UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÂO EM ENGENHARIA CIVIL

COLETOR SOLAR PARA PRÉ-AQUECIMENTO DO AR EM SISTEMAS DE SECAGEM
ESTUDO DE CASO – CURA DO TABACO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Martha Lisa Rodrigo Schuck

Santa Maria, RS, Brasil
2012

COLETOR SOLAR PARA PRÉ-AQUECIMENTO DO AR EM SISTEMAS DE SECAGEM
ESTUDO DE CASO – CURA DO TABACO

por

Martha Lisa Rodrigo Schuck

Dissertação apresentada ao curso de mestrado do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. Joaquim César Pizzutti dos Santos

Santa Maria, RS, Brasil
2012

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática
da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Schuck, Martha Lisa Rodrigo
Coletor solar para pré-aquecimento do ar em sistemas de secagem estudo de caso - cura do tabaco / Martha Lisa Rodrigo Schuck.-2012.
105 f.; 30cm

Orientador: Joaquim César Pizzutti dos Santos
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2012

1. Coletor solar 2. Leito de britas 3. Cura do tabaco 4. Estufa à lenha I. Santos, Joaquim César Pizzutti dos II. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÂO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora, abaixo assinada, aprova a dissertação de mestrado

COLETOR SOLAR PARA PRÉ-AQUECIMENTO DO AR EM SISTEMAS DE SECAGEM
ESTUDO DE CASO – CURA DO TABACO

elaborada por

Martha Lisa Rodrigo Schuck

Como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Civil

Comissão examinadora:

_____
Joaquim César Pizzutti dos Santos, Dr.
(Orientador)

_____
Giane de Campos Grigoletti, Dra.

_____
Heitor da Costa Silva, Dr.

Santa Maria, 26 de abril de 2012

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Joaquim César Pizzutti dos Santos, por todos os conhecimentos compartilhados, pela disposição e motivação para que eu conseguisse vencer mais esse desafio.

A Instituição Universidade Federal de Santa Maria, pela disponibilidade da estrutura física e humana que possibilitaram o aprendizado e a realização do mestrado.

Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil pelas lições, dedicação e conhecimentos transmitidos.

Aos colegas de mestrado, pelo apoio fundamental ao desenvolvimento do projeto e amizade.

Ao professor Giovanni S. Andrade pelo auxilio na realização das medições.

Às secretárias do PPGEC, Daisy e Marília, pelo constante auxilio e esclarecimentos de dúvidas.

Aos professores que aceitaram compor a comissão examinadora.

Aos meus irmãos, Bruno e Simone, meus exemplos, pela idéia e incentivo em fazer o mestrado.

Ao meu marido, Nei Eduardo, que foi exímio colaborador em todas as etapas deste trabalho.

À minha mãe, Cora, pela ajuda incondicional e essencial despendida nos cruciais momentos da elaboração do presente trabalho, por seu apoio, otimismo e afeto.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Maria

COLETOR SOLAR PARA PRÉ-AQUECIMENTO DO AR EM SISTEMAS DE SECAGEM
ESTUDO DE CASO – CURA DO TABACO
AUTORA: MARTHA LISA RODRIGO SCHUCK
ORIENTADOR: JOAQUIM CÉSAR PIZZUTTI DOS SANTOS
Local e Data da Defesa: Santa Maria, abril 2012

Em um país como o Brasil, que possui alta incidência de radiação solar, o uso de energia solar é uma alternativa que vem sendo pesquisada e utilizada com muitas vantagens. O presente trabalho apresenta o projeto, a construção e a avaliação da eficiência de um coletor solar plano para pré-aquecimento do ar, executado com materiais de baixo custo, a ser utilizado em sistemas de secagem. O protótipo do coletor solar com leito de britas foi construido para que fossem feitos os levantamentos dos dados de temperatura e umidade relativa do ar, utilizando-se aparelhos registradores (data loggers), e efetuaram-se os cálculos para a determinação do calor útil fornecido pelo coletor. Sendo que no Rio Grande do Sul existem aproximadamente 85.560 propriedades produtoras de tabaco, que totalizam cerca de 91.420 estufas de cura, nas quais a fonte de energia mais utilizada é a lenha, como estudo de caso foi proposta a utilização deste coletor solar como sistema suplementar como aquecimento do ar no processo de cura do tabaco em estufas a lenha existentes. Um processo de cura foi acompanhado para verificação do consumo de lenha necessário para cada fase deste, para que fosse possível determinar a sua demanda energética. Observou-se que a utilização do coletor com $3m^2$ de área proporcionou a redução de 5,2% no consumo de lenha, o que demonstrou a viabilidade econômica da utilização do sistema com tempo de retorno do investimento de 3,4 anos.

Palavras-chave: coletor solar; leito de britas; cura do tabaco; estufa à lenha.

ABSTRACT

Master Thesis
Civil and Environmental Engineering Post-graduate Program
Universidade Federal de Santa Maria

SOLAR COLLECTOR FOR AIR PRE-HEATING ON DRYING SYSTEMS
CASE STUDY - CURING TOBACCO
AUTHOR: MARTHA LISA RODRIGO SCHUCK
ADVISOR: DR. JOAQUIM CESAR PIZZUTTI DOS SANTOS
Place and Date of presentation: Santa Maria, april 2012

In a country like Brazil, which has a high incidence of solar radiation, the use of solar energy is an alternative that has been researched and used with many advantages. This paper presents the design, construction and evaluation of the efficiency of a flat solar collector for pre-heating the air, executed with low cost materials, to be used in drying systems. The prototype of the solar collector with gravel bed was built to be made a survey of data from temperature and relative humidity, using a recording apparatus (data loggers), and carried out the calculations for determining the useful heat provided by the collector. Since in the state of Rio Grande do Sul there are approximately 85,560 farms growing tobacco, accounting to around 91,420 curing barns, for which the widest energy source is firewood, as a case study was proposed to use this solar collector to be used as a supplementary source of heat to the existing curing barns. A case study was conducted on the curing process, verifying the wood consumption needed for each phase of the process in order to determine its energy demands. It was observed that the application of a 3sqm surface collector represented a reduction of around 5.2% in firewood consumption, which demonstrated the economic viability of the system with a time of payback of 3.4 years.

Keywords: solar collector; bed of gravel; curing tobacco; wood-fired oven.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Translação da Terra e localização dos trópicos..... 14

Figura 2- Diagrama esquemático dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre..... 15

Figura 3- Vista Ilustrativa de um Coletor Solar Plano..... 18

Figura 4- Placa Absorvedora com britas..... 24

Figura 5- Placas Absorvedoras com seixos e passagens em ziguezague..... 25

Figura 6- Formas de transferência de calor em um coletor solar com leito armazenador para aquecimento de ar..... 26

Figura 7- Gráfico de η x ($T1$-$Tamb$)/I..... 29

Figura 8- Coletor armazenador de energia..... 33

Figura 9- Vista geral do protótipo do Secador-Solar Multi-Uso para produtos naturais..... 36

Figura 10- Secador de grãos..... 37

Figura 11- Participação mundial dos diferentes tipos de tabaco..... 41

Figura 12- Curva da Umidade Relativa e da Temperatura utilizada na cura do tabaco Flue-Cured..... 43

Figura 13- Gerenciamento cuidadoso da temperatura do ar, da umidade do ambiente e da circulação do ar..... 44

Figura 14- Psicrômetro..... 44

Figura 15- Amostragem em faixa para cubagem da pilha de lenha..... 46

Figura 16- Localização da cidade de Santa Cruz do Sul, RS..... 48

Figura 17- Zoneamento bioclimático para o Brasil..... 49

Figura 18- Representação esquemática do diagrama psicrométrico de Carrier..... 55

Figura 19- Detalhamento do projeto do coletor solar a ar..... 61

Figura 20- Perspectiva ilustrativa do coletor solar a ar..... 62

Figura 21- Corte perspectivado do coletor solar a ar..... 62

Figura 22- Construção da base de tijolos para o coletor solar a ar..... 63

Figura 23- Colocação de lona plástica..... 63

Figura 24- Ventilador na entrada de ar lateral..... 64

Figura 25- Vista do coletor solar a ar com leito de brita..... 64

Figura 26- Aparelho de medição de temperatura (HOBO) e a proteção contra a radiação..... 65

Figura 27- Aparelhos de medição posicionados na saída de ar do coletor..... 66
Figura 28- Cabos para registrar temperaturas no interior do cano de PVC na saída de ar do coletor..... 66
Figura 29- Anemômetro Digital..... 67
Figura 30- Estufa a lenha em estudo..... 70
Figura 31- Fornalha da estufa a lenha em estudo..... 70
Figura 32- Perspectivas ilustradas da estufa..... 71
Figura 33- Fluxo de calor nos dutos de aço galvanizado no interior da estufa..... 72
Figura 34- Modelo esquemático do psicrômetro tipo bulbo úmido e bulbo seco..... 74
Figura 35- Psicrômetro tipo bulbo úmido e bulbo seco..... 74
Figura 36- Módulo de aquisição de dados de temperatura e umidade relativa..... 76
Figura 37- Planta baixa da estufa com localização dos pontos de medições..... 77
Figura 38- Corte da estufa com localização dos pontos de medições..... 77
Figura 39- Coletor solar acoplado em estufa à lenha existente..... 79
Figura 40- Temperatura horária média do ar na entrada e na saída do coletor..... 81
Figura 41- Média de temperaturas de entrada e de saída do coletor dos três dias de céu claro 82
Figura 42- Calor Útil fornecido pelo coletor..... 83
Figura 43- Calor Útil da média dos três dias de céu claro..... 84
Figura 44- Demanda de energia e total de lenha ao longo do período de coleta de dados..... 86
Figura 45- Economia na demanda energética da cura do tabaco..... 87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Fatores que afetam a intensidade da radiação em uma superfície..... 15

Tabela 2- Dias Médios de cada mês..... 16

Tabela 3- Calor específico e Massa Volumétrica de diferentes materiais..... 22

Tabela 4- Relação do tamanho da brita e superfície de troca..... 23

Tabela 5- Dados referentes ao módulo de aquisição..... 65

Tabela 6- Dados referente ao instrumento de aquisição de dados..... 76

Tabela 7- Consumo de lenha durante o processo de cura acompanhado..... 78

Tabela 8- Extração de três dias de medições da tabela do Anexo 1 com cálculo de entalpia e calor útil..... 83

Tabela 9- Extração de três dias de medições da tabela do Anexo 2 com cálculo de demanda e redução de lenha..... 85

Tabela 10- Custo de construção do coletor armazenador de energia.... 87

Tabela 11- Retorno de investimento para o protótipo de $3m^2$..... 88

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO..... 12
1.1 Objetivos..... 13
1.1.1 Objetivo Geral..... 13
1.1.2 Objetivos específicos..... 13

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... 14
2.1 Radiação Solar..... 14
2.2 Coletores Solares..... 16
2.2.1 Coletores Planos..... 17
2.2.2 Coletores Planos a Ar..... 20
2.2.3 Acumulação do Calor..... 21
2.2.3.1 Escolha do material de acumulação..... 21
2.2.3.2 Forma e dimensão dos elementos de acumulação..... 23
2.2.3.3 A relação superfície de troca/volume das britas 23
2.2.3.4 Perda de carga da cuba..... 24
2.2.4 Desempenho dos Coletores Planos..... 25
2.2.5 Leitos empacotados e placas armazenadoras de energia..... 30
2.3 Uso de coletores solares no agronegócio..... 33
2.4 Cura do Tabaco..... 40
2.4.1 Origem..... 40
2.4.2 Tipos de Tabaco..... 40
2.4.3 Processo de Cura do tabaco Virgínia (*Flue-Cured*) 41
2.4.4 Poder calorífico da lenha eucalipto..... 45
2.5 Características do clima na região central do Rio Grande do Sul e na cidade de Santa Cruz do Sul – RS..... 47
2.6 Conceitos térmicos fundamentais..... 49
2.6.1 Propriedades térmicas dos materiais..... 49
2.6.1.1 Condutividade Térmica (λ)..... 49
2.6.1.2 Densidade (ρ)..... 50
2.6.1.3 Calor Específico (*cp*)..... 51
2.6.1.4 Calor Específico Volumétrico (c_v)..... 51
2.6.1.5 Difusividade (a) e Efusividade Térmica (b)..... 52

