar o efeito estufa adequado. Para a confecção dos tubos foi construído um molde com 18 cm em tubo de PVC de 100 mm, possibilitando que todas as garrafas utilizadas correspondessem ao mesmo tamanho, em relação ao corte da altura para realização das conexões. Na realização do corte, cada garrafa foi introduzida no molde, e com um estilete retiradas suas extremidades (base e gargalo).

Na base de cada garrafa há uma área onde o formato apresenta o diâmetro ligeiramente maior, possibilitando o seu aproveitamento para realização do encaixe em forma de tubos. Com relação à montagem, as duas extremidades de cada tubo foram dispostas mantendo-se o gargalo das garrafas, com a finalidade de melhor conduzir o processo experimental e dar suporte para a leitura de dados captados por sensores de temperatura, sobre o aspecto de entrada e saída de ar. Para conectar cada garrafa e transformá-las em um único tubo utilizou-se de cola de silicone para a colagem e vedação.

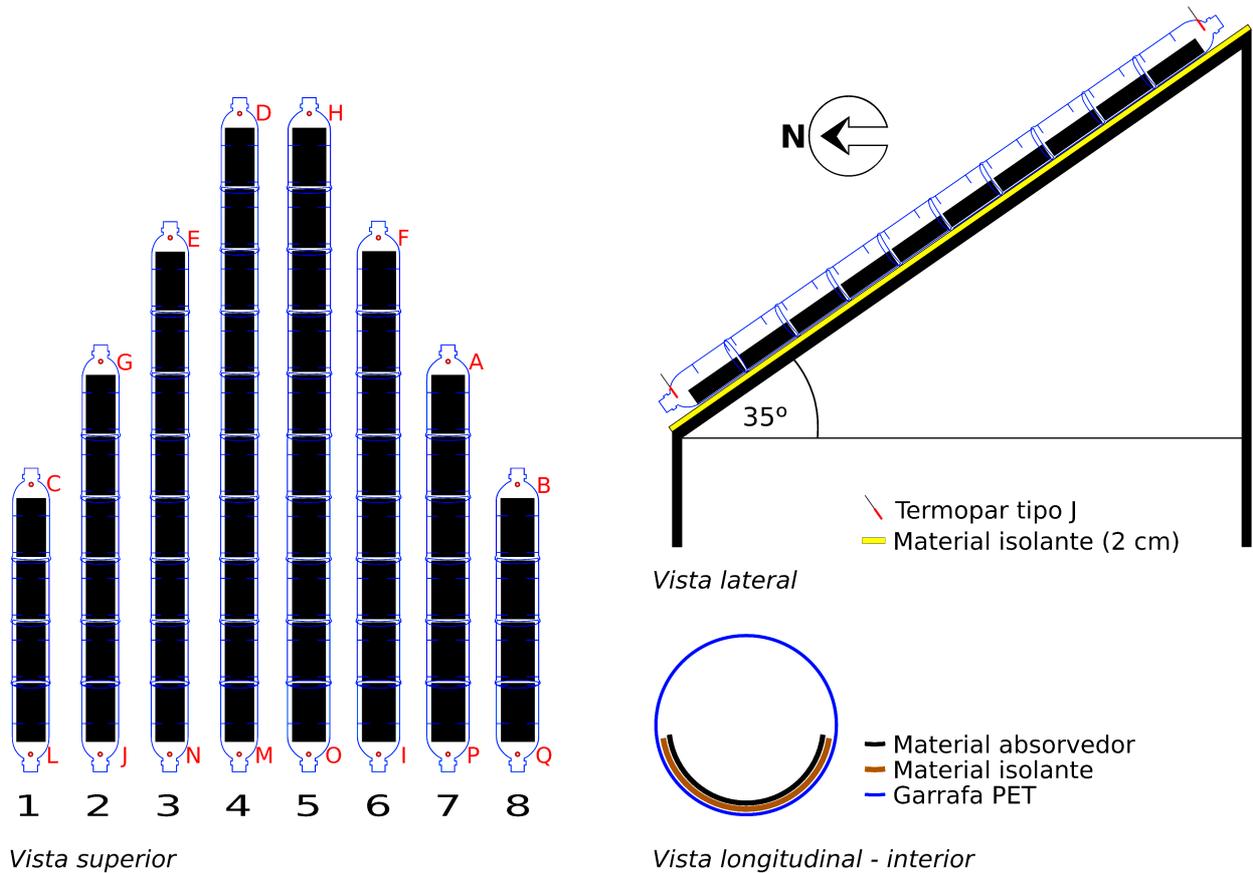
Basicamente, os tubos foram moldados contendo um número total de 4, 6, 8 e 10 garrafas por tubo, para cada um dos modelos propostos. Na Figura 1 é possível visualizar os tubos coletores instalados sobre o painel, assim como a orientação e inclinação deste na área de estudo.



**Figura 1 – Vista frontal da composição dos tubos coletores e painel com inclinação e orientação determinados.**

Optou-se pela embalagem cartonada *tetra pak*, com capacidade de 1 litro, como material absorvedor devido sua fácil disponibilidade. Para sua utilização foi necessário lavar, secar e recortar com as dimensões de 15,00 cm por 20,00 cm, aplicando-se ainda uma camada de tinta automotiva líquida de cor preto fosco, uniformemente em toda sua extensão e ambas as faces.

Para evitar comprometimento da vedação e danos ao material plástico dos tubos foi necessário isolar seu interior, devido ao alto aquecimento do material absorvedor. Esta proteção foi alocada entre o material absorvedor e o local de contato com o PET confeccionada com uma camada de papelão, por toda a extensão de contato dos dois modelos de tubo. O papelão foi aproveitado por ser um material reciclável e de grande disponibilidade apresentando função isolante eficiente. O esquema de disposição aleatória dos sensores de temperatura (blocos A-H e I-Q) está representado em letras maiúsculas na Figura 2, assim como os aspectos construtivos da confecção no interior dos tubos e a orientação e inclinação do painel.



**Figura 2 – Esquema de disposição dos tubos confeccionados com garrafas PET de 2 L (tubos de 1 a 4) e 3 L (tubos de 5 a 8) e disposição do ponto de coleta de dados com identificado por letras maiúsculas representando cada termopar.**

Para avaliação da temperatura foram inseridos dois termopares tipo J em cada tubo coletor, com cabo padrão de 1,50 m e extensão de 6,00 m de cabo PP de 1,50 mm de espessura. Os conjuntos de termopares foram montados e cada um conectado ao sistema de aquisição de dados. Estes foram identificados com letras (de A a H para o primeiro conjunto e de I à Q para o segundo) e programados para registro dos dados de temperatura, em °C, a cada 5 minutos. O sistema de aquisição de dados utilizado foi modelo NOVUS FIELDLOGGER – 2 aparelhos com capacidade de 512 kb em 8 canais analógicos de entrada cada, totalizando 16 sensores termopares alocados ao protótipo coletor, sendo 2 termopares para cada tubo (Entrada e Saída).

Para correção dos dados coletados foi realizada a calibração de todos os termopares. O método utilizado foi alocar os termopares em temperatura conhecida próxima à 0 °C e posteriormente em água fervente (considerando para a altitude local a água ferve em temperatura de 98 °C). Foram dispostos cada conjunto (A-H e I-Q) em um compartimento contendo 5 L de água e 4 kg de gelo mantendo-se a temperatura monitorada por meio de um leitor multiparâmetro portátil modelo HI 9828 da marca

HANNA e os dados obtidos no aquisitor simultaneamente foram anotados com intervalo de 5 minutos em dois momentos. O mesmo procedimento foi realizado deixando os termopares em água fervente, considerando assim a temperatura da água em 98 °C, de acordo com a altitude local. A correção das temperaturas individualizadas foi efetuada em planilha eletrônica por meio de uma fórmula de conversão da temperatura lida para a temperatura corrigida.

Os modelos de tubos coletores são apresentados na Tabela 1, assim como os dados que descrevem os tratamentos, como o tamanho de origem da garrafa PET, a quantidade de garrafas por tubo confeccionado, a área absorvedora útil (cm<sup>2</sup>) e o volume do tubo (L).

**Tabela 1 – Características dos tubos coletores quanto ao modelo, tamanho de origem da garrafa, quantidade de garrafas por tubo, área absorvedora (cm<sup>2</sup>), volume do tubo (L) e respectivo tratamento**

Modelo	Tamanho de origem da garrafa	Quantidade de garrafas por tubo	Área Absorvedora (cm <sup>2</sup> )	Volume do Tubo (L)	Tratamento
I	2 Litros	4	756	6,23	<b>T2Ta4</b>
		6	1134	9,35	<b>T2Ta6</b>
		8	1512	12,46	<b>T2Ta8</b>
		10	1890	15,59	<b>T2Ta10</b>
II	3 Litros	4	864	8,14	<b>T3Ta4</b>
		6	1296	12,21	<b>T3Ta6</b>
		8	1728	16,29	<b>T3Ta8</b>
		10	2160	20,36	<b>T3Ta10</b>

O período de coleta de dados foi de 15 de junho à 16 de julho de 2012, sendo a avaliação realizada nos dias que apresentaram condições mínimas de aquecimento. A coleta de dados dos aquisitores foi realizada semanalmente, utilizando-se o software configurador FIELDLOGGER versão 1.2.2. Juntamente às coletas foram verificadas todas as conexões de cabos e as condições físicas dos tubos e termopares na busca por rompimentos nas conexões ou deformações dos tubos coletores e rompimento de cabos dos sensores de temperatura. As informações referentes à temperatura ambiente do ar, umidade relativa, radiação solar global foram obtidas da estação meteorológica HOBO U30 Station Wi-fi, instalada à 204 metros em direção leste-nordeste do experimento.

Verificou-se a capacidade de aquecimento, de cada tubo individualmente no período experimental sem nenhum sistema de ventilação forçada. Para orientar a análise

estatística cada tubo foi organizado como um tratamento e os dias como repetição. Os tratamentos constituíram-se como TxTay sendo: T para o tipo de garrafa ( $x = 2$  ou 3 litros) e Ta para tamanho ( $y = 4, 6, 8$  ou 10 unidades). O período de análise constituiu-se pelos dias em que a radiação global foi suficiente para gerar aquecimento nos tubos coletores, entre os horários de 10:00 e 16:00 h. Esse intervalo de horários foi tomado como base por apresentar a melhor condição para a época, que se apresenta como um dos períodos de menor incidência de radiação solar e menor temperatura do ar (período entre final do outono e início do inverno). O intervalo de horários justifica-se por corresponder ao de menor intensidade de nevoeiros, maior incidência de radiação solar global e por não apresentar obstruções físicas (sombras) à captação da radiação solar disponível.

Tomou-se como principal resposta às condições climáticas e estruturais do tubo coletor os dados médios de variação da temperatura passada pelos termopares. Esta variação é calculada com base nas médias diárias do conjunto A-H, subtraindo-se a temperatura externa registrada pela estação meteorológica. Os dados referentes ao conjunto I-Q de termopares não foram utilizados na análise pois sofreram interferência interna no tubo conforme o aquecimento do mesmo forçava a efetivação do efeito estufa e assim desconsiderados como temperatura de entrada.

A leitura e análise dos resultados foi elaborada utilizando planilha eletrônica e o software estatístico R (versão 1.8.1) em interface gráfica R-Commander, aplicado por meio de análise de variância, teste de médias e regressão linear (R Core Team, 2013).

### **2.3. Resultados e Discussão**

Dentre o período total de experimento uma quantidade de dias foi cortada da coleta de dados por não apresentar condições mínimas de aquecimento dos tubos coletores, como dias chuvosos e de alta nebulosidade. Estas condições foram padronizadas para  $250 \text{ W.m}^{-2}$  de média durante o horário de coleta de dados, independente da temperatura diária. Após o descarte, 16 dias foram utilizados como período de coleta de dados.

Na Tabela 2 são apresentados os dados para as condições climáticas registrados pela estação meteorológica HOBO U30 Station Wi-Fi, referentes assim à data correspondente às repetições, sendo a umidade relativa (UR %), a precipitação diária (mm), radiação solar média ( $\text{W.m}^{-2}$ ) no período entre as 10:00 e 16:00 h e a temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ).

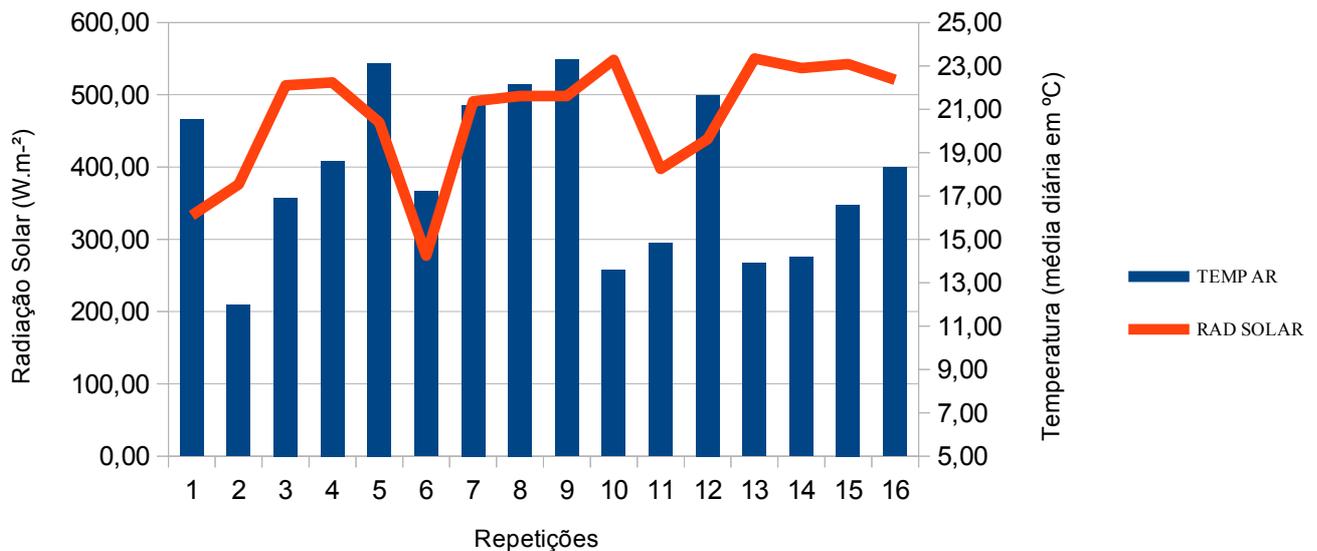
**Tabela 2 – Características de condição climática como umidade relativa (UR%), precipitação (mm de chuva), radiação solar média diária ( $W.m^{-2}$ )\* e temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ) considerando valores médios diários sobre as repetições**

Repetição	Data	UR (%)	Precipitação (mm)	Radiação Solar Média ( $W.m^{-2}$ )*	Temperatura Ambiente ( $^{\circ}C$ )
1	16/06	86	0,0	332,93	18
2	22/06	94	5,1	375,93	11
3	23/06	81	0,0	512,85	13
4	24/06	75	0,0	517,15	15
5	25/06	68	0,0	461,90	18
6	26/06	75	0,0	277,47	16
7	27/06	79	0,0	490,97	18
8	28/06	77	0,0	498,11	18
9	29/06	74	0,0	498,44	19
10	08/07	79	0,0	548,30	9
11	09/07	81	0,0	397,48	12
12	10/07	77	0,0	438,49	18
13	12/07	73	0,0	550,32	12
14	13/07	62	0,0	537,08	11
15	14/07	54	0,0	542,55	13
16	15/07	63	0,0	520,90	14
Média		74,88	-	468,80*	14,69

\* Durante os horários entre as 10:00 e 16:00 h.

A condição climatológica apresentada relata um inverno típico para a região no período experimental. Dessa maneira percebe-se a relação entre a descrição de clima subtropical, com temperaturas médias diárias inferiores a  $18^{\circ}C$ , com mínima de  $9^{\circ}C$  e máxima de  $19^{\circ}C$ . A umidade relativa do ar UR manteve-se em torno de 74,88  $^{\circ}C$  foi registrado precipitação em apenas 1 dia de coleta de dados, totalizando 5,1 mm de chuva, porém, não incidente no horário de coleta de dados (entre 10:00 e 16:00 h).

O cruzamento de dados de radiação solar global registrada e temperatura média do ar durante o horário de coleta é apresentado na Figura 3.



**Figura 3 – Médias diárias de radiação solar global (W.m<sup>-2</sup>) e temperatura do ar ambiente (°C) para os horários entre 10:00 e 16:00 h em cada repetição.**

As médias de temperatura observadas mantiveram-se entre 12,00 °C (repetição 2) e 23,50 °C (repetição 7) enquanto a radiação solar global média registrada foi de 468,80 W.m<sup>-2</sup>, alcançando o pico máximo em 922,00 W.m<sup>-2</sup> (repetição 2). As variações na radiação solar foram causadas pela presença ocasional de nebulosidade no local. O período manteve-se com inverno típico para a região apresentando intervalos com dias frios e quentes e um total de 5 dias chuvosos e 4 dias em que a radiação solar média no período de coleta de dados foi insuficiente (<250,00 W.m<sup>-2</sup>).

Um aspecto de grande interesse técnico relaciona-se à radiação solar, já que nos períodos de maior valor diário deste item o aquecimento manteve-se em maior elevação. A variação diária pode ser visualizada como uma das problemáticas quando se trata da utilização de coletores solares, porém, deverá sempre ser considerada no dimensionamento deste tipo de projeto.

Na Tabela 3 são descritos dados referentes as temperaturas médias dos termopares (conjunto A-H) em cada tratamento, as temperaturas máximas alcançadas, a variação de temperatura média e análise de variância.

**Tabela 3 – Teste de médias para os valores da temperatura de saída (conjunto A-H) e incremento de temperatura (temperatura de saída menos a temperatura média ar)**

Tratamento	Área Absorvedora (cm <sup>2</sup> )	Volume (L)	Temperatura de Saída			Incremento de Temperatura	
			Média °C	Máxima °C	Desvio Padrão	Média °C	Desvio Padrão
T2Ta4	756	6,23	29,95 d*	38,53	7,86	7,94 c	4,90
T2Ta6	1134	9,35	32,78 bcd	47,96	4,58	14,77 bcd	7,42
T2Ta8	1512	12,46	36,64 ab	51,69	7,40	18,63 ab	8,11
T2Ta10	1890	15,59	38,62 ac	52,52	7,86	20,62 ad	8,54
T3Ta4	864	8,14	30,66 bd	46,05	7,57	12,65 bcd	6,57
T3Ta6	1296	12,21	29,96 bd	45,51	5,90	11,95 bc	7,70
T3Ta8	1728	16,29	35,11 ab	50,32	7,07	17,10 ab	7,89
T3Ta10	2160	20,36	42,36 a	57,34	7,57	24,35 a	8,21
P>0,001	2,00 <sup>-16</sup>	-	2,26 <sup>-9</sup>	-	-	8,13 <sup>-8</sup>	-

\* Diferentes letras na coluna correspondem ao Teste de Tukey à 5% de significância.

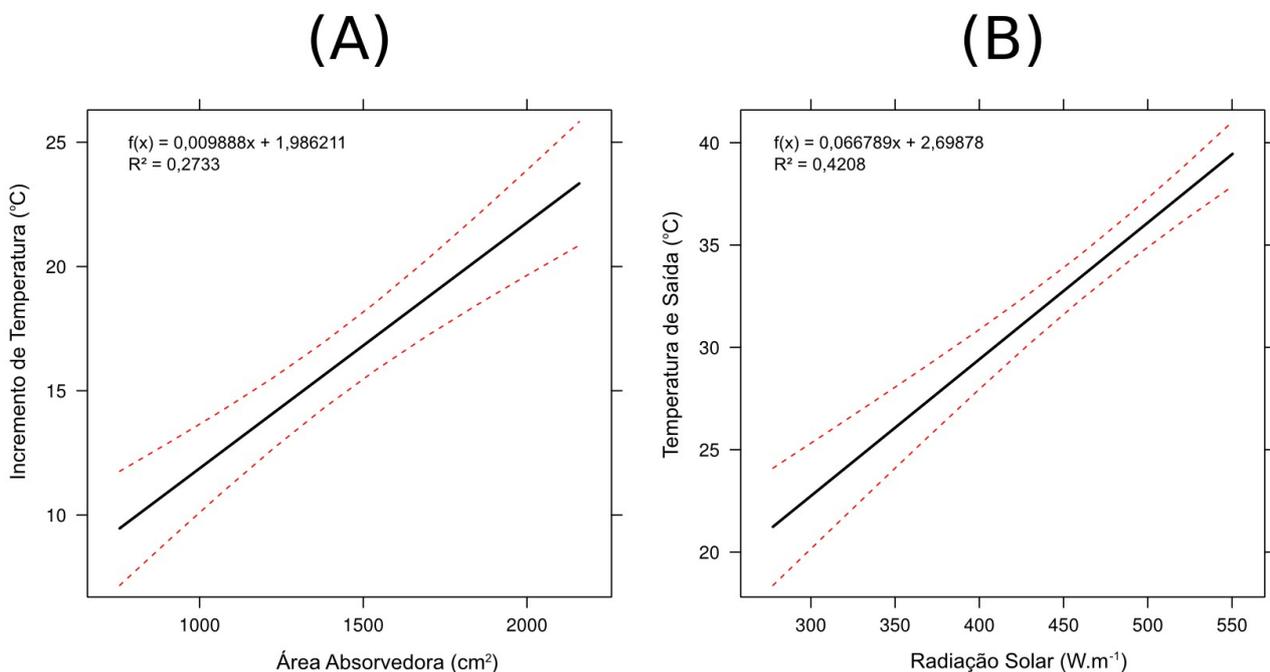
Os resultados observados demonstram que os tubos coletores apresentaram aquecimento variável entre os tratamentos, indicado pelo incremento de temperatura registrado e temperaturas máximas alcançadas, indicando que, quanto maior a radiação solar global maiores são os resultados de temperatura.

A variabilidade dos resultados ocorreu devido a diferença na incidência de radiação solar, que não segue uma constante e é afetada diretamente pela presença de nebulosidade e nevoeiros. Já o aquecimento registrado em cada tratamento é consequência direta do tamanho da área absorvedora, sendo observado melhor aproveitamento térmico onde em maior área estava exposto o material absorvedor. A diferença média registrada entre o tratamento T2Ta4 (menor área absorvedora com 756 cm<sup>2</sup>) e T3Ta10 (maior área absorvedora com 2160 cm<sup>2</sup>) é de 16,41 °C, com médias de 7,94 °C e 24,35 °C respectivamente aos tratamentos, sob o incremento de temperatura (temperatura de saída subtraído da temperatura do ar).