2.6.2 Propriedades térmicas dos componentes..... 52
2.6.2.1 Capacidade Térmica (C_T)..... 53
2.6.2.2 Resistência Térmica (R)..... 53
2.6.2.3 Transmitância Térmica (U)..... 54
2.6.3 Propriedades do ar úmido – Psicrometria..... 55
2.6.3.1 Temperaturas de bulbo seco (T) e de bulbo úmido (Tm)..... 56
2.6.3.2 Umidade absoluta (W)..... 57
2.6.3.3 Umidade relativa (f)..... 57
2.6.3.4 Volume específico (V')..... 58
2.6.3.5 Entalpia (H)..... 58

3 MATERIAIS E MÉTODOS..... 60
3.1 Coletor solar a ar com leito de britas..... 60
3.1.1 Projeto do coletor solar a ar com leito de britas..... 60
3.1.2 Construção do protótipo do coletor solar a ar com leito de britas..... 63
3.1.3 Avaliação do protótipo do coletor solar a ar com leito de britas..... 64
3.1.3.1 Equipamentos de medições..... 65
3.1.3.2 Determinação do calor útil fornecido 68
3.2 Estudo de caso – Cura do tabaco..... 69
3.2.1 Modelo de estufa considerado..... 69
3.2.2 Estudo experimental da estufa..... 72
3.2.2.1 Equipamentos..... 73
3.2.2.2 Pontos de medição no interior da estufa..... 76
3.2.3 Consumo de lenha..... 78
3.2.4 Proposta de acoplamento do coletor solar às estufas a lenha existentes..... 79

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS..... 80
4.1 Rendimento do Sistema..... 80
4.1.1 Calor Útil (Q_u) fornecido pelo coletor..... 82
4.2 Estudo de caso – Cura do tabaco com o uso do coletor solar..... 84
4.2.1 Demanda de energia e lenha do processo de cura..... 84
4.2.2 Economia na demanda energética da cura do tabaco com o uso do coletor solar..... 86
4.2.3 Viabilidade econômica de uso do coletor solar na secagem do tabaco..... 87

5 CONCLUSÃO..... 89

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 91

ANEXO 01..... 95
ANEXO 02..... 100

1 INTRODUÇÃO

O sol é uma fonte perene, silenciosa e não poluente de energia, sendo responsável por todas as formas de vida no nosso planeta. Diariamente o sol transmite uma grande quantidade de energia através de ondas eletromagnéticas. Ao chegar a Terra, é responsável pelos fenômenos que ocorrem na atmosfera sendo a principal fonte de energia externa que interage com os gases atmosféricos. Porém, a maior parte dessa energia não é absorvida pelos gases que compõe a atmosfera, chegando à superfície terrestre. Essa energia gera todos os processos naturais, como a fotossíntese que combina a energia luminosa do sol com o dióxido de carbono da atmosfera para armazenar energia nas plantas.

Essa energia pode ser utilizada para diversas finalidades, substituindo, em muitos casos, com vantagens, outras formas convencionais de energia que vêm sendo utilizadas pelo homem há décadas. O interesse por fontes alternativas de energia vem crescendo muito nos últimos anos. A energia solar é uma forma absolutamente pura, não poluente, não produz fumaça e nem resíduos radioativos. Constitui-se, portanto, uma forma ideal de energia tendo em vista a proteção ao meio ambiente.

Em um país como o Brasil, que possui uma grande extensão territorial, sendo grande parte situada na zona tropical, com alta incidência de radiação solar, torna-se possível desenvolver tecnologias capazes de transformar a energia solar em energia térmica, elétrica, química, etc., mas sua utilização é ainda muito reduzida.

O uso de energia solar é uma alternativa que vem sendo pesquisada e já utilizada com muitas vantagens, como para aquecimento de água ou outro líquido, cozimento de alimentos em fogões solares, conversão termoelétrica, fotovoltaica e fotoquímica, secagem de grãos da agricultura, etc.

Este trabalho visa projetar, construir e avaliar a eficiência de um coletor solar plano para pré-aquecimento do ar, com materiais de baixo custo, a ser utilizado em sistemas de secagem. Como estudo de caso, foi proposto a utilização deste coletor solar como sistema de pré-aquecimento do ar para a cura do tabaco em estufas a lenha existentes, suplementando o calor necessário no processo.

No Brasil, a fonte de energia mais utilizada para a cura do tabaco tem sido a lenha, que para o momento, dado os tipos de estufas utilizadas, tem-se apresentado economicamente como a melhor alternativa. No Rio Grande do Sul existem

aproximadamente 85.560 propriedades produtoras de tabaco, que totalizam cerca de 91.420 estufas de cura. A lenha é o terceiro energético primário consumido no Brasil, com um valor médio, nos últimos 26 anos, de 9,78 x 107 toneladas/ano.

Como principais vantagens do emprego de energia solar com esta finalidade, podemos citar:

- Uso de fonte limpa de energia, ao contrário da lenha, que durante o processo de combustão, libera CO_2;
- Vantagem econômica, especialmente em pequenas propriedades, uma vez que, depois de instalado, o custo do seu funcionamento é pequeno e diminuirá o emprego da lenha.

1. 1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Projetar, construir e avaliar a eficiência de um coletor solar plano para pré-aquecimento do ar, com materiais de baixo custo, a ser utilizado em sistemas de secagem e avaliar a potencialidade de sua utilização como sistema suplementar na cura do tabaco.

1.1.2 Objetivos Específicos

a) Desenvolver o anteprojeto e a construção de um coletor solar armazenador de energia plano a ar com materiais de baixo custo.
b) Avaliar o coletor solar através de medições *in loco* de temperatura do ar e umidade relativa.
c) Calcular o calor útil fornecido pelo coletor.
d) Desenvolver um estudo de caso propondo a utilização do coletor solar como sistema suplementar na cura do tabado em estufas a lenha existentes e avaliar a sua viabilidade econômica.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 Radiação Solar

A radiação solar é a principal fonte de energia para o planeta, tanto como fonte de calor quanto como fonte de luz (LAMBERTS et. al. (1997).

A radiação solar é uma energia eletromagnética, de onda curta, que atinge a Terra após ser parcialmente absorvida pela atmosfera. A maior influência da radiação solar é na distribuição da temperatura do planeta. As quantidades de radiação variam em função da época do ano e da latitude (FROTA; SCHIFFER, 2001).

Segundo Lamberts et. al. (1997), no movimento de translação, a Terra percorre uma trajetória elíptica em um plano inclinado de 23°27' em relação ao plano do equador. É este o ângulo que define a posição dos trópicos e isto faz com que os dois hemisférios terrestres recebam quantidades distintas de radiação solar ao longo do ano, caracterizando as estações pelos solstícios de verão e de inverno ("c" e "a") e pelos equinócios de primavera e de outono ("b" e "d"), conforme a Figura 1.

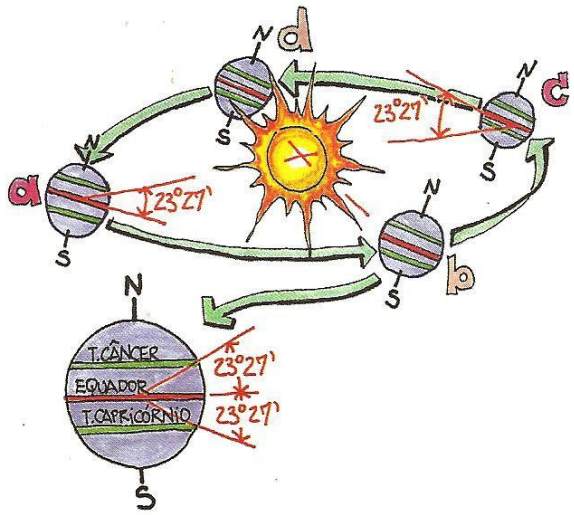

Figura 1 – Translação da Terra e localização dos trópicos
Fonte: Lamberts et. al.(1997)

A Figura 2 apresenta um diagrama com os principais processos de interação da radiação solar e da radiação térmica na atmosfera. Trata-se de um esquema simplificado dos processos envolvidos no balanço radiativo do planeta, onde apenas

o efeito médio global de todos os processos está representado. O valor de cada componente pode variar de uma região para outra do planeta e de um período do ano para outro (HARRISON et al, 1993).

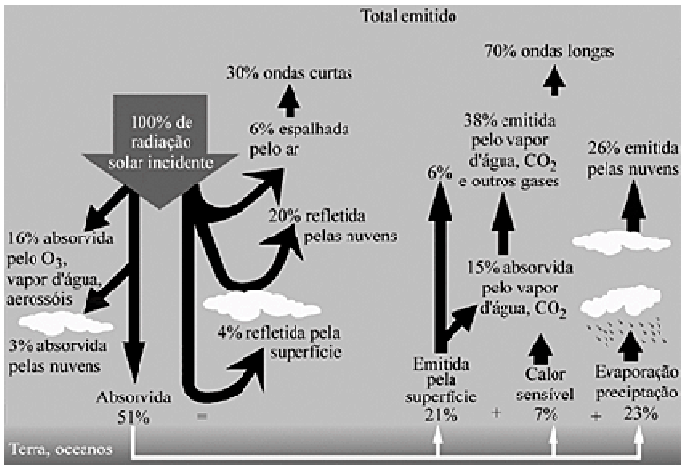

Figura 2 - Diagrama esquemático dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre
Fonte: Harrison et al. (1993)

Robinson (1966) enumera os fatores que influenciam a intensidade da radiação incidente sobre a superfície terrestre conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Fatores que afetam a intensidade da radiação em uma superfície

Tipo de Fator	Fatores
Astronômico	O espectro solar entre 0,30μ e 5,0μ e a magnitude da constante solar Distância Terra-Sol Declinação solar Ângulo horário
Geográfico	Latitude do local Longitude do local Altitude do local
Geométrico	Altitude do sol Azimute do sol Inclinação da superfície Azimute da superfície
Físicos	Absorção pela atmosfera Conteúdo de água na atmosfera Coeficiente de turbidez O expoente α na fórmula de turbidez de Angström-Schüepp. Conteúdo de ozônio na atmosfera.

Tabela 1 (continuação) - Fatores que afetam a intensidade da radiação em uma superfície

Tipo de Fator	Fatores
Meteorológico	Nuvens no céu
	Albedo dos arredores

Fonte: Robinson (1966)

Duffie & Beckman (1991) consideram a média mensal da radiação solar diária como suficiente à precisão necessária para que sejam levadas em conta as variações climáticas ao longo do ano. O procedimento seguido geralmente é a utilização dos dados de um único dia de cada mês, como dia médio, representando assim, a média mensal da radiação extraterrestre. De acordo com Duffie e Beckman (1991) são adotados os dias da Tabela 2.