A exceção, neste caso, foi observada nos tratamentos T2Ta8 e T3Ta8, registrando temperaturas inversas como 8,11 °C e 7,89 °C de médias de incremento, respectivamente. Assim, também, são observados as temperaturas máximas registradas (51,69 °C e 50,32 °C). Estes dados não refletiram uma diferença estatística significativa, porém, podem evidenciar o fato de que o T2Ta8, mesmo com uma área absorvedora levemente inferior ao T2Ta8, tem uma quantidade menor de 3,83 L de ar no interior do tubo, que poderia facilitar o incremento de temperatura.

Santos (2004) relata em seu trabalho com coletor solar para aquecimento de água que o dimensionamento é a relação entre a necessidade de aquecimento sob a área absorvedora. O mesmo quesito poderá ser aplicado sob o coletor de garrafa PET para aquecimento do ar quando a este relatado sua capacidade operacional. Para os autores Pereira *et al.* (2002) a densidade de fluxo de radiação solar global diária no local deverá ser considerada sempre que for realizar o dimensionamento para aproveitamento da energia solar. O trabalho com aquecimento de água com materiais alternativos de Nogueira & Domingues (2007) também relata a necessidade de cálculo entre a quantidade de uso e a área absorvedora, sendo esta a base de informações acompanhado da correta disposição do painel e a região de instalação. Neste sentido são necessários dados adicionais para realizar o correto dimensionamento, como a capacidade de aquecimento por determinados períodos em cada tratamento proposto ou uma curva referencial como modelo de dimensionamento.

São apresentados na Figura 4 os resultados da análise de regressão entre as variáveis variação de temperatura por área absorvedora e radiação solar global por temperatura de saída.



**Figura 4 – Gráficos da análise de regressão linear relacionando Área Absorvedora com a Incremento de Temperatura (A) e Temperatura de Saída pela Radiação Solar (B).**

Observa-se que ao ponto em que a área absorvedora aumenta também reflete na variação de temperatura assim como a radiação solar é a fonte primária ao aquecimento,

já que interfere diretamente nos resultados tomados nos termopares (conjunto A-H) compreendidos como temperatura de saída. Desta maneira, mesmo em dias que a temperatura externa encontra-se baixa a variação é tomada pela intensidade da radiação solar global, para mais ou para menos.

Em relação aos aspectos construtivos, o modelo apresenta baixo custo e grande possibilidade de adaptação. Não houve diferenciação em relação à eficiência sobre o tipo de garrafa utilizada, mas sim sobre a área absorvedora instalada. O material utilizado foi obtido de maneira fácil e o formato pode ser modificado objetivando o tamanho do empreendimento, ficando sua aplicação restrita a sistemas de baixa temperatura, já que o PET resiste a temperaturas em torno de 100 °C. Para isso houve necessidade de adequar um material isolante em áreas de contato com o plástico e material absorvedor, que, após ter sido instalado mostrou-se eficaz, já que evitando o contato direto entre os materiais conservou as condições físicas da PET. Um sistema funcional deverá considerar que não deva ocorrer interferência por ventos na entrada e saída de ar nem haver rupturas no tubo coletor.

O potencial de aquecimento é o principal elemento a ser considerado para o dimensionamento de um sistema funcional. Além deste, deve ser levado em conta o tamanho da câmara de secagem, o tipo de produto, a temperatura média de secagem, a quantidade e fluxo de ar ideais assim como a escala de operação no período de secagem. Estes elementos relacionados à radiação solar média e temperatura do ar representam os requisitos básicos para a construção de um modelo eficaz com base na energia solar.

## **2.4. Conclusões**

O coletor solar construído com garrafas PET mostrou-se funcional no aspecto de aproveitamento da radiação solar global para o fornecimento de energia térmica.

Não foi observado diferença entre os modelos e tipos de garrafa no potencial de aquecimento de cada tratamento, porém esta diferença se mostrou significativamente variável em relação ao tamanho da área absorvedora.

Considera-se, portanto, que o protótipo de coletor solar proposto pode ser utilizado para fins de aquecimento, para sistemas de baixa temperatura, observando valores de incremento de temperatura de 7,94 °C e 24,35 °C do menor ao maior tratamento. São observados os valores de máximo aquecimento chegando a picos de 38,53 °C até 57,34 °C para os mesmos tratamentos citados, em período de inverno, onde a temperatura

ambiente média para o local são inferiores a 18 °C.

Contudo, há necessidade de novos testes para estimar a capacidade do aproveitamento líquido da energia térmica gerada. A partir disso será possível a criação de modelos e assim o dimensionamento de unidades projetadas.

### 3. CAPÍTULO II

#### AVALIAÇÃO DO POTENCIAL CALORÍFICO DO BIOGÁS PARA O USO EM SECADORES DE PLANTAS MEDICINAIS

**RESUMO:** O objetivo deste trabalho foi avaliar a utilização de energia térmica proveniente da queima do biogás para o aquecimento de ar e seu potencial de uso em uma câmara de secagem. Um protótipo foi construído para avaliação do aquecimento de ar em sistema de aquecimento e uma câmara de secagem. A composição do biogás utilizado foi de 60,0% de metano (CH<sub>4</sub>) e os tratamentos relacionados por diferença de pressão aplicada ao biogás, sendo: T0 (controle – sem aquecimento), T1 (pressão de 1,3-2,0 bar), T2 (pressão de 2,0-2,7 bar) e T3 (pressão de 2,7-3,4 bar) em 6 repetições. Um aparelho de aquecimento de água a gás (GLP) foi adaptado para uso com biogás. A câmara de secagem foi construída com placas de MDF e isolada termicamente totalizando um volume útil de 0,544 m<sup>3</sup> com velocidade do ar de 1,58 m.s<sup>-1</sup>. A queima do biogás gerou 3608,64 KJ.h<sup>-1</sup>, 6895,08 KJ.h<sup>-1</sup> e 7603,93 KJ.h<sup>-1</sup> para os tratamentos T1, T2 e T3 respectivamente, suprimindo a necessidade de aquecimento na câmara de secagem em operação nas temperaturas de 43,05 °C (T1), 52,56 °C (T2) e 53,56 °C (T3). O sistema de aquecimento proposto mostrou-se eficaz para a secagem de diferentes espécies de plantas medicinais, já que atende o intervalo de temperatura especificado na literatura.

**Palavras-chave:** fontes alternativas; secagem; energia térmica

#### EVALUATION OF BIOGAS CALORIFIC POTENTIAL FOR USE IN MEDICINAL PLANTS DRYERS

**ABSTRACT:** The objective of this study was to evaluate the use of thermal energy from the burning of biogas for heating air and its potential use in a drying chamber. A prototype was built to evaluate the heating air in the heating system and a drying chamber. The biogas composition used was 60.0% methane (CH<sub>4</sub>) and treatments related by pressure difference applied to biogas which: T0 (control - no heating), T1 (pressure 1.3 to 2.0 bar), T2 (pressure 2.0 to 2.7 bar) and T3 (pressure 2.7 to 3.4 bar) in six replicates. A water heater gas (LPG) was adapted for use with biogas. The drying chamber was built with plates MDF (Medium Density Fiberboard) and thermally insulated with a total usable volume of 0.544 m<sup>3</sup> and air velocity of 1.58 m.s<sup>-1</sup>. The burning of biogas generated KJ.h<sup>-1</sup> 3608.64, 6895.08 KJ.h<sup>-1</sup> and 7603.93 KJ.h<sup>-1</sup> for T1, T2 and T3 respectively, meeting the need for heating in the drying chamber operating at temperatures of 43.05 °C (T1), 52.56 °C (T2) and 53.56 °C (T3). The heating system proposed has proved effective for drying different species of medicinal plants, since it meets the temperature range specified in the literature.

**Keywords:** alternative energy sources; drying; heat energy

### 3.1. Introdução

O uso de fitoterápicos e drogas vegetais extraído de plantas medicinais no Brasil é relatada de forma histórica e cada vez mais discutida em diferentes estudos atraindo, assim, a atenção de novos pesquisadores (MING *et al.*, 2012). Carvalho *et al.* (2010) destacam que ocorrem altos níveis de contaminação biológica devido a baixa qualidade no pós-processamento de colheita em plantas medicinais, comprometendo a confiabilidade de utilização por parte de consumidores.

Barbosa *et al.* (2006) explica que, no município de Maceió – AL, os produtores de plantas medicinais utilizam, em sua maioria, métodos de secagem por processos naturais como: secagem ao sol. Esta prática é desaconselhável por ocasionar perdas nas condições químicas e físicas do produto final, e, ainda, exigindo grande espaço físico e maior disponibilidade de tempo para o processamento (MARCHESE & FIGUEIRA, 2005).

O intervalo de temperatura geralmente utilizado, indiferente do método, para a maioria das plantas medicinais está entre 50 e 60 °C (MELO *et al.*, 2004). E dependendo das características da planta e de sua fonte terapêutica, intervalos de temperatura podem variar de 30 a 70 °C (MARCHESE & FIGUEIRA, 2005; BARBOSA *et al.*, 2006; SOARES, 2006; CARVALHO *et al.*, 2010; MARTINAZZO *et al.*, 2010; NEGRI *et al.*, 2009; RADÜNZ *et al.*, 2010; BORBA *et al.*, 2012).

Contudo, a necessidade de aplicar uma correta temperatura sob um método pré-definido acarreta em custos e necessidade da aquisição de equipamentos. Assim como aponta Soares (2006), a viabilidade da produção de plantas medicinais e aromáticas está comprometida com a redução dos custos durante a secagem. Melo *et al.*, (2002) citam que a quantidade de energia necessária para faixas de aquecimento de ar entre 30 °C e 50 °C é de 10.000 kJ por kg de água removida de plantas no processo de secagem.

De acordo com o descrito, acredita-se que havendo necessidade de utilização de energia, a aplicação de fontes baseadas na sustentabilidade energética deve ser aproveitada (ROSEN, 2009). Partindo deste princípio, este trabalho aborda a utilização da energia térmica do biogás na substituição de fontes energéticas convencionais. Contudo, a inexistência de equipamentos e máquinas com a finalidade específica para a queima de biogás acarreta necessidade de adaptação de tecnologias disponíveis para queima do GLP (gás liquefeito de petróleo) e gás natural (SILVA *et al.*, 2005). Um dos principais problemas encontra-se na obtenção de máquinas e componentes que resistam a

presença de gases como o ácido sulfídrico ( $H_2S$ ), presente no biogás. Preferencialmente o  $H_2S$  deve ser eliminado por meio de filtragem a fim de garantir maior segurança de operação e vida útil dos equipamentos.

Na agropecuária, em suas diversificadas atividades, a utilização de biodigestores – ou reatores anaeróbios – contribui para integração e sustentabilidade garantindo o aproveitamento de efluentes, ao qual, normalmente, tem baixo ou mesmo nenhum valor comercial. Os efluentes da agropecuária podem ser utilizados, quando convertidos através de biodigestores, em duas grandes fontes de exploração: biogás e biofertilizante (QUADROS *et al.*, 2009).

De modo simples, caracterizar um biodigestor é descrevê-lo como uma câmara hermeticamente fechada em que diferentes tipos de biomassa encontram condições de fermentar com temperatura adequada e ausência de oxigênio, ocorrendo o acondicionamento de bactérias (arqueas) (OLIVA *et al.*, 2002).

A biodigestão anaeróbia é um processo de tratamento biológico do afluente oriundo de atividades que geram resíduos orgânicos. Sendo estes constituídos por dejetos suínos com elevadas cargas orgânicas, entendido o tratamento como a decomposição da matéria orgânica por microrganismos anaeróbios através da fermentação anaeróbia em uma estrutura física hermeticamente isolada conhecida como câmara de biodigestão ou reator anaeróbio. Consiste então na fermentação com ausência de oxigênio de dejetos animais, através de bactérias anaeróbias que sintetizam a matéria orgânica transformando-a em metano e dióxido de carbono, ou seja, biogás. A digestão anaeróbia faz com que a matéria orgânica dos dejetos perca exclusivamente carbono (C), na forma de  $CH_4$  e  $CO_2$ , diminuindo sua relação C/N (LETTI, 2010).