Tabela 2 - Dias Médios de cada mês

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Dia Médio	17	16	16	15	15	11	17	16	15	15	14	10

Fonte: Duffie & Beckman (1991)

Para o cálculo da intensidade das parcelas de radiação, podemos adotar o céu claro, ou o céu médio, considerando um número médio de horas de sol ao longo do dia.

2.2 Coletores Solares

Segundo Kalougirou (2004), o coletor solar é um tipo especial de trocador de calor que transforma a energia da radiação solar em energia térmica. É um dispositivo que absorve a radiação solar, converte-a em calor, e transfere esse calor por um fluido (geralmente ar, água ou óleo) ao acumulador. A energia solar coletada é transportada do fluido circulante diretamente para o espaço de condicionamento ou a um tanque de armazenamento de energia térmica a partir do qual pode ser retirada para uso a qualquer momento.

Coletores solares devem ter alta transmissividade e absortividade de radiação solar. Eles perdem energia por convecção, radiação, sendo desejável que a emitância da superfície seja a mais baixa possível para reduzir as perdas por radiação (DUFFIE e BECKMAN, 1980).

Existem basicamente dois tipos de coletores solares: os sem concentração e os de concentração. Os coletores sem concentração, chamados coletores planos, têm a mesma área para interceptar e para absorver radiação solar, enquanto um coletor solar de concentração tem geralmente superfície côncava de reflexão para interceptar e concentrar a radiação do sol para um feixe menor de área de recepção, aumentando assim o fluxo de radiação (KALOUGIROU, 2004).

Nesta revisão, serão apresentados apenas os tipos de coletores sem concentração (coletores planos).

2.2.1 Coletores Planos

Os coletores planos vêm sendo construídos em uma ampla variedade de formas e com diferentes materiais. Eles vêm sendo usados para aquecer fluidos como água ou ar. Sua principal finalidade é coletar a maior quantidade de energia solar possível com o menor custo. O coletor também deve ter uma vida longa e eficaz, apesar dos efeitos da radiação ultravioleta do sol, corrosão e entupimento devido à acidez, alcalinidade ou solidez do fluido de transferência do calor, congelamento da água, acúmulo de poeira ou umidade sobre o vidro ou a quebra do vidro devido à dilatação, granizo, vandalismo ou outras causas. Essas causas podem ser minimizadas com o uso de vidro temperado (KALOUGIROU, 2004).

Segundo Kalougirou, (2004), quando a radiação solar passa através de uma superfície transparente e incide na superfície “negra” absorvedora de energia solar, uma grande porção dessa energia é absorvida pela própria superfície e depois transferida para o fluido para ser utilizado ou armazenado. A parte inferior e as laterais da placa absorvedora devem ser bem isoladas para reduzir as perdas de calor por condução.

A superfície transparente é usada para diminuir as perdas por convecção da placa absorvedora para a atmosfera através da camada de ar estagnado entre elas. Isso também diminui as perdas por radiação do coletor, já que o vidro é transparente às ondas curtas da radiação solar, mas é opaca às ondas longas da radiação térmica emitida pela placa absorvedora (efeito estufa).

Os coletores devem ser orientados diretamente para a linha do equador, orientados para o sul no hemisfério norte e para o norte no hemisfério sul. O ângulo de inclinação ideal do coletor é igual à latitude do local com variações de ângulo de

10 a 15º, para mais ou para menos dependendo da aplicação (KALOUGIROU, 2004).

Segundo Kalougirou (2004), um coletor plano consiste geralmente dos seguintes componentes, mostrados na Figura 3:

- **Cobertura Transparente:** uma ou mais camadas de vidro ou outro material que transmite radiação e evita perdas por convecção.
- **Tubos, barbatanas ou passagens**: para conduzir ou direcionar o fluido de transferência de calor da entrada à saída.
- **Placa Absorvedora de Calor**: planas, onduladas ou com ranhuras, para encaixar os tubos, barbatanas ou passagens. Os tubos também podem ser integrados à placa absorvedora.
- **Cabeçalhos**: para admitir e descarregar o fluido.
- **Isolamento**: para minimizar a perda de calor no fundo e nas laterais do coletor.
- **Recipiente ou caixa**: para reunir os componentes acima mencionados e mantê-los livre de poeira, umidade, etc.

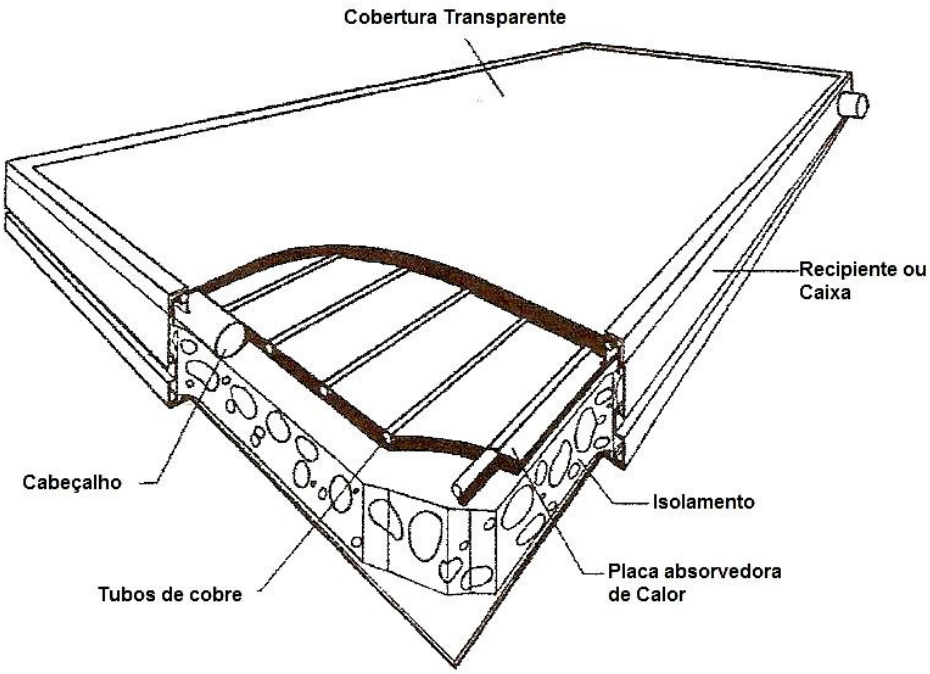

Figura 3 – Vista Ilustrativa de um Coletor Solar Plano
Fonte: adaptado de Kalougirou (2004)

a) Cobertura Transparente

Os vidros são muito usados nos coletores solares, pois transmitem até 90% das ondas curtas da radiação solar (KALOUGIROU, 2004).

Esta radiação irá entrar no coletor aquecendo seu interior, principalmente a placa absorvedora, e esta, por sua vez, emitirá radiação de ondas longas às quais o vidro é opaco. Logo, a energia emitida pela placa coletora não sairá facilmente do aparelho, contribuindo este processo para o aquecimento mais rápido do sistema. Verifica-se assim o efeito estufa.

Vidros com baixo teor de ferro têm relativamente uma alta trasmitância para a radiação solar (aproximadamente 0,85-0,90 em incidência normal), mas a transmitância é essencialmente zero para as ondas longas da radiação solar (5,0-50µm) emitidas pelas superfícies aquecidas pelo sol (KALOUGIROU, 2004).

Plásticos transparentes também possuem alta transmitância de ondas curtas, mas plásticos são geralmente limitados nas temperaturas que podem sustentar sem se deteriorar ou sofrer alterações dimensionais. Apenas alguns tipos de plásticos podem resistir à radiação ultravioleta do sol por longos períodos de tempo. No entanto, eles não podem ser quebrados pelo granito ou pedras, e, na forma de lonas, são flexíveis e tem pouca massa.

O vidro deve permitir a entrada do máximo possível de radiação solar e reduzir ao máximo a perda de calor. Entretanto o vidro é virtualmente opaco às ondas longas de radiação emitidas placas coletoras, a absorção dessa radiação causa um aumento na temperatura do vidro e uma perda de calor para a atmosfera por radiação e convecção.

Vários protótipos de coletores planos cobertos por materiais transparentes foram construídos e testados na última década (SCHWEIGER, 1997). Materiais de isolamento transparentes, baratos e resistentes à alta temperatura foram desenvolvidos de tal forma que a comercialização desses coletores torna-se a cada dia mais viável segundo Schweiger (1997).

b) Placas Absorvedoras de Calor:

A placa coletora deve absorver o máximo possível da radiação que passa através do vidro, devendo perder o mínimo de calor possível para cima, para a atmosfera, e para baixo, para o fundo da caixa. As placas do coletor transferem o calor retido para o fluido de transporte. Absortância de ondas curtas da radiação

solar na superfície do coletor depende da natureza e cor do revestimento e do ângulo de incidência. Normalmente a cor preta é usada, no entanto várias cores de revestimento têm sido propostas, principalmente por razões estéticas (TRIPANAGNOSTOPOULOS et al., 2000).

Um coletor solar eficiente deve absorver a radiação solar incidente, convertê-la em energia térmica e levar essa energia ao meio de transferência de calor com mínimas perdas a cada etapa. É possível usar vários princípios de projeto e mecanismos físicos para criar uma superfície seletiva de absorção solar. Absorvedores solares são baseados em duas camadas com diferentes propriedades óticas, que são descritas como absorvedores “alinhados” (*tandem*). Um revestimento semicondutor ou dielétrico com alta absortância solar e alta transmitância à radiação infravermelha sobre um material altamente refletivo não seletivo, assim como o metal, constitui um tipo de absorvedor “alinhado”. Outra alternativa é revestir um material altamente absorvente não seletivo com um refletor de calor com alta transmitância solar e alta refletância infravermelha (WACKELGARD et al., 2001).

Para os coletores de fluido aquecido, os tubos condutores devem estar integrados ou firmemente ligadas à placa absorvente. Um dos principais problemas é conseguir obter uma boa ligação térmica entre os tubos e as placas absorvedoras, sem incorrer em custos excessivos de trabalho ou materiais. Os materiais mais freqüentemente utilizados para as placas colectoras são o cobre, o alumínio e o aço inoxidável. Extrusões de plástico resistentes à Ultravioleta são utilizadas para aplicações a baixa temperatura (KALOUGIROU, 2004).

2.2.2 Coletores Planos a Ar

Tal como os coletores a água, os coletores planos a ar compreendem:

- Absorvedor;
- Cobertura transparente, que realiza o efeito estufa e
- Caixotão isolante, que protege o conjunto e o torna estanque.

Segundo Cabirol e Roux (1984), a diferença essencial reside na concepção do absorvedor, que deve transmitir o calor ao ar e não à água. Os coeficientes de troca do absorvedor com a água atingem facilmente 2000$\frac{W}{m^2 °C}$, assim, para transmitir

800 W/m^2 (que é o máximo), a diferença de temperatura entre o absorvedor e a água deve ser de 0,4^{o}C.

Para o ar, ao contrário, os coeficientes de troca são dificilmente superiores a 30 $\frac{W}{m^2 °C}$, considerando as velocidades usadas nos sistemas de aquecimento a ar. Para transmitir 800 W/m^2, o absorvedor deve estar a 27°C acima da temperatura do ar a aquecer. Nestas condições, o ar estando a 25°C, o absorvedor está a 52°C, o que resulta em perdas grandes e maus rendimentos de captação (CABIROL E ROUX, 1984).

Para reduzir-se esta diferença de temperatura, deve-se aumentar a superfície de troca do absorvedor para 4m^2 ou 5m^2 por metro quadrado de envidraçamento para diferenças aceitáveis de 4°C a 5°C (CABIROL E ROUX, 1984).

Partindo destas observações, distinguem-se dois tipos de absorvedores: os absorvedores em metal em várias camadas e os absorvedores de lâminas.

Observa-se que, nos sistemas que permitem a circulação do ar contra o vidro, esta passagem renovada provoca, a longo prazo, uma acúmulo de sujeira na face interna e, portanto, uma perda de rendimento. É preciso prever a desmontagem regular da cobertura transparente para se fazer a limpeza.

2.2.3 Acumulação do Calor

O ar aquecido pelos coletores circula no recipiente ou caixa em contato com os corpos que absorvem, acumulam o calor.

Estes corpos devem, por sua vez:

a) ser de materiais com grande capacidade calorífica, para limitar o volume do acumulador;
b) apresentar uma grande superfície de troca (forma e dimensão dos elementos básicos do acumulador).

2.2.3.1 Escolha do material de acumulação

O calor armazenado num corpo de massa *m*, cuja temperatura passa de T_1 a T_2, é igual ao produto do seu calor específico pela sua massa e pela diferença de temperatura (T_2 - T_1):

$$Q = mc\ (T_2 - T_1) \quad (1)$$

Onde:

Q= calor útil

m= massa do corpo

c= calor específico do material que compõe o corpo

T= temperatura

A característica mais importante para a construção do acumulador é a quantidade de calor que se pode armazenar por unidade de volume de matéria (metro cúbico, por exemplo), que é dada pelo produto do calor específico do material pela sua densidade de massa aparente. A Tabela 3 apresenta o calor específico e a densidade de massa aparente de diferentes materiais, segundo ABNT (2005b)

Tabela 3 – Calor específico e Massa Volumétrica de diferentes materiais

Material	Calor específico (C)	Densidade de massa aparente (ρ)
Vidro	0,84 kJ/(kg.K)	2500 kg/m^3
Concreto	1,00 kJ/(kg.K)	2200 - 2400 kg/m^3
Brita ou Seixo	0,80 kJ/(kg.K)	1000 -1500 kg/m^3
Tijolo	0,92 kJ/(kg.K)	1000 - 1300kg/m^3

Fonte: ABNT NBR 15220-2 (2005b)

É preciso, portanto, cerca de duas vezes maior quantidade de material, como concreto, pedra ou tijolo, do que água para armazenar a mesma quantidade de calor.

Como é preciso haver uma superfície grande de troca grande entre o acumulador e o ar que vem dos captadores, a acumulação faz-se por empilhamento de tijolos, seixos ou pequenos blocos de concreto entre os quais o ar pode circular liberando calor. O volume total destes tipos de aprivisionamento é superior ao dobro do volume de aprovisionamento que teria sido instalado em um acumulador a água equivalente.

Para diminuir o volume de acumulação é possível utilizar o calor latente de certos materiais. Com efeito, a mudança de estado de um corpo (fusão, solidificação) permite armazenar ou restituir grandes quantidades de calor, a temperatura constante e em pequenos volumes.

2.2.3.2 Forma e dimensão dos elementos de acumulação

São as britas ou seixos os mais utilizados, oferecendo as vantagens seguintes:

- facilidade de obtenção;
- baixo custo;
- facilidade de instalação (pá mecânica);
- bom poder acumulador;
- insensibilidade ao gelo, corrosão, etc.;
- a forma das britas ou seixos permite, quando amontoados, a circulação do ar.

No caso do uso deste material devemos considerar os seguintes parâmetros:

superfície de troca (superfície do seixo em contato com o ar);

resistência oposta à passagem do ar pelo empilhamento dos elementos do acumulador (perda de carga)

poder acumulador do material escolhido.

2.2.3.3 A relação superfície de troca/volume das britas

Quanto maior for a brita, menor é a superfície de troca em relação ao seu volume. A Tabela 4 mostra a relação de uma esfera de 20cm com uma de 2 cm de diâmetro.

Tabela 4 – Relação do tamanho da brita e superfície de troca

	Esfera **Diâmetro 20 cm**	**Esfera** **Diâmetro 2 cm**
Superfície $\boldsymbol{S = 4\pi R^2}$	1.260 cm^2	12,6 cm^2
Volume $V = \frac{4}{3\pi} R^3$	4.190 cm^3	4,19 cm^3
$Relação \frac{Superfície}{Volume} = \frac{S}{V}$	0,3	3

Fonte: adaptado de Cabirol e Roux (1984)

Para se obter a mesma superfície de troca, é preciso dez vezes mais matéria sob a forma de bolas de 20 cm de diâmetro do que sob a forma de esferas de 2cm de diâmetro.

2.2.3.4 Perda de carga da cuba

Quanto mais pequenos forem os seixos, maior é a perda de carga criada pela cuba, daí a necessidade de ventiladores de potências elevadas. Note-se que o fluxo de ar varia entre 100m^3/h e 200 m^3/h por metro quadrado de coletor solar. Isto resulta em grandes fluxos nos circuitos, cerca de 3000 m^3/h para uma instalação de 20m^2 de coletores. Na prática, usam-se britas com 8 cm de diâmetro médio.

Além disso, a seção de passagem do ar entre as britas deve ser pelo menos igual à seção das entradas de ar do sistema, o que leva a dividir o acumulador em cavidade de seção quase quatro vezes maior ao dos condutores do ar ao acumulador.

Para que o acumulador seja efetivamente útil, a totalidade de volume das britas deve estar em contato com o ar de circulação não devendo haver nele nem "zonas mortas" nem espaços sem britas. Com efeito, as zonas mortas não são úteis às trocas de calor e os espaços sem britas são passagens preferenciais que o ar atravessa sem ceder o calor solar que transporta (Figura 4).

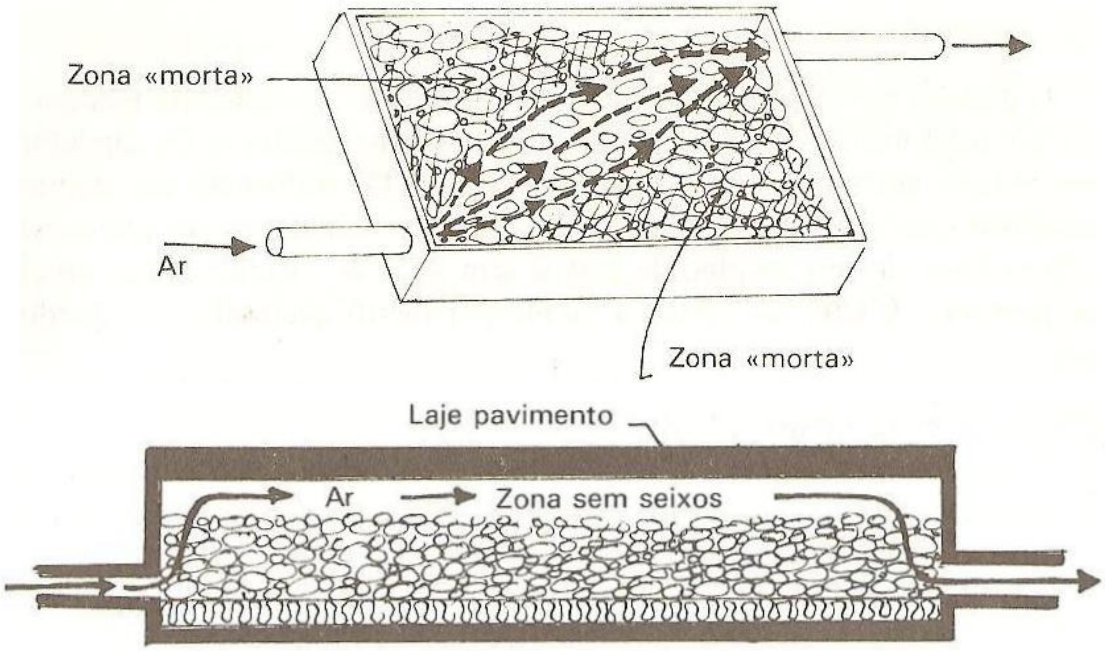

Figura 4 – Placa Absorvedora com britas
Fonte: Cabirol e Roux (1984)

Mesmo que não haja zonas sem britas, a circulação deve ser organizada (passagens em zigue-zague, etc.) para que o ar circule por todo o acumulador, como pode-se observar na Figura 5.

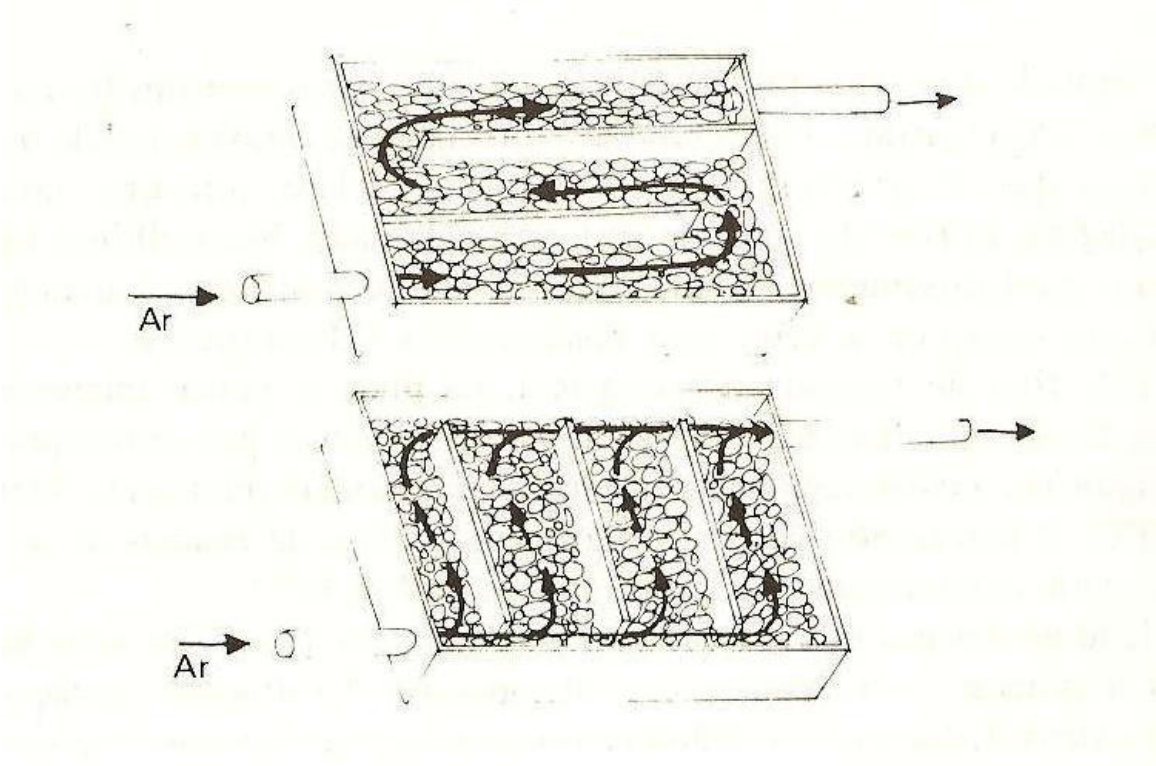

Figura 5 – Placas Absorvedoras com britas e passagens em zigue-zague
Fonte: Cabirol e Roux (1984)

2.2.4 Desempenho dos Coletores Planos

Existem diversos tipos de coletores planos, cujas principais diferenças referem-se ao tipo da placa coletora e ao escoamento do fluido a ser aquecido. Os coletores planos convencionais utilizam placas feitas com materiais de alta condutividade e baixa inércia térmica (massa térmica, capacidade calorífica), principalmente metais (alumínio, aço, cobre). Já os coletores armazenadores possuem elevada inércia térmica, sendo suas placas feitas com materiais como concreto ou pedras britadas.