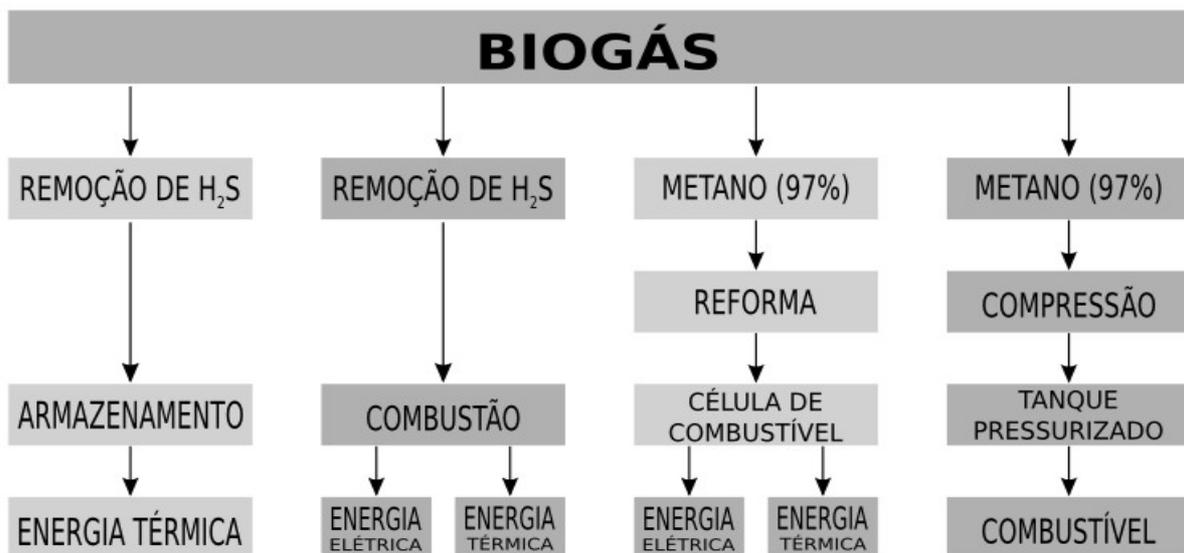
A produção de biogás a partir de digestão anaeróbia é considerada uma promissora fonte de energia renovável e pode contribuir beneficentemente com o tratamento de resíduos agropecuários, favorecendo diminuição de custos na implantação de sistemas mais eficientes, na redução da carga orgânica ao suporte dos agroecossistemas e reciclando minerais para um formato que nutre as plantas e melhora a qualidade dos solos (BERGLUND *et al.*, 2006). Basicamente, o biogás pode ser utilizado para a geração de energia elétrica, mecânica e para aquecimento. Dessa forma pode facilmente ser adaptado e utilizado conjuntamente ao gás natural, se beneficiado.

Os biogás é formado por distintos gases sendo o principal o Metano ( $CH_4$ ), componente o qual apresenta seu poder calorífico. Além deste se apresentam presentes o gás carbônico ( $CO_2$ ), sulfeto de hidrogênio ou ácido sulfídrico ( $H_2S$ ), traços de nitrogênio

(N<sub>2</sub>) entre outros gases inertes. As concentrações médias para o biogás produzido por biodigestores anaeróbios de instalações rurais são de 50-60% de CH<sub>4</sub>, 30-40% de CO<sub>2</sub>, <1% de N<sub>2</sub> e 10-2000 ppm de H<sub>2</sub>S (JÖNSSON *et al.*, 2003).

Os componentes do biogás podem apresentar valores diferentes dependendo do tipo de dejetos utilizados e o manejo adequado dos sistemas, como quantidade de água adicionada, resíduos da produção, temperatura de operação, carga de alimentação entre outros. O poder calorífico do biogás é alterado de acordo com a porcentagem de metano presente e pode ser utilizado em diferentes equipamentos onde seja possível sua adaptação, utilizando-se de filtragem para remoção de H<sub>2</sub>S e eliminação da umidade presente (RANZI & ANDRADE, 2004).

A maneira mais simples de utilização direta do biogás é por meio da sua combustão em caldeiras ou queimadores, através de equipamentos para gás natural ou GLP, onde o biogás possa ser queimado para a produção de energia no local ou transportado por gasoduto. Para fins de aquecimento o biogás não necessita de qualquer reforço ou mistura com outros gases e o nível de contaminação não restringe a utilização do gás, no entanto, precisa passar por condensação e a remoção de partículas de gases indesejáveis, a compressão, arrefecimento (quando necessário) e desumidificação (SEADI *et al.*, 2008). A Figura 1 expressa a diversidade quanto às formas de utilização do biogás.



**Figura 1 – Sistema de processamento do biogás para destinação como fonte energética e consumo final.**

Fonte: Adaptado de IEA-BIOENERGY (2005).

Por convenção utilizou-se neste trabalho o descrito por Deshmukh (2005) que apresenta o poder calorífico do metano ( $\text{CH}_4$ ) com  $35.800 \text{ KJ.m}^{-3}$ . A caracterização da qualidade do biogás é expressada então por meio da proporção de gás metano encontrado. Desta forma, se há energia disponível na queima do biogás a utilização no processamento de produtos agrícolas, entre eles as plantas medicinais e aromáticas, então tem-se uma demanda energética que pode ser atendida por meio desta fonte.

Mesmo desconhecendo o perfil dos produtores de plantas medicinais quanto à produção de biogás por meio de resíduos orgânicos, acredita-se que esta possa ser uma opção para a otimização do processo de secagem com agregação de valor ao produto final e manutenção da qualidade. Inevitavelmente, há de se investigar essa potencialidade possibilitando uma nova maneira de aproveitamento energético, aliado assim a aplicação prática por meio de estudos com pequenos biodigestores, transporte e armazenamento de biogás. Ainda, outros fatores como: melhoria nos métodos de processamento e distribuição do biogás podem viabilizar novos projetos de forma generalizada (CUÉLLAR & WEBBER, 2008).

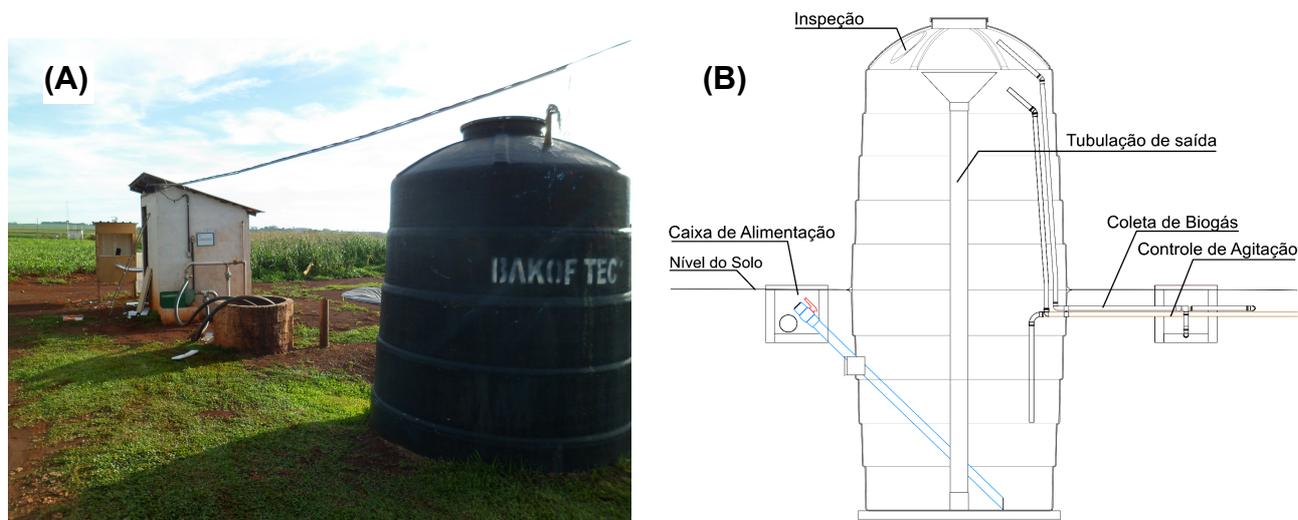
Este trabalho de pesquisa trata da construção de um protótipo para a queima de biogás objetivando o aquecimento de ar e sua utilização em uma câmara de secagem. O objetivo foi a avaliação da viabilidade da queima de biogás com aplicação da energia térmica gerada em secadores, atendendo ao intervalo de temperatura necessário para a secagem de plantas medicinais.

### **3.2. Material e Métodos**

O protótipo para avaliação da utilização da energia térmica proveniente da queima de biogás (sistema de aquecimento e câmara de secagem) foi instalado na Estação Experimental Prof. Dr. Antônio Carlos dos Santos Pessoa da UNIOESTE (Universidade Estadual do Oeste do Paraná), no município de Marechal Cândido Rondon (latitude  $24^{\circ}31'55'' \text{ S}$  e longitude  $53^{\circ}01'09'' \text{ W}$ ).

Foi utilizado da estrutura da Unidade Experimental de Produção de Biogás (Figura 2), contando com a integração entre as atividades agropecuárias da Estação para seu funcionamento. A estrutura dispõe de um biodigestor modelo Bioköhler B20 com capacidade de  $20.000 \text{ L}$  de dejetos, casa de máquinas com compressor, condensador de biogás, filtro, motobomba para alimentação de dejetos, medidor de gás e um balão para armazenagem de  $5 \text{ m}^3$ . O biodigestor é alimentado com dejetos de bovinos provenientes

dos animais alojados no local e o biofertilizante é destinado à adubação de pastagens.



**Figura 2 – (A) Vista parcial da Unidade experimental de produção de Biogás na Estação Experimental Prof. Dr. Antonio Carlos dos Santos Pessoa (UNIOESTE) e (B) Corte BB com detalhe básico de funcionamento do BioKöhler B20.**

Fonte: (B) Adaptado de Ferreira (2010).

A composição do biogás foi obtida por meio um medidor portátil modelo Drager X-am 7000, por meio de sensor infravermelho ( $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ ). Durante o período experimental as proporções medidas foram de 59,54% de  $\text{CH}_4$ , 39,63% de  $\text{CO}_2$  e 0,83% para outros gases ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ ). Como a leitura foi realizada antes da filtragem será considerado para efeito de cálculos a proporção de 60,0% para o metano ( $\text{CH}_4$ ).

O biogás produzido é armazenado em um balão de geomembrana PEBDL (Polietileno de baixa densidade linear) até o acionamento de um compressor de ar  $2,6 \text{ pés}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  ( $73,63 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ) e direcionado para o gasoduto de rede. Antes de passar pela unidade compressora o biogás passa pela remoção de impurezas através de um filtro de partículas e desumidificado por meio de um cilindro condensador. No período experimental a produção permaneceu na média de  $3,0 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ .

Foram conduzidos testes com diferentes regulagens no compressor, que suga o biogás armazenado e comprime-o dentro do encanamento (gasoduto) conectado ao queimador. O compressor de ar foi interligado a um pressostato (*Bornes Pressostato*) para trabalhar com intervalos de pressão entre 1,3-2,0 bar, 2,0-2,7 bar e 2,7-3,4 bar, que compreendem a pressão normal de trabalho deste sistema, considerando que, abaixo de 1,0 bar não ocorreu acendimento e acima de 3,6 bar o equipamento foi excessivamente forçado mantendo-se em funcionamento ininterruptamente.