O primeiro estudo detalhado da eficiência de coletores de energia solar de placas planas baseado nos balanços de energia e nas medições experimentais nos equipamentos foi realizado por Hottel e Woertz em1942. Os cálculos das perdas de energia feitos por estes autores foram posteriormente modificados por Tabor (Apud DUFFIE e BECKMAN, 1991), através do uso de novas correlações para

transferência de calor por convecção entre duas placas planas, incluindo também valores para emitância dos vidros. Estas correlações permitiram estimar perdas de energia no coletor com superfícies seletivas, pois pelo método anterior não eram obtidos resultados satisfatórios. No ano seguinte, no Laboratório de Energia Solar da Universidade do Arizona, Bliss (1959) combinou em um único fator todas as variáveis que influenciam a eficiência de coletores solares de placas planas. Este fator foi de extrema importância em projetos e cálculos de vários tipos de coletores, sendo este trabalho ainda uma importante fonte de referência (GOMES, 1998).

A Figura 6 ilustra os parâmetros envolvidos nos fenômenos de transferência de calor em um coletor solar para aquecimento de ar (SANTOS, 2004).

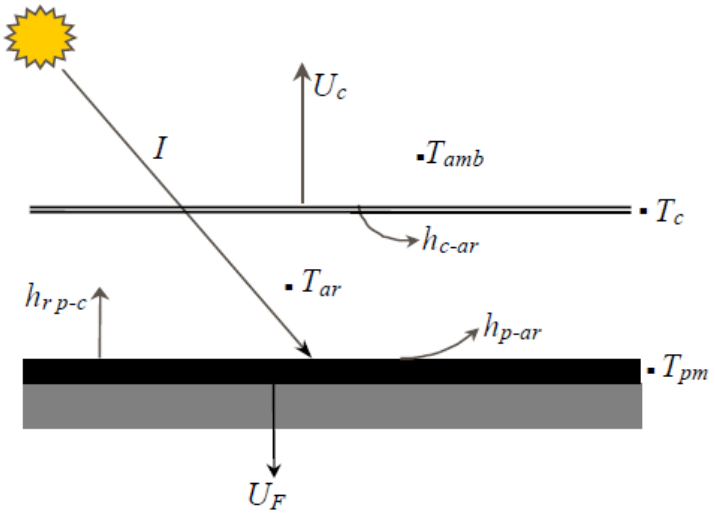

Figura 6 - Formas de transferência de calor em um coletor solar com leito armazenador para aquecimento de ar
Fonte: Santos (2004)

onde:

I = fluxo de radiação solar incidente (W/m^2).

UF = coeficiente global de transferência de calor pelo fundo do coletor (W/m^2 °C).

U_c = coeficiente global de transferência de calor pela cobertura do coletor (W/m^2°C).

$h_{p\text{-}ar}$ = coeficiente de transferência de calor por convecção entre o leito de pedras e o ar (W/m^2°C).

$h_{c\text{-}ar}$ = coeficiente de transferência de calor por convecção entre a cobertura e o ar (W/m^2 °C).

$h_{r\ p\text{-}c}$ = coeficiente de transferência de calor por radiação entre o leito de pedras e o ar (W/m^2 °C).

T_{amb} = temperatura ambiente (°C).

T_c = temperatura média da cobertura (°C).
T_{pm} = temperatura média da placa (°C).
T_{ar} = temperatura média do ar (°C).

O fluxo de radiação solar absorvida pelo coletor por unidade de área, em uma unidade de tempo, S, é definida como o produto entre a radiação solar incidente e as perdas óticas, sendo expressa pela equação:

$$S = I(\tau\alpha) \tag{2}$$

onde:
I = fluxo de radiação solar incidente (W/m^2).
($\tau\alpha$) = produto entre transmitância do vidro (τ) e a absortância da placa (α).

O desempenho de um coletor solar é descrito por um balanço de energia envolvendo o ganho de energia útil e as perdas térmicas e ópticas:

Cobertura(c): $$U_c(T_c - T_{amb}) + h_{c-ar}(T_c - T_{ar}) = h_{rp-c}(T_{pm} - T_c) \tag{3}$$

Placa absorv. (p): $$U_F(T_{pm} - T_{amb}) + h_{p-ar}(T_{pm} - T_{ar}) + h_{r\,p-c}(T_{pm} - T_c) = S \tag{4}$$

Ar: $$h_{c-ar}(T_c - T_{ar}) + h_{p-ar}(T_{pm} - T_{ar}) = Q_u \tag{5}$$

onde:
Q_U = taxa de calor útil (transferido da placa coletora para o fluido), por unidade de área (W/m2).

Isolando (T_{pm}-T_{ar}) e (T_c-T_{ar}), e resolvendo para Q_u tem-se (DUFFIE e BECKMAN, 1991):

$$\mathrm{Q_u} = F'[S - U_L(T_{ar} - T_{amb})] \tag{6}$$

$$\mathrm{F'} = \frac{\mathrm{h_{r_{p-c}}\,h_{c-ar} + U_c h_{p-ar} + h_{p-ar} h_{r_{p-c}} + h_{c-ar} h_{p-ar}}}{\left(\mathrm{U_c + h_{r_{p-c}} + h_{c-ar}}\right)\left(\mathrm{U_F + h_{p-ar} + h_{r_{p-c}}}\right) - \mathrm{h^2_{r_{p-c}}}} \tag{7}$$

$$\mathrm{U_L} = \frac{(\mathrm{U_F + U_c})\left(\mathrm{h_{p-c} h_{c-ar} + h_{p-ar} h_{r_{p-c}} + h_{c-ar} h_{p-ar}}\right) + \mathrm{U_F U_c}\left(\mathrm{h_{c-ar} + h_{p-ar}}\right)}{\mathrm{h_{r_{p-c}} h_{c-ar} + U_c h_{p-ar} + h_{p-ar} h_{r_{p-c}} + h_{c-ar} h_{p-ar}}} \tag{8}$$

onde:

U_L = coeficiente global de perdas térmicas (W/m2 °C).

Em um coletor solar genérico, a taxa de calor útil pode ser obtida em função da temperatura média da placa absorvedora (Tpm):

$$Q_u = A_C[S - U_L(T_{pm} - T_{amb})] \tag{9}$$

onde:

Q_u = taxa de calor útil fornecida pelo coletor (W).

A_C = área da superfície coletora de energia solar (m^2).

Pela equação (9) observa-se que a taxa de calor útil (Q_U) fornecida por um coletor solar diminui com o aumento da temperatura média da placa (T_{pm}), pois desta forma aumentam também as perdas térmicas para o ambiente. Para um mesmo coletor solar, aumentos na vazão de fluido circulante diminuem a temperatura média da placa coletora, aumentando a eficiência térmica do equipamento.

Como a determinação da temperatura média da placa não é uma tarefa simples, introduz-se um fator de remoção de calor (F_R) na equação (8), para definir a taxa de energia útil fornecida pelo coletor em função das temperaturas de entrada do fluído e ambiente. Ou seja, considera-se que a temperatura da placa absorvedora é a mesma que a do fluido na entrada e corrigi-se esta aproximação com um fator de correção (F_R):

$$Q_U = A_C F_R[S - U_L(T_1 - T_{amb})] \tag{10}$$

$$F_R = \frac{mC_p(T_2 - T_1)}{A_C[S - U_L(T_1 - T_{amb})]} \tag{11}$$

onde:

F_R = fator de remoção de calor.

T_1 = temperatura de entrada do fluido (°C).

T_2 = temperatura de saída do fluido (°C).

m = vazão mássica do fluido (kg/s).

C_P = calor específico do fluido (J/kg °C).

A equação (10) é conhecida como a equação de Hottel–Whillier–Bliss para coletores solares. A eficiência instantânea de um coletor solar plano é definida como

a razão entre a taxa de energia útil fornecida pelo coletor e a taxa de energia solar que incide em sua área.

$$\eta = \frac{Q_u}{A_C I} = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_1 - T_{amb})}{I} \tag{12}$$

A definição da taxa de calor útil (Q_U) em função do aumento de temperatura do fluido (equação 13) é conveniente quando o fluido a ser aquecido é água ou outro líquido.

$$Q_U = mC_p(T_2 - T_1) \tag{13}$$

Quando circula-se ar pelo coletor, é mais conveniente definir o calor útil fornecido pelo coletor em função do aumento de entalpia da mistura ar-vapor de água (equação 14), pois desta forma é considerado tanto o aquecimento do ar quanto da água presente em forma de vapor.

$$Q_U = m\Delta H \tag{14}$$

A variação de entalpia (ΔH) pode ser obtida através de equações termodinâmicas e valores de temperatura de bulbo seco e úmido do fluido.

A equação (12) pode ser representada através do gráfico de η versus $(T_1 - T_{amb})/I$ como uma reta (Figura 7). Os valores dos parâmetros $F_R(\tau\alpha)$ e $F_R U_L$ correspondem respectivamente aos coeficientes linear e angular da reta e podem ser determinados por regressão linear. Os valores destes parâmetros relacionam-se com a absorção e perda de energia pelo coletor solar ($F_R(\tau\alpha)$) e com seu coeficiente global de perdas térmicas ($F_R U_L$).

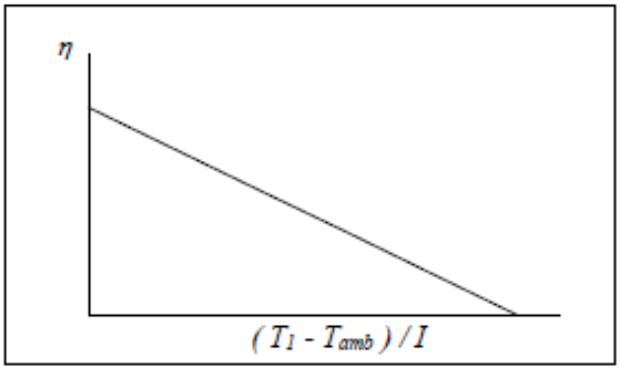

Figura 7 - Gráfico de η x $(T1-Tamb)/I$
Fonte: Duffie E Beckman (1991)

A norma ASHRAE 93-77, citada por Duffie E Beckman (1991), aborda a caracterização de placas coletoras planas para o aquecimento de água e ar. O método descrito baseia-se na equação (12), ou seja, trabalha com a eficiência instantânea da placa coletora. De acordo com esta norma, é necessário que:

- Sejam feitos testes próximos ao meio-dia, em dias claros, quando a radiação direta é alta e incide com um ângulo próximo a 0°.
- Utilize-se uma faixa de temperatura de entrada do fluido.
- Sejam feitos testes simétricos (antes e após o meio-dia), sendo utilizada a média para os cálculos.
- Para a obtenção de cada ponto da curva de eficiência, seja fixada uma temperatura de entrada do fluido, espere-se que a temperatura de saída estabilize e sejam lidos os valores de temperatura de entrada e saída do fluido, temperatura ambiente e incidência de radiação solar, sendo utilizada a média destes parâmetros dentro do intervalo de teste.

O valor do produto transmitância-absortância ($\tau\alpha$) da superfície coletora e da cobertura é função do ângulo de incidência dos raios solares. Como os testes devem ser realizados próximos ao meio dia em pares simétricos, o valor do produto obtido expressa o $(\tau\alpha)_n$ (produto transmitância absortância) para uma incidência normal, não refletindo o comportamento médio desta variável.

2.2.5 Leitos empacotados e placas armazenadoras de energia

Outra forma de aumentar a eficiência é trabalhar com leitos empacotados, onde o fluido escoa através de um leito preenchido com uma malha ou partículas.

A principal razão para o interesse na utilização de leitos empacotados é que devido a maior área superficial e à turbulência no escoamento do ar ocorre um aumento na transferência de calor. Entretanto, em qualquer aquecedor solar de ar, um alto coeficiente de transferência de calor invariavelmente está associado a uma elevada perda de carga no sistema. Se por um lado é necessária uma perda de carga através do leito para garantir uma boa distribuição do fluxo, por outro quanto maior for a diferença de pressão maior será a energia necessária para o bombeamento do fluido (CHOUDHURY e GARG, 1993).

A utilização de placas armazenadoras de energia constitui outra forma de aumentar a eficiência de coletores solares, promovendo menor incremento na potência requerida aos ventiladores que os leitos empacotados. O principal objetivo de sua utilização é o de armazenar energia térmica, proporcionando uma transferência de calor que se prolonga por períodos posteriores ao término da incidência de radiação solar. Outra característica importante das placas armazenadoras é a de atenuar picos de temperatura no ar de saída do coletor devido a um aumento ou diminuição súbita na incidência de radiação solar, propriedade muito desejável na secagem de produtos agrícolas, em que variações na temperatura do ar de secagem podem comprometer a qualidade do produto.

Visando a secagem de soja com a utilização de energia solar, Santos (1980) construiu com materiais simples e de baixo custo (terra, pedra britada, madeira, tijolos de cimento, plástico), um coletor armazenador de energia solar de fácil implementação em propriedades rurais brasileiras. Foi feita uma avaliação do coletor solar através de um modelo matemático fundamentado nos princípios de transferência de calor, porém não foram levantados seus parâmetros característicos ($F_R(\tau\alpha)$ e $F_R U_L$). Comparado com um coletor plano, o coletor armazenador apresentou vantagens como:

- Menor custo por unidade de área.
- Menor área necessária para um mesmo incremento de temperatura.
- Capacidade de armazenar energia e atenuar picos de temperatura.

A constante de tempo de um coletor solar é definida como o intervalo de tempo que valida a seguinte relação (DUFFIE e BECKMAN, 1991):

$$\frac{T_{2,t} - T_1}{T_{2,0} - T_1} = \frac{1}{e} = 0{,}368 \tag{15}$$

onde:

T_1 = temperatura de entrada do fluido no coletor

$T_{2,0}$ = temperatura de saída do fluido no instante t = 0, quando interrompe-se a incidência de radiação solar ou muda-se a temperatura de entrada do fluido

$T_{2,t}$ = temperatura de saída do fluido no instante t

Um alto valor da constante de tempo de um coletor solar caracteriza uma elevada inércia térmica, indicando a defasagem observada entre as curvas de

incidência de radiação e de calor fornecido, e proporcionando a atenuação de picos de temperatura no ar de saída de um coletor armazenador de energia.

Devido à alta inércia térmica, a caracterização de coletores armazenadores de energia baseada na equação de eficiência instantânea (ASHRAE 93-77) não fornece informações adequadas sobre o funcionamento destes equipamentos. Nayak et al. (1989) utilizaram o conceito de eficiência diária na análise do desempenho de placas coletoras de concreto para o aquecimento domiciliar de água. As placas de concreto possuíam 3,5cm de espessura, envolvendo tubos de PVC (20mm de diâmetro). A eficiência diária foi definida como a razão entre o calor fornecido pelo coletor solar e a radiação incidente durante um dia de exposição ao sol (equação 16).

$$\bar{n} = \left(\int \dot{Q}_u dt\right) / \left(A_c \int I dt\right) \tag{16}$$

Os autores observaram que, apesar de sua elevada inércia térmica, as placas armazenadoras apresentam comportamento linear semelhante ao obtido na caracterização de coletores convencionais baseada na eficiência instantânea:

$$\bar{\eta} = A - B\left|\frac{\bar{T}_1 - \bar{T}_{amb}}{H_T}\right| \tag{17}$$

onde:

H_T = energia solar total incidente por unidade de área durante um dia de teste (MJ/m2)

T_1 = temperatura média do ar na entrada do coletor (°C)

T_{amb} = temperatura ambiente média (°C)

A e B = constantes características do coletor solar armazenador de energia

Boppshetty et al. (1992) realizaram um estudo das equações de transferência de calor para coletores solares com placa de concreto, comparando os resultados obtidos teoricamente com as eficiências diárias obtidas em ensaios experimentais. Foi observada uma boa correlação entre os valores experimentais e os calculados.

2.3 Uso de coletores solares planos a ar no agronegócio

O principal objetivo do estudo de coletores alternativos é a redução do custo de fabricação, buscando a socialização do seu uso em sistemas de aquecimento de ar doméstico e industrial.

Com este objetivo, vários trabalhos foram desenvolvidos, demonstrando que os coletores solares de baixo custo têm sido amplamente estudados.

Neste item é feito uma breve revisão sobre trabalhos deste tipo de coletor mostrando os resultados alcançados e as análises que conduziram ao desenvolvimento do presente trabalho.

a) Sistemas de Aquecimento Solar para Secagem de Produtos Agrícolas

Santos (2004) apresentou um trabalho sobre uma metodologia para o projeto de coletores solares visando a secagem de grãos em silo.

Foi realizado um estudo de caso de uma secagem de milho em silo, na cidade de Campinas – SP, com pré-aquecimento do ar através de um coletor solar e aquecimento complementar com fonte energética a base de GLP ou lenha. O coletor solar utilizado possuía área de 1,80m^2, foi construído com materiais de baixo custo e, devido ao material constituinte de seu leito (pedras britadas), apresentava elevada inércia térmica e alta capacidade de armazenar energia. A Figura 8 apresenta a construção deste coletor (SANTOS, 2004).

Figura 8 – Coletor solar armazenador de energia
Fonte: Santos (2004)

A caracterização do coletor foi feita com o levantamento da sua curva de eficiência e com a determinação de sua constante de tempo. De maneira

semelhante ao observado em coletores solares convencionais, a curva característica levantada apresentou comportamento linear. A capacidade de armazenar energia térmica foi constatada no elevado valor da constante de tempo obtida e pelas defasagens entre as curvas de calor útil fornecido ao ar e radiação solar incidente na superfície do equipamento (SANTOS, 2004).

Na secagem de 1,20T de milho considerada no estudo de caso, utilizando-se uma vazão volumétrica específica de ar igual a 1,20$\frac{m^3}{m^3 min}$ à temperatura de 50°C, obteve-se uma economia de 31% na energia demandada para o aquecimento de ar. Através da análise de ciclo de vida econômico, para a utilização conjunta de energia solar e GLP no aquecimento de ar, foi determinada uma área coletora ótima de 7,50m^2 a uma taxa de interesse de 0,12 ao ano, proporcionando o máximo retorno financeiro durante o ciclo de vida do equipamento. Aumentos nas taxas de interesse diminuem tanto os valores de área coletora ótima como do retorno financeiro durante o ciclo de vida econômico (SANTOS, 2004).

Foi demonstrada, para as condições fixadas no estudo de caso, a viabilidade econômica da conversão de sistemas que utilizam GLP como fonte energética para sistemas assistidos por energia solar, proporcionando redução nos impactos ambientais da atividade e economia para o produtor rural. Nas mesmas condições foi verificada a inviabilidade econômica da utilização de energia solar em conjunto com a lenha (SANTOS, 2004).

b) Construção e avaliação de um coletor armazenador de energia solar, não convencional, para aquecimento de ar na secagem de produtos agrícolas

Visando a secagem de soja com a utilização de energia solar, Santos (1980) construiu, com materiais simples e de baixo custo (terra, tijolos, pedra britada, madeira e plástico), um coletor solar de 60m^2 (3m de largura por 20m de comprimento), contendo um leito de pedras capaz de funcionar como armazenador de energia. O coletor solar foi empregado para aquecer o ar ambiente que, por sua vez, foi utilizado para secar, até o teor de 12%, base úmida, 55T soja, com teor inicial médio de umidade de 17,2%, base úmida, contidas em um silo metálico (SANTOS, 1980).

Foi feita a avaliação matemática do coletor solar e, para isso, foi utilizado um modelo baseado nos princípios da transferência de calor. O modelo empregado simulou, com precisão, os resultados experimentais da temperatura do ar na saída do coletor solar (SANTOS, 1980).

Posteriormente, foi determinado o acréscimo de temperatura que deveria ser fornecido ao ar ambiente em diferentes condições atmosféricas, para que este ar, quando em contato com sementes de soja ou soja industrial com teor inicial de umidade de 18% ou de 20% base úmida, secasse o produto até 12%, base úmida (SANTOS, 1980).

De posse das vazões de ar e dos incrementos de temperatura, foram realizadas simulações das áreas coletoras, necessárias para aquecer a referida vazão de ar do incremento de temperatura em questão (SANTOS, 1980).

Foram efetuados cálculos das áreas dos coletores plano e armazenador, necessárias para aquecer 5° C, diferentes vazões de ar em três níveis distintos de radiação solar e foram estudadas a influência da vazão de ar e da temperatura ambiente na eficiência do coletor armazenador para três níveis de radiação solar (SANTOS, 1980).

c) Secador solar multi-uso para beneficiamento de produtos naturais da Amazônia

Visando incentivar os produtores rurais a utilizarem técnicas simples e eficientes, Moraes-Duzat et. al. (2004) desenvolveram e testaram, através do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), um secador solar multiuso (Figura 9) para produtos naturais (grãos, sementes, castanhas e ervas medicinais, entre outros). O secador é totalmente independente de energia convencional, pois o suprimento de energia para operar os ventiladores é feito através de painéis solares fotovoltaicos, permitindo 100% de autonomia em termos de energia, podendo ser utilizado em áreas remotas, a custo energético operacional zero. Nos testes efetuados com o protótipo foi possível secar cargas de até 600kg de sementes de cupuaçu (que atualmente detém um imenso potencial comercial na produção de chocolate, cosméticos, óleos, etc.).

Figura 9 – Vista geral do protótipo do Secador-Solar Multi-Uso para produtos naturais
Fonte: Moraes-Duzat et al.(2004)

O critério principal para o desenvolvimento do protótipo foi a simplicidade, de forma que os futuros usuários pudessem construir o secador utilizando apenas material disponível no mercado local. O protótipo se baseia num secador solar "tipo túnel" originalmente desenvolvido e testado na Universidade de Hohenheim, na Alemanha. O secador original foi concebido para condições climáticas diferentes da Amazônia, além de ter sido dimensionado para diversos tipos de produtos. Portanto, a fase inicial das atividades consistiu em adaptações estruturais e cálculos de dimensionamento para os diversos produtos a serem testados, considerando-se as características físicas e químicas de cada produto que se quer secar, para determinação da área e volume do secador, fluxo do ar necessário, área do coletor solar, pressão do ar no secador, etc (MORAES-DUZAT et. al. 2004).

A partir das análises e dos cálculos dos parâmetros acima citados, chegou-se ao *design* final do protótipo, juntamente com uma descrição sucinta de suas características físicas e do princípio de funcionamento do mesmo. O protótipo foi instalado no campus principal do INPA, em área livre de sombreamento e adjacente ao secador solar de madeiras já existente, medindo aproximadamente 24m² (MORAES-DUZAT et. al. 2004).

O secador possui quatro componentes principais: um coletor solar, como fonte de aquecimento, uma câmara de secagem, dois ventiladores axiais para

circulação do ar e os painéis fotovoltaicos, para suprir os ventiladores com energia solar (MORAES-DUZAT et. al. 2004).