A quantificação do biogás utilizado para a queima foi determinado com um medidor

de gás G 0,6 LAO, instalado na passagem de biogás para o queimador e acoplado por mangueiras pneumáticas do tipo PU (poliuretano) de 8,0 mm de espessura, para conexões de engate rápido.

Foi utilizado um aquecedor de água do tipo passagem, sem descrição de marca e modelo por ser um aparelho antigo. O aparelho foi adaptado por completo, especialmente com a retirada de todos os canos de água (entrada, circulação e saída) e a retirada de válvulas originais de água e gás. Basicamente dois componentes principais foram utilizados: o queimador tipo grelha com 14 saídas de chama e pressão de operação de 2,8 kPa (0,028 bar) e a estrutura externa (caixa metálica).

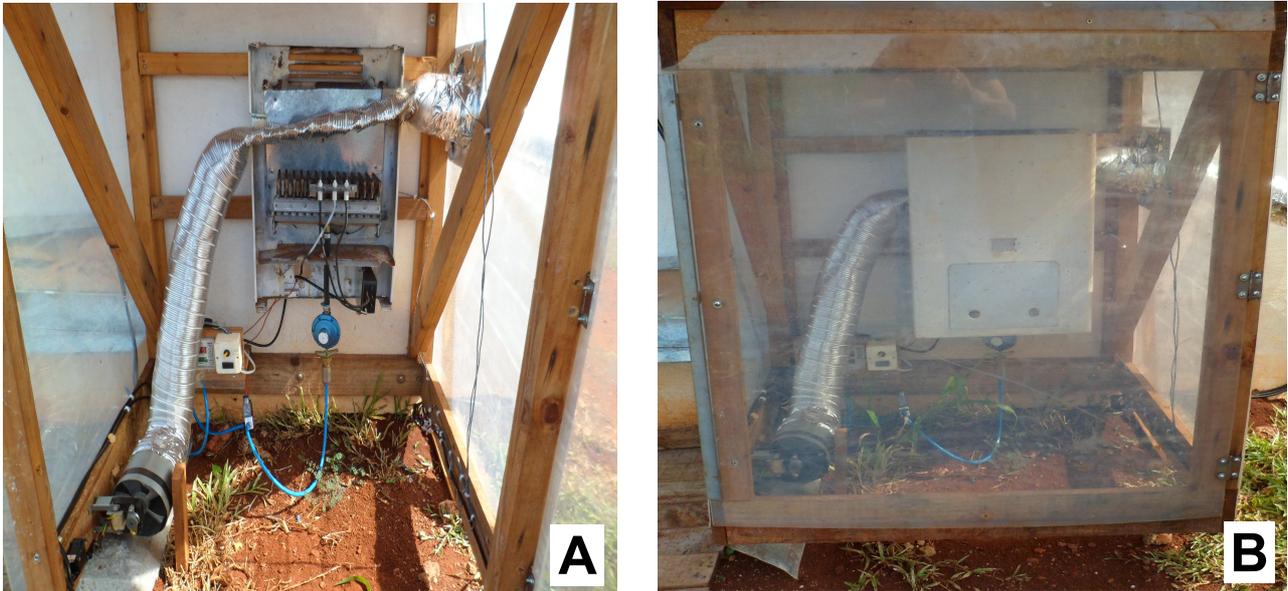
O queimador teve os bicos injetores de gás modificados quanto à espessura de saída, originalmente de 0,6 mm, passou por uma nova perfuração manual com broca de 1,0 mm. A distância entre os bicos e a entrada do queimador – originalmente com 3 cm – foi anulada, diminuindo a entrada de oxigênio a fim de possibilitar a queima do biogás. Ainda, necessário para a combustão, foi instalada uma válvula para gás (GLP) com vazão de  $7 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ , com a finalidade de regular a pressão do queimador em 2,8 kPa.

Para realizar a ignição e controle da entrada de biogás foi instalado um controlador de temperatura da marca INOVA, modelo 32101 (específico para fornos a gás, lenha ou eletricidade) acompanhado de uma usina de fogão e um centelhador de faíscas. Este aparelho foi utilizado para simplificar a utilização do queimador e conduzir maior segurança na operação.

O aquecimento do ar foi possível devido a utilização de um tubo de alumínio FLEXTIC de 100 mm, comprimento total de 1,5 m e 1,0 mm de espessura. Este tubo foi disposto sobre o queimador de forma inclinada com distância de 6 cm na entrada (ar em temperatura ambiente) e 13 cm na saída (ar aquecido) em relação a altura máxima do queimador. Determinou-se assim a área de aquecimento, disposta em posição imediatamente sobre o queimador. O tubo de alumínio foi achatado neste espaço, para um melhor aproveitamento da chama, ficando com 3,0 cm de altura por 15,0 cm de largura. A entrada de ar ambiente foi disposta a uma distância de 60 cm abaixo do da altura do queimador e a saída à 20 cm acima deste. Na extremidade do tubo de alumínio (saída do ar aquecido), utilizou-se um tubo de PVC flexível com 100 mm para a condução deste até a câmara de secagem, com 1,8 m de comprimento. Este tubo condutor foi então isolado com manta de vidro ( $300 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ) e recoberto por fita plástica refletiva isolante.

Para a proteção contra o vento e chuvas foi construído um abrigo com as dimensões de 0,80 X 0,75 X 0,80 m (frente, profundidade e altura), com a base aberta

para a entrada de ar em distância de 0,10 m do chão. O sistema de aquecimento pode ser observado foi composta por: estrutura de queima, ignição e tubo de aquecimento além da estrutura de abrigo para o sistema (Figura 3).



**Figura 3 – (A) Estrutura de queima de biogás, ignição e tubo de aquecimento com sistema desligado e (B) a estrutura de abrigo com o sistema em operação.**

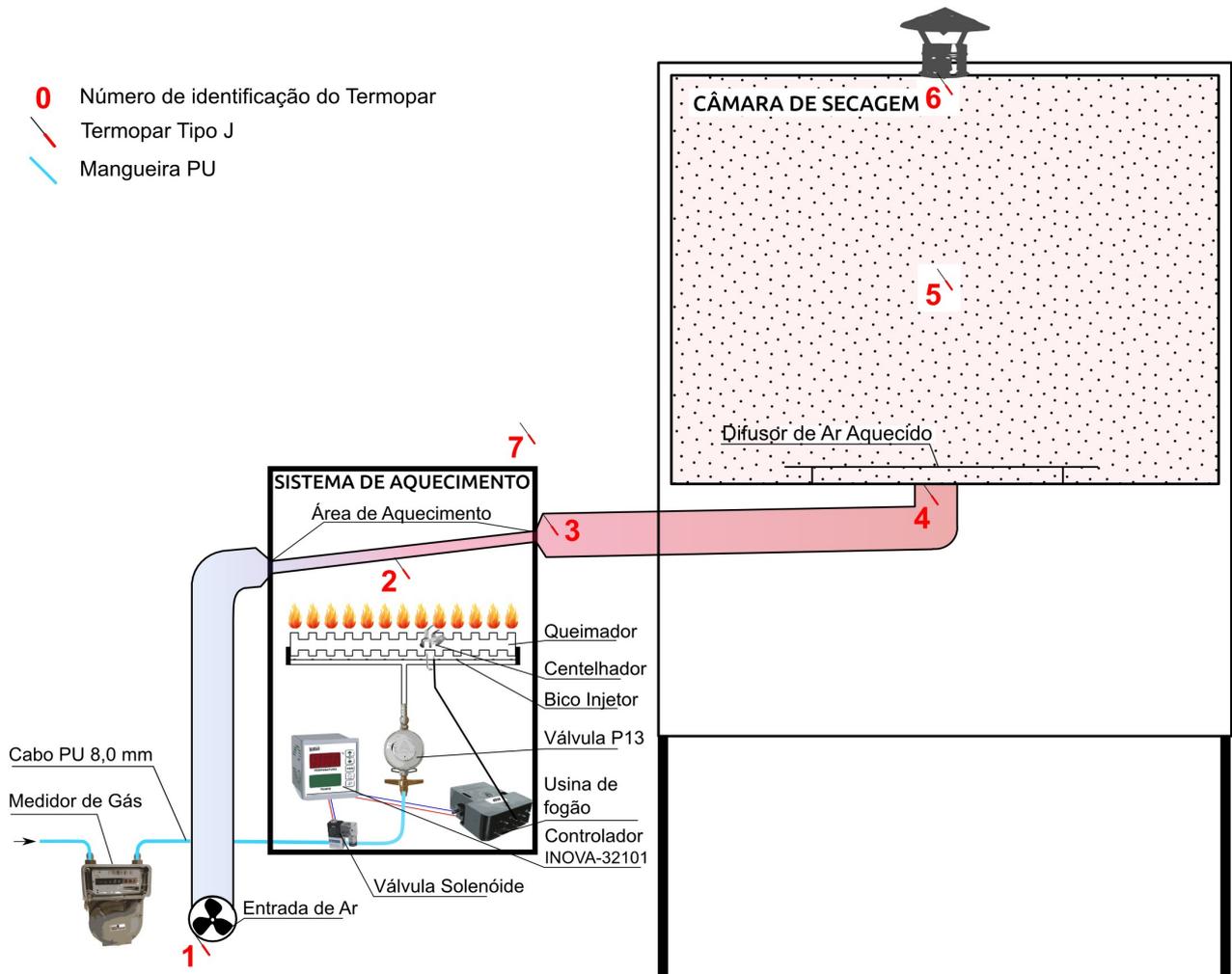
A câmara de secagem foi construída com placas de MDF (*Medium Density Fiberboard*) com espessura de 2,5 cm. A câmara foi isolada com placas de isopor de 2,0 cm de espessura e vedado nos encaixes com espuma de poliuretano. As dimensões da câmara de secagem em volume útil foram de 0,80 X 0,80 X 0,85 m (frente, profundidade e altura) totalizando 0,544 m<sup>3</sup>. O sistema de aquecimento acoplado à câmara de secagem pode ser visualizado na Figura 4, assim como o encanamento de saída do queimador e entrada na câmara de secagem.



**Figura 4 – Vista geral da estrutura de aquecimento e câmara de secagem.**

Um conjunto com 7 termopares do tipo J foram utilizados em um sistema aquisitor de dados modelo NOVUS FIELDLOGGER com capacidade de 512 kB em 8 canais analógicos de entrada. Originalmente os termopares apresentavam 1,5 m de comprimento, os quais foram adicionados com cabos do tipo PP de 1,5 mm a extensão total de 7,5 m, passando então por calibração em temperaturas de 0 e 98 °C.

Os sensores foram dispostos na (1) entrada de ar ambiente no tubo de alumínio, (2) a 5 cm de distância acima da chama do queimador, (3) na saída de ar aquecido do queimador, (4) na entrada da câmara de secagem, (5) no centro da câmara de secagem, (6) na saída da câmara de secagem e (7) na parte superior do abrigo (acima do equipamento queimador). A Figura 5 apresenta a posição dos termopares e o modelo esquemático do funcionamento do sistema de aquecimento e câmara de secagem.