Esse modelo foi construído em metal e madeira, utilizando-se placas de isopor entre elas para promover o isolamento térmico necessário a secadores solares eficientes. Até o presente momento foram instalados ventiladores de corrente contínua (CC), mas também serão testados ventiladores de corrente alternada (AC). Este é um detalhe fundamental para a disseminação desta tecnologia e para a sustentabilidade do projeto (MORAES-DUZAT et. al. 2004).

d) Secagem de grãos com energia solar no Rio Grande do Sul

Guadagnin (2005) realizou uma experiência no Rio Grande do Sul e construiu o secador pouco antes do início da colheita da safra 2001/2002. Para a secagem dos grãos foi construído, inicialmente, um secador com capacidade para 375 sacos por ciclo. A câmara de secagem é basicamente a mesma utilizada nos secadores de leito fixo, ou seja, uma caixa de alvenaria de 4,75 m x 6,00 m, com piso ripado colocado a uma altura de 30 cm do chão (Figura 10). A altura de massa de grão para secagem não deve ultrapassar 1,1 m. Posteriormente, o produtor elevou a câmara de secagem ampliando a capacidade de secagem para 400 sacas.

Figura 10 – Secador de grãos
Fonte: Guandagnin (2005)

Para secagem do produto é utilizado o ar que passa por um túnel baixo, com piso de pedra britada pintada de preto e coberto com plástico transparente. O ar que

passa por este túnel sofre uma diminuição da umidade o que provoca a secagem do produto. O ar quente é retirado do túnel por dois ventiladores e injetado sob o piso ripado do secador, passando assim a circular entre a massa de grãos promovendo a secagem (GUADAGNIN, 2005).

O tempo de secagem varia de acordo com a umidade do produto que entra no secador, a umidade final que se quer obter e as condições atmosféricas nos dias de secagem. O processo de secagem é mais rápido em dias de baixa umidade relativa do ar, sem nuvens e em períodos quentes, podendo-se ter como parâmetro, para essas condições, um tempo necessário de 72 horas, para baixar a umidade de grãos de milho que entraram com 26% de umidade para até 15 %. Nos dias nublados e com umidade relativa alta, deve-se continuar injetando ar na massa de grãos, com a utilização dos dois ventiladores de secagem, de forma contínua, para evitar que o produto sofra aquecimento, mesmo que, mediante essas condições, perca pouca umidade. É uma medida recomendada enquanto se aguarda a melhora das condições climáticas (GUADAGNIN, 2005).

Para o dimensionamento dos túneis e ventiladores, foi levado em consideração um estudo das condições climáticas de séries históricas, tais como: número de horas de sol, precipitação pluviométrica, temperaturas máximas e mínimas, informações buscadas junto à Estação Experimental da Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária (FEPAGRO), em Veranópolis (GUADAGNIN, 2005).

Após a secagem dos grãos, o produtor faz a pós-limpeza (processo que demora cerca de 4 horas a cada 400 sacos (24 t) secados, sendo o tempo estabelecido pela capacidade da máquina de limpeza) e dá destino ao grão, que pode ser a armazenagem na propriedade ou a comercialização. Nos secadores a lenha, sempre é realizada a pré-limpeza, pois as impurezas podem queimar devido a alta temperatura. No secador com energia solar não há esta necessidade pois a temperatura de secagem é menor, desta forma as impurezas (grãos partidos e o farelo do milho) poderão servir de alimento para os animais da propriedade já que elas estarão secas, não correndo o risco de rápida deterioração (GUADAGNIN, 2005).

Nesta propriedade, para o armazenamento dos grãos foi realizada uma adaptação, utilizando a mão-de-obra familiar, em um armazém de alvenaria antigo, já existente na propriedade, e que armazenava o milho em espigas. A modificação

básica introduzida no armazém de alvenaria foi a colocação de um piso ripado de madeira a 30 cm de altura do chão onde, quando houver necessidade para resfriamento da massa de grãos, possa ser injetado ar. Para a injeção desse ar também é utilizado um sistema de ar forçado com ventilador. O produtor fez um reforço com uma viga de concreto na metade do armazém, pois a parede foi projetada para receber milho em espigas, de menor densidade que o milho em grãos (GUADAGNIN, 2005).

Na safra de 2001/2002, foi a primeira vez que o produtor utilizou o sistema do secador solar. Foram secados 4.250 sacos (255 t) em 12 vezes, sendo que o processo iniciou-se na primeira quinzena de abril e terminou em início de junho. Nesse ano, o tempo médio de secagem variou entre 60 e 96 horas, ou seja, de 2 a 4 dias por lote de 400 sacas, sendo que o tempo de secagem varia com o teor de umidade do grão e com as condições climáticas. A umidade do grão, quando colhido, variou entre 21 e 30 % (GUADAGNIN, 2005).

A relação de custo de implantação da unidade de secagem e armazenagem (adaptação do armazém já existente) por saca de milho, na unidade em questão, foi de R$ 2,84 a saca (R$ 12.050,00/4.250 sacas). Isso significa que a unidade se pagou praticamente no primeiro ano, considerando o desconto de R$ 2,00 por saca para a secagem do produto fora da propriedade (GUADAGNIN, 2005).

Para a secagem, são necessários dois ventiladores utilizados para promover a convecção forçada do ar no processo de secagem e para a aeração do grão na armazenagem (GUADAGNIN, 2005).

O modelo do secador solar apresenta muitos benefícios, como: a praticidade do processo, já que o sistema é de fácil operação; baixo custo de implantação e de secagem; a utilização de energia renovável, disponível, gratuita como fonte de calor, não necessitando de lenha para aquecimento do ar; a versatilidade do secador solar visto a possibilidade de secagem de qualquer tipo de grão (ex.: arroz, feijão, soja, trigo); a não necessidade de mão-de-obra durante o processo de secagem (GUADAGNIN, 2005).

2.4 Cura Do Tabaco

2.4.1 Origem

Considera-se que o centro de origem do tabaco (*Nicotiana tabacum L.*) seja os altiplanos do Peru, do Equador e da Bolívia, nos arredores do Lago Titicaca, lugar onde estavam assentadas as antigas civilizações dos Incas e dos Chinchas, que foram as primeiras a cultivar o tabaco, uma vez que ele estava incorporado a suas culturas e mitologias (ESPINO, 1988).

Embora a origem do tabaco se localize nos planaltos Andinos, sua difusão como cultivo comercial ocorreu a partir das Antilhas (Cuba e República Dominicana) e na costa leste dos Estados Unidos (Flórida e Virgínia), devido à produção e ao consumo de tabaco pelos índios americanos. Destes lugares, ele foi levado para a Europa por dois tripulantes da primeira expedição de Cristóvão Colombo, Rodrigo de Xerez e Luis de Torres, em 1492 (ESPINO, 1988).

Nos primeiros anos após o seu descobrimento, as principais referências ao tabaco parecem estar relacionadas com sua difusão e suas formas de utilização pelos habitantes do Novo Mundo, uma vez que já em 1556 o tabaco está presente na França, chegando a Portugal em 1558, à Espanha em 1559 e à Inglaterra em 1565. No século XVI, o tabaco chegava à Itália, à Alemanha, aos Países Baixos, à Escandinávia, à Rússia, ao Irã, à África Ocidental e ao Extremo Oriente. Um século após, o tabaco já havia alcançado a Nova Zelândia e a Austrália, sendo assim um cultivo mundialmente difundido, presente nos cinco continentes (ESPINO, 1988).

2.4.2 Tipos de Tabaco

De acordo com as finalidades de sua utilização, diferentes tipos de tabaco foram estabelecidos no decorrer dos anos, e como resultados desta seleção, surgiram tipos específicos de tabacos, relativamente diferenciados entre si por sua morfologia, sua composição química e suas propriedades organolépticas. O tabaco do tipo Virginia é responsável por mais da metade do tabaco produzido no mundo (60%) seguido pelo Burley (13%), vindo depois o Oriental (12%). Os demais são tabacos distintos, que, juntos, alcançam 15% da produção mundial, conforme Figura 11 (LIBUY, 2005).

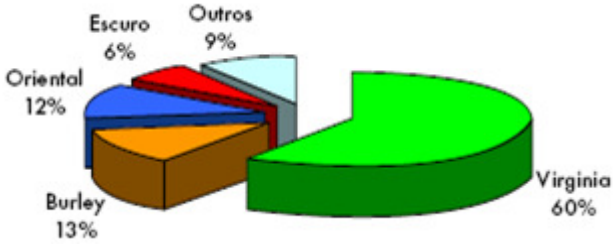

Figura 11– Participação mundial dos diferentes tipos de tabaco
Fonte: Libuy (2005)

Segundo Libuy (2005) as características principais do tabaco tipo Virgínia são:

- apresenta plantas altas, de folhas grandes e lanceoladas, que adquirem uma tonalidade amarela característica ao serem secadas em atmosfera artificial em estufas com temperatura e umidade controladas em processo que demanda de cinco a sete dias para ser concluído;
- sua colheita é feita folha por folha;
- tem sabor e aroma suaves, com conteúdo médio de nicotina e elevado de açúcares, a fumaça de sua combustão é doce e ácida;
- é utilizado para a fabricação de cigarros e para blends de cachimbo.

2.4.3 Processo de Cura do Tabaco Virgínia (*Flue-Cured*)

A cura do tabaco Virgínia (*Flue-Cured*) é considerado um procedimento complexo em razão de diferenças quanto ao tipo de tabaco (corpo, posição foliar, conteúdo de umidade, etc.), as instalações físicas para a cura e as condições climáticas. Torna-se difícil o uso de um programa padrão definido de cura porque cada estufa de tabaco é diferente (JONES e REED, 2003).

Segundo Hawks (1980), a cura tem duplo objetivo. Inicialmente, criar as condições de temperatura e de umidade para que se possam processar nas folhas as mudanças químicas e biológicas desejadas. Depois, conseguir que as folhas, por meio de uma secagem apropriada, mantenham seu potencial de qualidade.

Basicamente, as folhas devem ser mantidas vivas durante o período de amarelamento de maneira que as mudanças químicas e de cor desejadas possam ocorrer. Ao mesmo tempo, uma secagem suficiente precisa acontecer para que com o amarelamento completo as folhas estejam realmente murchas. Depois que as folhas atingem a cor amarela desejada a temperatura deve ser elevada até matar as

folhas e interromper mudanças químicas e de cor. No caso das folhas serem mortas muito cedo em razão de secarem muito rápido ou em altas temperaturas, a cor permanecerá verde. Após a cor desejada ser atingida, o restante da cura é meramente uma questão de secar as folhas e o talo para preservar a cor (JONES e REED, 2003).

A primeira condição para se obter uma cura uniforme é iniciar com tabaco uniformemente maduro. Quando se antecipa a colheita, a qualidade pode diminuir, e quando ela é retardada, a produção poderá diminuir. No começo do processo da secagem, as folhas têm entre 80% a 90% de água, e o resto corresponde à matéria seca. Desta matéria seca, uns 25% são açúcares e os demais 75% são pigmentos, componentes bioquímicos, minerais etc. Com uma cura e uma secagem adequadas, somente podemos manter a qualidade alcançada na lavoura, mas não podemos melhorá-la, embora se possa piorá-la se a cura é feita de maneira inadequada. O processo de cura do tabaco Virgínia consta de três fases: amarelação, secagem da folha e secagem do talo (JONES e REED, 2003).