**Figura 5 – Diagrama funcional do sistema de aquecimento e câmara de secagem com a disposição dos sensores de temperatura (termopares tipo J).**

O período experimental foi de 15 de dezembro de 2012 à 13 de janeiro de 2013, contemplando o período de testes e adaptações para o funcionamento nos componentes da Unidade Experimental de Produção de Biogás, assim como o período de coleta de dados. Os tratamentos utilizados foram: T0 – sem aquecimento, T1 – aquecimento e regulagem de pressão entre 1,3-2,0 bar, T2 – aquecimento e regulagem de pressão entre 2,0-2,7 bar e T3 – aquecimento e regulagem de pressão entre 2,7-3,4 bar. Foram realizadas 6 repetições, com cada seção compreendendo 40 min, sendo 10 min com o sistema ligado para pré-aquecimento e estabilização do sistema e 30 min para coleta de dados. Os horários de coleta foram 11:00 h, 13:00 h, 15:00 h, 17:00 h realizados durante os dias 08/01/13 à 13/01/13.

A velocidade do ar na tubulação foi aferida por meio de um anemômetro digital portátil da marca KESTREL, na entrada da câmara de secagem. A velocidade registrada

foi de  $1,58 \text{ m.s}^{-1}$ , proporcionando assim o transporte de  $0,0124 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  ( $12,40 \text{ L.s}^{-1}$ ) de ar. Com a câmara de secagem correspondendo ao volume de  $0,544 \text{ m}^3$  havia a renovação completa do ar a cada 43,9 segundos.

A coleta de dados dos aquisitores foi realizada diariamente, utilizando-se o software padrão que acompanha o equipamento. A leitura e análise dos resultados foi elaborada utilizando planilha eletrônica e o software estatístico R (versão 1.8.1) em interface gráfica R-Commander, aplicado por meio de análise de variância, teste de médias e regressão linear, além do resumo numérico dos dados (R Core Team, 2013).

### 3.3. Resultados e Discussão

O biogás utilizado manteve 60% de  $\text{CH}_4$  durante o período de coleta de dados. Sendo assim estabelecido o poder calorífico do  $\text{CH}_4$   $8544,11 \text{ Kcal.m}^{-3}$  ( $35800 \text{ KJ.m}^{-3}$ ) e do biogás  $5126,47 \text{ Kcal.m}^{-3}$  ( $21480 \text{ KJ.m}^{-3}$ ). Foi identificado que a pressão de operação do compressor causou variação na passagem de biogás, ocasionando diferença no consumo e no aquecimento na câmara de secagem. Os valores de biogás consumidos em  $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$  são descritos na Tabela 1, para cada tratamento e com os valores líquidos de  $\text{Kcal.m}^{-3}$ .

**Tabela 1 – Valores médios de consumo de biogás para cada tratamento e correspondente em  $\text{kcal.m}^{-3}$**

Tratamento	Pressão de operação (bar)	Consumo de Biogás ( $\text{m}^3.\text{h}^{-1}$ )	Poder Calorífico Líquido ( $\text{Kcal.m}^{-3}$ )
T0	-	-	-
T1	1,3-2,0	0,168	858,68
T2	2,0-2,7	0,321	1643,03
T3	2,7-3,4	0,354	1816,48

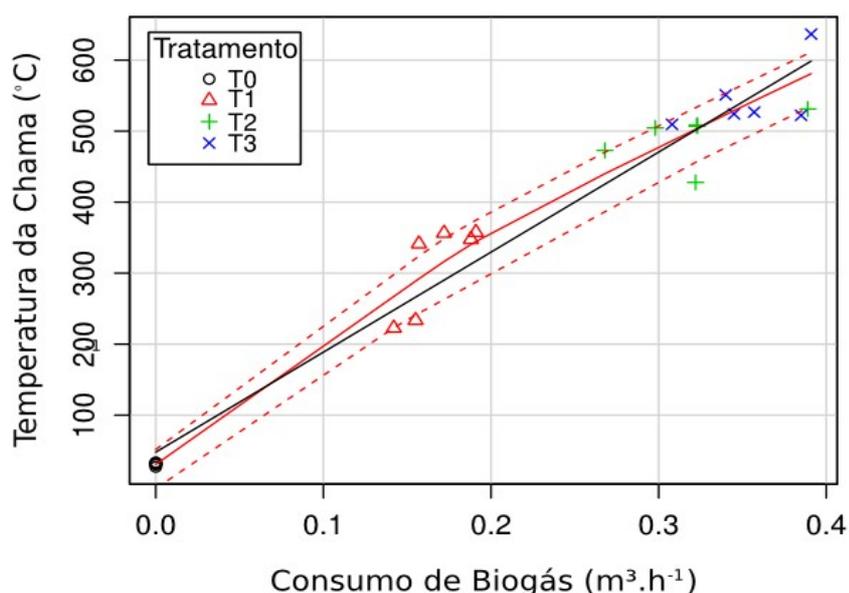
Observa-se que o consumo de biogás variou com a modificação da pressão utilizada no sistema compressor gasoduto, influenciando o potencial de aquecimento. Assim a maior pressão aplicada resultou em maior passagem de biogás pela válvula P13 até o queimador em 2,8 KPa.

Os dados médios registrados pelo sistema aquisitor de dados são demonstrados na Tabela 2, condizendo com as médias obtidas por cada tratamento.

**Tabela 2 – Dados médios de aquecimento registrado pelos sensores de temperatura junto ao sistema aquisitor de dados**

Tratamento	Temperatura (° C)					
	Sistema de Aquecimento			Câmara de Secagem		
	Entrada	Chama	Saída	Entrada	Centro	Saída
<b>T0</b>	31,49	31,20	31,55	29,84	32,32	30,66
<b>T1</b>	31,97	309,79	79,03	55,56	43,05	40,66
<b>T2</b>	31,36	491,97	119,19	80,97	52,56	49,84
<b>T3</b>	30,58	545,06	121,53	84,52	54,56	51,42

O tratamento T0 teve efeito de controle, não havendo aquecimento. Assim a pequena variação de temperatura entre os sensores é explicada pela diferença de entrada de ar ambiente e as condições estruturais dos componentes. Valores de temperatura menores na câmara de secagem é devido capacidade isolante, preservando a temperatura das condições anteriores à coleta de dados. Os valores médios de aquecimento da chama identificados pelo sensor de temperatura sob o queimador (distância de 5 cm) indicam que a maior passagem de biogás pela válvula P13 aumenta a combustão no queimador. Na Figura 6 podem ser visualizados em gráfico os dados de maior temperatura relacionada ao consumo de biogás, razão esta observada nos diferentes tratamentos.



**Figura 6 – Gráfico de correlação dos dados de consumo de biogás (m³.h⁻¹) pela temperatura da chama (5 cm acima do queimador).**

Os resultados da variância em relação à análise de médias para os dados do sistema de aquecimento são descritos na Tabela 3, referindo-se às médias, desvio padrão e coeficiente de variação para as temperaturas de entrada de ar ambiente, temperaturas da chama a 5 cm do queimador e temperaturas do ar aquecido na saída do queimador.

**Tabela 3 – Resultados do teste de médias para dados registrados no sistema de aquecimento**

Tratamento	Temperatura (° C)								
	Entrada Ar Ambiente			Chama			Saída Ar		
	Média	DP	CV	Média	DP	CV%	Média	DP	CV
<b>T0</b>	31,49 a*	1,32	0,0420	31,20 c	2,19	0,0705	31,55 c	2,28	0,0722
<b>T1</b>	31,97 a	1,74	0,0544	309,79 b	63,67	0,2055	79,03 b	5,98	0,0757
<b>T2</b>	31,36 a	1,33	0,0425	491,97 a	36,55	0,0743	119,18 a	6,38	0,0535
<b>T3</b>	30,58 a	1,32	0,0432	545,06 a	46,85	0,0859	121,53 a	6,53	0,0537
P>0,001	0,435	-	-	2,12 <sup>-14</sup>	-	-	2,0 <sup>-16</sup>	-	-

\* Diferentes letras na coluna correspondem ao teste de Tukey à 5%; DP - Desvio Padrão; CV - Coeficiente de variação.

Verifica-se que não houve diferença significativa no ar de entrada para os diferentes tratamentos. A variação nula confere aos mesmos a aplicação das mesmas condições de temperatura de entrada. Contudo, houve significativa diferença para as temperaturas registradas sob a chama do queimador e também no ar aquecido logo após a passagem sob a chama, no interior do tubo de alumínio. A diferença pode ser visualizada de forma similar, no tratamento T1, que obteve a menor temperatura de aquecimento enquanto os tratamentos T2 e T3 obtiveram resultados muito próximos, mas ainda dependentes da maior ou menor injeção de biogás no queimador. Observa-se ainda, grande diferença entre a temperatura da chama e da saída do queimador, sendo esta proveniente da eficiência do aproveitamento energético e da passagem de ar pelo tubo de aquecimento.

Na Tabela 4 são descritos os mesmos resultados anteriores referentes a variância pela análise de médias para os sensores posicionados na câmara de secagem, sendo estes: temperatura para a entrada de ar aquecido, o aquecimento no centro e na saída da câmara de secagem.

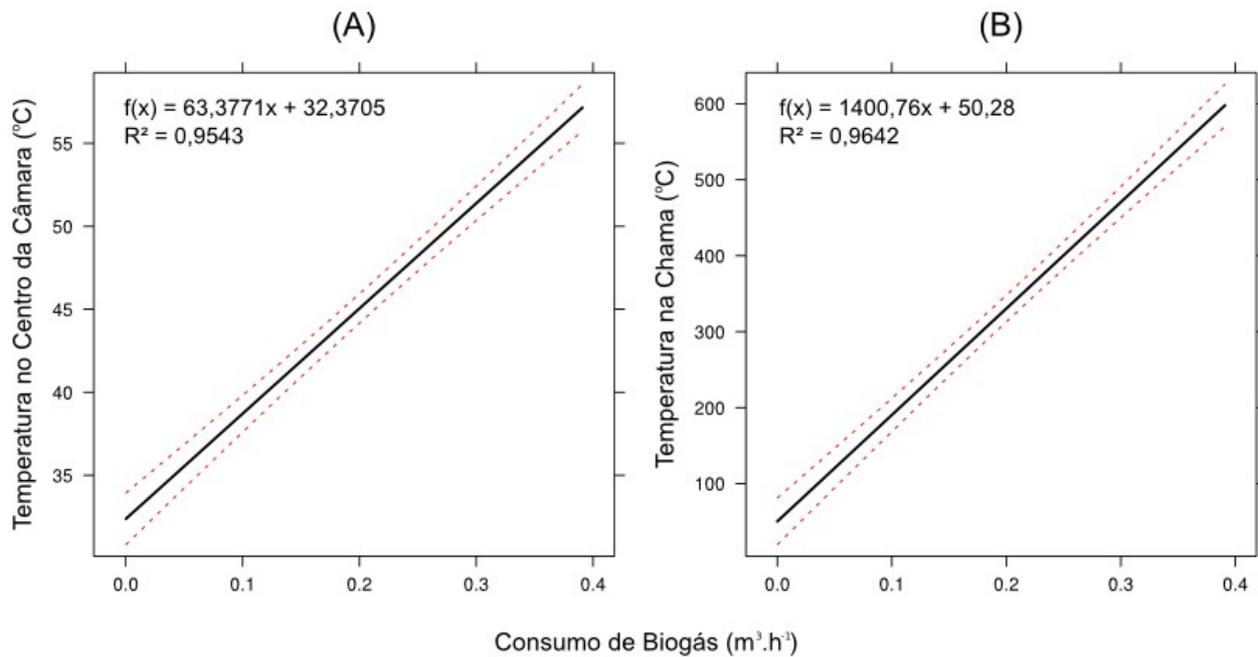
**Tabela 4 – Resultados do teste de médias para dados registrados na câmara de secagem**

Tratamento	Temperatura (° C)								
	Entrada Câmara			Centro Câmara			Saída Câmara		
	Média	DP	CV	Média	DP	CV%	Média	DP	CV
<b>T0</b>	29,84 c*	2,53	0,0846	32,32 c	2,66	0,0823	30,65 c	2,69	0,0879
<b>T1</b>	55,56 b	4,09	0,0736	43,05 b	3,31	0,0770	40,66 b	3,60	0,0886
<b>T2</b>	80,97 a	4,10	0,0506	52,93 a	2,56	0,0483	49,84 a	3,07	0,0616
<b>T3</b>	84,52 a	5,04	0,0597	54,56 a	2,47	0,0453	51,42 a	2,35	0,0458
P>0,001	8,34 <sup>-16</sup>	-	-	1,94 <sup>-11</sup>	-	-	2,42 <sup>-10</sup>	-	-

\* Diferentes letras na coluna correspondem ao teste de Tukey à 5%; DP - Desvio Padrão; CV - Coeficiente de variação.

Assim como verificado no sistema de aquecimento, os resultados demonstram que o aquecimento no interior da câmara de secagem seguiu o potencial de aproveitamento da energia a partir da queima do biogás. Os tratamentos T2 e T3 não diferiram significativamente, porém, onde houve maior queima resultou em maior temperatura dentro da câmara de secagem. O tratamento T1 apresentou menor consumo de biogás acarretando em temperaturas inferiores aos citados T2 e T3, porém demonstra aquecimento frente ao tratamento controle (T0) possibilitando o funcionamento a temperaturas em torno de 43,05 °C.

Considerando a relação entre a temperatura do ar e o consumo de biogás foi elaborado a análise de regressão, possibilitando observar a linearidade da quantidade de biogás consumida com as temperaturas no interior da câmara de secagem e da chama sob o queimador, dentro da esfera das condições estabelecidas neste trabalho. É possível afirmar, desta forma, que a temperatura é influenciada pelo consumo de biogás que por si tem a passagem forçada de acordo com a pressão de operação do compressor. Os gráficos da Figura 7 demonstram o resultado da análise de regressão linear entre o consumo de biogás e os dados da temperatura no centro da câmara e na chama.



**Figura 7 - Gráficos de efeitos da análise de regressão linear relacionando o consumo de biogás com a (A) temperatura no centro da câmara de secagem (°C) e (B) temperatura na chama (°C).**

Observa-se que o consumo de biogás como variação da pressão aplicada explica a temperatura na chama do queimador influenciando diretamente a temperatura de operação no centro da câmara de secagem. As temperaturas médias registradas na câmara de secagem para os tratamentos T1 (43,05 °C), T2 (52,56 °C) e T3 (54,56 °C) conferem a estes a capacidade de aquecimento do secador.

Os intervalos de temperatura na operação dos três tratamentos encontraram-se dentro do estabelecido para a secagem de plantas medicinais. Soares (2006) identificou que à temperatura de secagem de 40 °C é ideal para extração de óleos essenciais em Manjericão (*Ocimum basilicum* L.) e de 54,4 °C para obtenção de linalol. Já a temperatura ideal para extração de óleos essenciais do Guaco (*Mikania glomerata* Sprengel) é de 50 °C (RADÜNZ *et al.*, 2010). Autores ainda relatam faixas de temperatura de 60-70 °C como mais adequadas para plantas como: citronela (*Cymbopogon winterianus*), alecrim pimenta (*Lippia sidoides*) e camomila (*Matricaria recurtita*). Fudholi *et al.* (2010) relatam que a secagem de chá-verde (*Camellia sinensis*) sob temperaturas de 50 °C acontece de forma satisfatória.

A eficiência do sistema de aquecimento foi um dos pontos de grande atenção. Neste sentido, foi instalado um sensor de temperatura 5 cm abaixo do teto da estrutura de abrigo. Conforme os dados registrados (Tabela 5) verificou-se que parte da energia

térmica é perdida, demonstrando falhas no componente de coleta e transferência de calor do queimador. Outro indicador de perda foi identificado com o registro da temperatura de saída do queimador dentro do tubo de passagem de ar até a entrada da câmara de secagem, como descritos na Tabela 5.

**Tabela 5 – Dados médios registrados para temperatura do ar ambiente, a 5 cm do teto do abrigo (interior do abrigo), ar aquecido na saída do queimador, ar aquecido na entrada da câmara de secagem e a diferença entre a perda de temperatura no tubo de passagem**

Tratamento	Temperatura °C			
	Ar Entrada	Ar Saída Queimador	Interior do Abrigo	Perda no Tubo de Passagem
<b>T0</b>	31,49	31,55	36,30	1,71
<b>T1</b>	31,97	79,03	78,47	23,47
<b>T2</b>	31,36	119,19	105,16	38,22
<b>T3</b>	30,58	121,53	105,51	37,01

Os dados verificados possibilitam identificar os principais gargalos e que necessitam de revisão dos aspectos construtivos, a fim de apontar os pontos que precisam de melhorias. O primeiro ponto refere-se ao sistema de aquecimento, em especial sob a área de aquecimento que não aproveita todo o calor gerado fazendo com que o espaço interno à estrutura de abrigo aumente significativamente sua temperatura. A temperatura média, à 5 cm do teto do abrigo, registrada para o tratamento T1 foi de 78,47 °C distinta dos tratamentos T2 (105,16 °C) e T3 (105,51 °C) que se mostraram semelhantes. Este fato indica que mudanças na área de aquecimento (como a aproximação do tubo de alumínio da chama) pode acarretar em aumento do aquecimento do ar. Outro fator de eficiência diz respeito a diferença de temperatura do ar no interior do tubo de alumínio, após a passagem sobre o queimador e a chegada deste à entrada da câmara de secagem. Foi verificado que há grande perda de temperatura, sendo: 23,47 °C no T1, 38,22 °C no T2 e 37,01 °C no T3. Neste caso, a ineficiência está relacionado ao isolamento térmico aplicado ao tubo de passagem de ar aquecido, perdendo-se, então, parte da energia térmica para o ambiente.

A correção de problemas no isolamento e a melhoria na eficiência do sistema de aquecimento geram novas hipóteses, sendo: aumento da temperatura de operação, o aumento do volume da câmara de secagem, o aumento da velocidade do ar e a diminuição da quantidade de biogás necessária para operação do sistema. Todos estes

fatores poderiam, assim, aumentar a potencialidade do uso do biogás.

### **3.4. Conclusões**

A utilização da energia térmica do biogás mostrou-se eficaz para o sistema projetado, atendendo aos intervalos de temperatura aplicados na secagem de uma grande variedade de plantas medicinais. O biogás com 60% de CH<sub>4</sub> gerou 3608,64 KJ.h<sup>-1</sup>, 6895,08 KJ.h<sup>-1</sup> e 7603,93 KJ.h<sup>-1</sup> para os tratamentos T1, T2 e T3 respectivamente, no sistema de aquecimento suprimindo a energia para operação da câmara de secagem nas temperaturas de 43,05 °C (T1), 52,56 °C (T2) e 53,56 °C (T3).

A eficiência do sistema demonstrou falhas no isolamento, acarretando em menor aproveitamento térmico no sistema de aquecimento e perda de energia na tubulação de passagem de ar aquecido. Dessa maneira, a correção de falhas podem possibilitar melhor aproveitamento do aquecimento gerado com menor consumo de biogás.

## 4. CONCLUSÕES GERAIS

Por meio deste trabalho pode-se concluir que a utilização de fontes alternativas de energia para o aquecimento de ar e sua utilização em secadores é devidamente possível. As características aqui apresentadas se destacam por apresentar caráter inovador – já que não foram encontrados projetos similares para a finalidade estudada – e também por seus aspectos construtivos, como a utilização de materiais de baixo custo e recicláveis, simplicidade na construção e fácil adaptação.

Como discutido no Capítulo I, o coletor solar construído com garrafas PET mostrou-se funcional para o aproveitamento da radiação solar direta no fornecimento de energia térmica e aquecimento do ar, considerando, assim, que a proposta pode ser utilizada para fins de aquecimento em sistemas de baixa temperatura. Entretanto, há necessidade de estimar a capacidade do aproveitamento líquido da energia térmica gerada. A partir disso será possível a criação de modelos e, assim, o dimensionamento de unidades variadas.

No Capítulo II, o sistema de aquecimento em conjunto com a câmara de secagem mostraram-se eficazes para operação em intervalos de temperatura utilizados na secagem de plantas medicinais. Primeiramente a variação da pressão de operação do compressor demonstrou variação no volume de biogás gerando diferenças na combustão e aproveitamento energético. O biogás com 60% de  $\text{CH}_4$  gerou  $3608,64 \text{ KJ.h}^{-1}$ ,  $6895,08 \text{ KJ.h}^{-1}$  e  $7603,93 \text{ KJ.h}^{-1}$  para os tratamentos T1, T2 e T3 respectivamente, no sistema de aquecimento suprindo a energia para operação da câmara de secagem nas temperaturas de  $43,05 \text{ }^\circ\text{C}$  (T1),  $52,56 \text{ }^\circ\text{C}$  (T2) e  $53,56 \text{ }^\circ\text{C}$  (T3). A eficiência do sistema demonstrou falhas no isolamento, acarretando em menor aproveitamento térmico no sistema de aquecimento e perda de energia na tubulação de passagem de ar aquecido. Dessa maneira, a correção de falhas podem possibilitar melhor aproveitamento do aquecimento gerado com menor consumo de biogás.

Verificado a viabilidade térmica das fontes de energia alternativas avaliadas neste trabalho, sugere-se considerar, para futuros estudos, a integração do coletor solar de garrafa PET com o sistema de aquecimento por biogás, a fim de constituir um sistema híbrido “*SOLAR+BIOGÁS*” potencializando as vantagens constatadas.

## 5. REFERÊNCIAS

BARBOSA, F.F.; BARBOSA, L.C.A.; MELO, E.C.; BOTELHO, F.M.; SANTOS, R.H.S. Influência da temperatura do ar de secagem sobre o teor e a composição química do óleo essencial de *Lippia alba* (Mill) N. E. Brown. **Química Nova**, v. 29, n. 6, p. 1221-1225, dez 2006. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422006000600014&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422006000600014&lng=en&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em: 11 dez. 2012.

BASSO, L.H. **Utilização da energia solar em sistemas de aquecimento de água residencial**. 2008. Universidade Estadual do Oeste do Paraná, UNIOESTE, Cascavel, PR, Brasil, 2008.

BERGLUND, M.; BORJESSON, P.; BÖRJESSON, P. Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production. **Biomass and Bioenergy**, v. 30, n. 3, p. 254-266, mar 2006. Disponível em: <[http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953405001947?\\_alid=1818236882&\\_rdoc=5&\\_fmt=high&\\_origin=search&\\_docanchor=&\\_ct=14149&\\_zone=rslt\\_list\\_item&md5=83b44783e6368e380549f36faa0103a4](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953405001947?_alid=1818236882&_rdoc=5&_fmt=high&_origin=search&_docanchor=&_ct=14149&_zone=rslt_list_item&md5=83b44783e6368e380549f36faa0103a4)>. Acesso em: 27 abr. 2011.

BORBA, E.T.; HARTER-MARQUES, B.; CITADINI-ZANETTE, V. Produção orgânica de calêndula: um estudo de caso. **Ciência Rural**, v. 42, n. 11, p. 2099-2104, nov 2012. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84782012001100030&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782012001100030&lng=en&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em: 8 jan. 2013.

CARVALHO, L.M.; COSTA, J.A.M.; CARNELOSSI, M.A.G. **Qualidade em plantas medicinais**. 1. ed. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2010. p. 54

CAVIGLIONE, J.H.; KIIHL, L.R.B.; CARAMORI, P.H.; OLIVEIRA, D. **Cartas climáticas do Paraná**. Londrina: IAPAR, 2000. CD. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=677>>. Acesso em 4 mar. 2013.

COMETTA, E. **Energia solar - Utilização e empregos práticos**. 2. ed. São Paulo, SP, Brasil: Hemus, 2000. p. 128. Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=OwDj8KiipVoC>>.

CRESESB; GTES; CEPEL. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Ed Especial, Rio de Janeiro, RJ - Brasil: [s.n.], 2004. p. 207. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2004.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2004.pdf)>. Acesso em: 8 fev. 2012.

CUÉLLAR, A.D.; WEBBER, M.E. Cow power: the energy and emissions benefits of converting manure to biogas. **Environmental Research Letters**, v. 3, n. 3, p. 034002, 2008. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1748-9326/3/i=3/a=034002?key=crossref.6a924fab7181eab98db9af39ec5ac756>>.

DESHMUKH, Y.V. **Industrial heating: principles, techniques, materials, applications, an design**. 1. ed. [S.l.]: CRC Press, 2005. p. 767

EKECHUKWU, O.V.; NORTON, B. Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory. **Energy Conversion and Management**, v. 40, n. 6, p. 593-613, abr 1999. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890498000922>>. Acesso em: 16 nov. 2011.

EL-SEBAIL, A. A.; SHALABY, S. M. Solar drying of agricultural products: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 1, p. 37-43, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111003819>>. Acesso em: 25/1/2012.

FERREIRA, E. Projeto técnico do sistema de produção de biogás. **Desenho técnico**. PLANOTEC Assessoria agrônômica e planejamento ambiental, 2010.

FUDHOLI, A.; SOPIAN, K.; RUSLAN, M.H.; ALGHOUL, M.A.; SULAIMAN, M.Y. Review of solar dryers for agricultural and marine products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 1-30, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109001567>>. Acesso em: 6 jul. 2011.

GUIMARÃES, S.K. Produção do Conhecimento Científico e Inovação: desafios do novo padrão de desenvolvimento. **Caderno CRH – Ciência e Recursos Humanos**, v. 24, n. 63, p. 461-465, dez. 2011. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-49792011000300001&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-49792011000300001&lng=en&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em: 19 jan. 2013.

IEA-BIOENERGY. **Biogas Production and Utilisation**. [S.l.: s.n.] 2005. Disponível em: <[www.novaenergie/iea-bioenergy-task37/index.htm](http://www.novaenergie/iea-bioenergy-task37/index.htm)>.

JANJAI, S.; TUNG, P. Performance of a solar dryer using hot air from roof-integrated solar collectors for drying herbs and spices. **Renewable Energy**, v. 30, n. 14, p. 2085-2095, nov 2005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2005.02.006>>. Acesso em: 27 mar. 2012.

JÖNSSON, O.; POLMAN, E.; JENSEN, J.K.; EKLUND, R.; SCHYL, H.; IVARSSON, S. Sustainable gas enters the european gas distribution system. **Danish Gas Technology Center**, 2003. p. 9.

KÖEPPEN, W. **Climatologia**: Con un estudio de los climas de la tierra. Fondo de Cultura Economica, Mexico – Buenos Aires. 3ª ed. 1948.

LETTI, A.G. **Inovação na suinocultura**: A biodigestão no processo de tratamento de dejetos de suínos no município de Toledo - PR. 2010. 109 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Agronegócio) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, Toledo - PR, 2010.

LUCON, O.; GOLDEMBERG, J. Crise financeira, energia e sustentabilidade no Brasil. **Estudos Avançados**, v. 23, n. 65, p. 121-130, 2009. Disponível em:

<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40142009000100009&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142009000100009&lng=en&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em: 20 jun. 2012.

MARCHESE, J.A.; FIGUEIRA, G.M. O uso de tecnologias pré e pós-colheita e boas práticas agrícolas na produção de plantas medicinais e aromáticas. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 7, n. 3, p. 86-96, 2005.

MARTINAZZO, A.P.; MELO, E.C.; CORRÊA, P.C.; SANTOS, R.H.S. Modelagem matemática e parâmetros qualitativos da secagem de folhas de capim-limão [*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf]. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 12, n. 4, p. 488-498, dez. 2010. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-05722010000400013&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-05722010000400013&lng=en&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em: 11 jan. 2013.

MELO, E.C.; RADÜNZ, L.L.; BERBERT, P.A. Secador a gás para plantas medicinais e aromáticas. 2002, In: **ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL**, Campinas, SP, Brasil: [s.n.], 2002. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000022002000200051&script=sci\\_arttext](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000022002000200051&script=sci_arttext)>. Acesso em: 11 jan. 2013.

MELO, E.C.; RADÜNZ, L.L.; MELO, R.C.A.. Influência do processo de secagem na qualidade de plantas medicinais - Revisão. **Engenharia na Agricultura**, v. 12, n. 4, p. 307-315, 2004.

MING, L.C.; FERREIRA, M.I.; GONÇALVES, G.G. Pesquisas agrônômicas das plantas medicinais da Mata Atlântica regulamentadas pela ANVISA. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v. 14, n. spe, p. 131-137, 2012. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-05722012000500001&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-05722012000500001&lng=en&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em: 8 dez. 2012.

MUJUMDAR, A.S. An overview of innovation in industrial drying: current status and R&D needs. **Transport in Porous Media**, v. 66, n. 1-2, p. 3-18, 30 ago. 2006. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11242-006-9018-y>>. Acesso em: 28 nov. 2012.

NEGRI, M.L.S.; POSSAMAI, J.C.; NAKASHIMA, T. Atividade antioxidante das folhas de espinheira-santa - *Maytenus ilicifolia* Mart. ex Reiss., secas em diferentes temperaturas. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 19, n. 2b, p. 553-556, jun. 2009. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-695X2009000400007&lng=en&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-695X2009000400007&lng=en&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em: 8 jan. 2013.

NOGUEIRA, R.C.; DOMINGUES, E.T. Aquecedor solar com material reciclável: um desafio a ser vencido. 2007, In: **II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte de Educação Tecnológica**, João Pessoa, PB, Brasil: CONNEPI, 2007. p. 8.

NONCLERCQ, A.; SPREUTELS, L.; BOEY, C.; LONYS, L.; DAVE, B.; HAUT, B. Construction of a solar drying unit suitable for conservation of food and enhancement of food security in West Africa. **Food Security**, v. 1, n. 2, p. 197-205, 9 abr. 2009. Disponível

em: <<http://www.springerlink.com/index/10.1007/s12571-009-0019-x>>. Acesso em: 9 dez. 2012.

OLIVA, C.A.; SOUZA, J.; SOUZA, S.N.M.; SORDI, A. Potencial de Conservação de Energia nos Processos de Produção em uma Propriedade Rural. In: **Anais do 4<sup>o</sup> Encontro de Energia no Meio Rural**. Campinas, SP, Brasil: [s.n.], 2002. v. 2. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n4v2/109.pdf>>. Acesso em: 17 maio 2011.

OTHMAN, M.Y.H.; SOPIAN, K.; YATIM, B.; DAUD, W.R.W. Development of advanced solar assisted drying systems. **Renewable Energy**, SOUTH/SOUTH, v. 31, n. 5, p. 703-709, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148105002478>>.

PALZ, W. **Energia solar e fontes alternativas**. 2nd ed. São Paulo, SP, Brasil: Hemus, 1995.

QUADROS, D.G. VALLADARES, R.; REGIS, U.; OLIVER, A.; SANTOS, L.S.; ANDRADE, A.P.; FERREIRA, E.J. Produção de biogás e caracterização do biofertilizante usando dejetos de caprinos e ovinos em biodigestor de pvc flexível. 2009, Curitiba - PR: Curitiba: UFPR, 2009. p. 1-10.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2013. Disponível em: <<http://www.r-project.org/>>.

RADÜNZ, L.L.; MELO, E.C.; ROCHA, R.P.; BERBERT, P.A.; GRACIA, L.M.N. Study of essential oil from Guaco leaves submitted to different drying air temperature. **Engenharia na Agricultura**, v. 18, n. 3, p. 241-247, 2010.

RANZI, T.J.D.; ANDRADE, M.A.N. Estudo de viabilidade de transformação de esterqueiras e bioesterqueiras para dejetos de suínos em biodigestores rurais visando o aproveitamento do biofertilizante e do biogás. 2004, In: **Encontro de Energia no Meio Rural**. Campinas, SP, Brasil: [s.n.], 2004. p. 1-12. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000022004000100058&script=sci\\_arttext&lng=pt](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000022004000100058&script=sci_arttext&lng=pt)>. Acesso em: 16 jan. 2013.

ROSEN, M.A. Energy Sustainability: A Pragmatic Approach and Illustrations. **Sustainability**, v. 1, n. 1, p. 55-80, 2009. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2071-1050/1/1/55/>>.

SACHS, I. A revolução energética do século XXI. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p. 21-38, abr. 2007. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40142007000100004&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142007000100004&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em: 27 maio 2011.

SANTOS, B.M. **Metodologia de dimensionamento de sistemas de aquecimento solar para secagem de produtos agrícolas**. 2004, 78 f. Dissertação (Faculdade de Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

SANTOS, B.M.; QUEIROZ, M.R.; BORGES, T.P.F. A solar collector design procedure for crop drying. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 22, n. 2, p. 277-284, jun. 2005. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-66322005000200016&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-66322005000200016&lng=en&nrm=iso&tlng=en)>. Acesso em: 16 nov. 2011.

SANTOS, S.A.F.; NASCIMENTO-FILHO, J. Coletores solares: materiais disponíveis no meio rural. 2002, In: **Encontro de Energia no Meio Rural**, Campinas, SP, Brasil: [s.n.], 2002. p. 1-6. Disponível em: <[http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000022002000100038&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000022002000100038&script=sci_arttext&tlng=pt)>. Acesso em: 27 mar. 2012.

SEADI, T.A.; RUTZ, D.; PRASSL, H.; KÖTTNER, M.; FINSTERWALDER, T.; VOLK, S. **Biogas handbook**. 1<sup>a</sup>. ed. Esbjerg, Denmark: University of Southern Denmark Esbjerg, 2008. p. 126

SHARMA, A.; CHEN, C.R.; LAN, N.V.. Solar-energy drying systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 1185-1210, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032108001251>>. Acesso em: 25 jan. 2012.

SILVA, F.M.; LUCAS JUNIOR, J.; BENINCASA, M.; OLIVEIRA, E. Desempenho de um aquecedor de água a biogás. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 3, p. 608-614, dez. 2005. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-69162005000300005&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162005000300005&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt)>. Acesso em: 29 jun. 2011.

SILVA, J.S.; DONZELLES, S.M.L.; CORRÊA, P.C. Secagem de grãos com energia solar. In: SILVA, J.S. (Org.). **Secagem e armazenamento de produtos agrícolas**. 1. ed. Viçosa - MG - Brasil: Aprenda Fácil, 2000. p. 171-189.

SOARES, R.D. **Secagem de Manjeriço (*Ocimum Basilicum L*), com vistas a preservação do Linalol**. 2006. 84 f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Agronomia) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia – UESB, 2006.

TYAGI, V.V.; PANWAR, N.L.; RAHIM, N.A.; KOTHARI, R. Review on solar air heating system with and without thermal energy storage system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 4, p. 2289-2303, maio 2012. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032111005971>>. Acesso em: 28 mar. 2012.