1ª Fase: amarelação

Durante a primeira fase, a da amarelação, as folhas adquirem a tonalidade amarela, vão perdendo umidade e passam por vários processos biológicos. O pigmento amarelo aparece pela destruição da clorofila na folha. Para uma amarelação apropriada, o oxigênio precisa ingressar na folha, o que acontece através dos estômatos. A penetração de oxigênio acelera a transformação do amido em açúcares simples (glicose, frutose e sacarose).

Uma pequena parte destes açúcares é consumida nos processos respiratórios da folha, através dos quais a energia térmica é gerada, a qual tem como efeito indesejado o aquecimento do tabaco não curado, por isso, uma boa ventilação se faz necessária. Os processos de desaparecimento de clorofila e de formação de açúcares simples ocorrem simultaneamente e, por isso, a mudança de cor pode servir como visualização destes açúcares. Nesta etapa, a folha perde muito pouca umidade e a temperatura de cura não passa de 35º C, e sua duração é de mais ou menos 48 horas, conforme mostra a Figura 12.

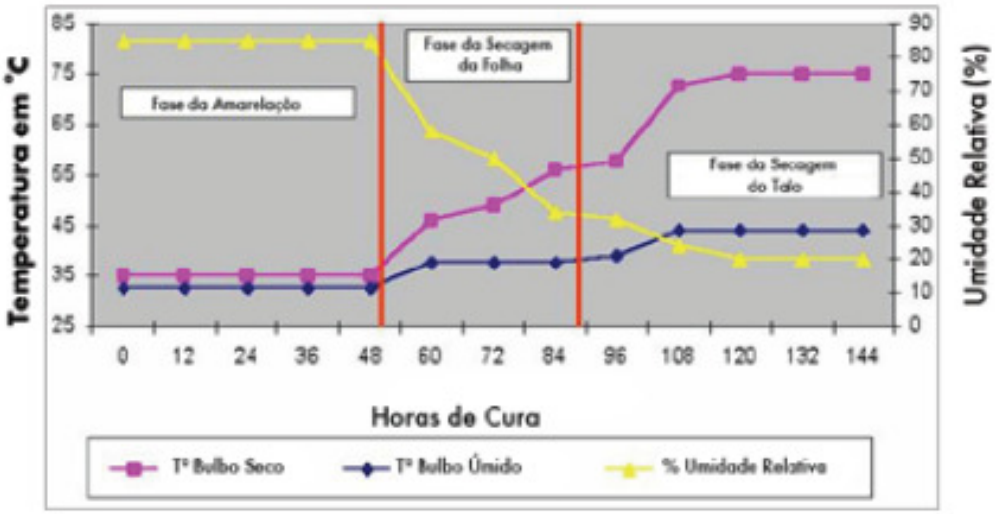

Figura 12– Curva da Umidade Relativa e da Temperatura utilizada na cura do tabaco Flue-Cured
Fonte: Libuy (2005)

2ª Fase: secagem da folha

Durante a fase da secagem da folha, que dura aproximadamente entre 44 e 48 horas, a umidade da folha baixa consideravelmente até 40%. Por sua vez, a temperatura de cura tem seu maior aumento, passando de 35ºC para 54ºC. Só depois que a folha perdeu entre 40% a 50% de umidade é possível aumentar a temperatura de cura; caso contrário, poderá ocorrer o escaldamento, e a folha poderá ficar completamente marrom em poucos minutos.

3ª Fase: secagem do talo

A fase da secagem do talo ocorre a uma temperatura não superior a 75ºC, embora seja recomendado não ultrapassar os 71ºC. Nesta etapa, quando a folha está completamente seca, as mudanças bioquímicas quase já cessaram, o que se busca é extrair a umidade da nervura sem estragar a lâmina da folha. Sua duração é de mais ou menos 48 horas, e é a parte mais difícil em termos de extração de umidade. É por isso que se trabalha com uma diferença térmica de pouco mais de 40ºC entre o termômetro de bulbo seco e o de bulbo úmido, e assim se consegue baixar a umidade de 40% a 20%.

No processo da cura, existem três fatores que são determinantes e que devem ser manejados apropriadamente: a temperatura do ar, a umidade ambiental e a circulação do ar, como mostra a Figura 13.

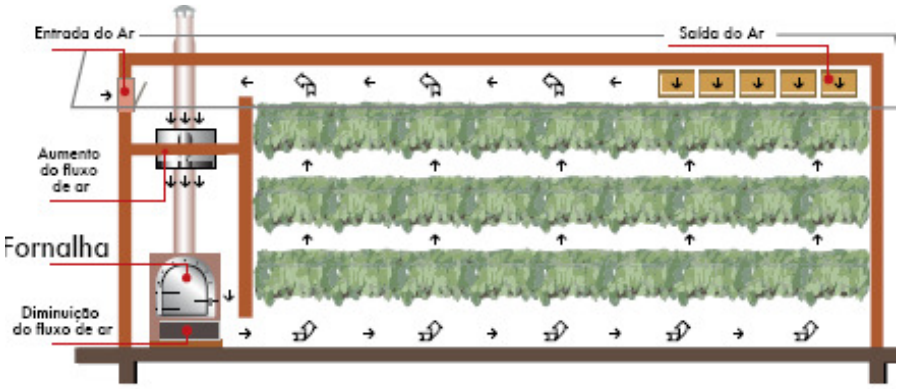

Figura 13– Gerenciamento cuidadoso da temperatura do ar, da umidade do ambiente e da circulação do ar
Fonte: Libuy (2005)

A utilização de um instrumental apropriado para as medições garante o bom manejo destas variáveis. Para esta finalidade, atualmente se utiliza o Psicrômetro (Figura 14), que consiste num conjunto de dois termômetros, um com bulbo seco e outro com bulbo úmido. A obtenção das duas temperaturas é de extrema importância pois a diferença entre ambos os termômetros indica o potencial de cura; isto é, quanto maior a diferença entre ambos, tanto maior será o potencial de cura.

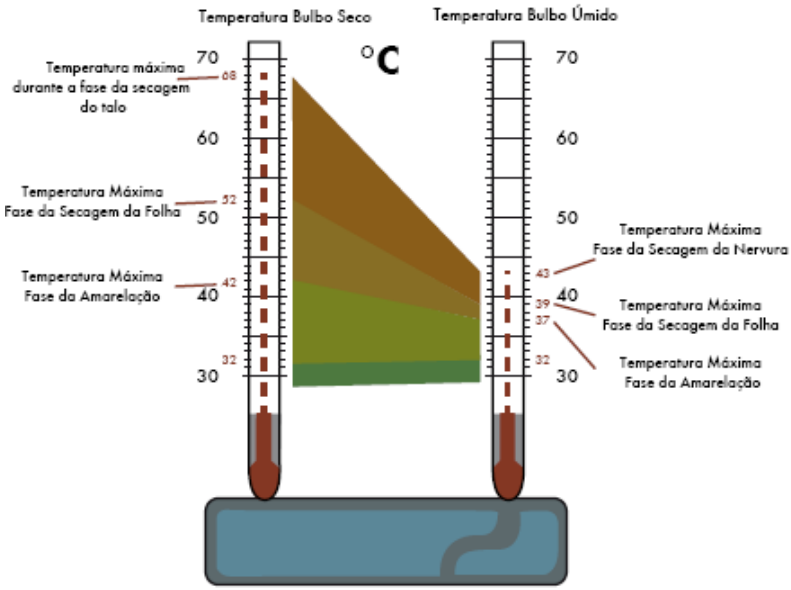

Figura 14– Psicrômetro
Fonte: Libuy (2005)

Uma vez que a água evapora das folhas de tabaco durante a cura numa proporção semelhante de sua evaporação do bulbo úmido, a leitura deste bulbo pode servir como indicador da temperatura das folhas. A temperatura das folhas pode se tornar crítica durantes as fases de amarelação e de secagem. Como critério

podemos mencionar aqui que durante o processo de amarelação a leitura do termômetro seco não deve exceder os 38ºC, ao passo que a leitura do termômetro úmido deve estar 1°C ou 2°C abaixo da temperatura do termômetro seco.

Durante a secagem da folha, a temperatura de bulbo seco não deve exceder os 54ºC. Por isso, deve-se ir aumentando a temperatura ao ritmo de um grau por hora, enquanto a temperatura de bulbo úmido deve estar mais ou menos em 40ºC. Durante a etapa da secagem do talo, a temperatura de bulbo seco não deve exceder os 71ºC, e a temperatura deve ser aumentada numa proporção de um grau por hora. A temperatura do bulbo úmido deve estar ao redor de 43ºC. Estes valores são apenas referenciais e devem ser revistos de acordo com as condições de cada lugar.

2.4.4 Poder calorífico da lenha eucalipto

Para o processo de cura do tabaco em estufa, a lenha eucalipto é normalmente utilizada como fonte energética para aquecimento do ar.

O Poder Calorífico é a quantidade de energia por unidade de massa (ou de volume no caso dos gases) liberada na oxidação de um determinado combustível. O Poder Calorífico Superior (PCS) é dado pela soma da energia liberada na forma de calor e a energia gasta na vaporização da água que se forma numa reação de oxidação (BAZZO, 1995).

Segundo Bazzo (1995) o Poder Calorífico Superior da lenha eucalipto é de 5GJ/m^3.

Gratto et al.(2003) estudaram as características da lenha produzida na Região da Quarta Colônia de Imigração Italiana no Rio Grande do Sul levando-se em conta o fator de conversão de estéreo para m^3, o teor de umidade, massa específica básica e o Poder Calorífico da madeira.

Para determinar o fator de conversão Gratto et al.(2003) tomaram como base o volume aparente (Va em esteres) e volume sólido (Vr em m^3) das diversas pilhas de madeira. Além disso, foi solicitado ao produtor que fizesse uma estimativa do volume de lenha existente na pilha, sendo considerado como volume estimado (Ve em esteres).

Para facilitar as medições e o cálculo do volume sólido, Gratto et al. (2003) utilizaram amostragem em faixa (Figura 2.24), dividindo-se a pilha em amostras de

um metro de largura e sorteando-se uma amostra destas para a cubagem (GRATTO et al., 2003).

Da amostra sorteada, foi determinado o diâmetro no centro e o comprimento de todos os toretes que ficavam dentro da linha de amostragem. No caso dos toretes que ficavam sob a faixa de amostragem, mediram-se somente os que tinham mais da metade de seu diâmetro para o lado interno da amostra. Dessa forma, o volume sólido (Vr) de madeira da amostra resultou da soma de todos os volumes individuais dos toretes.

Os pontos p1, p2 e p3 são pontos de retirada de toretes; a, b, c são faixas de sorteio para a medição (Figura 15).

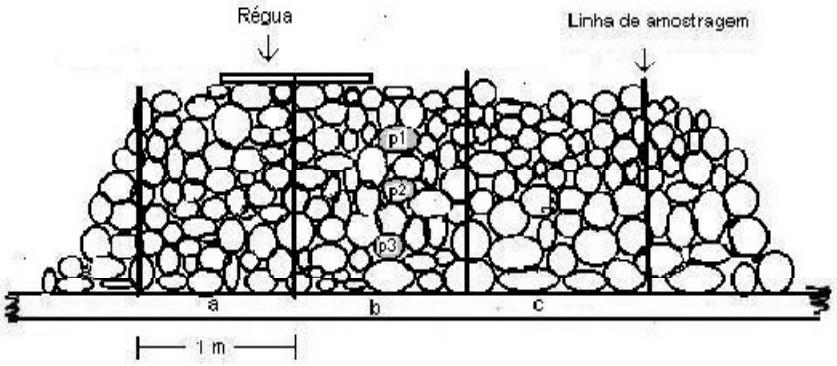

Figura 15 - Amostragem em faixa para cubagem da pilha de lenha
Fonte: Gratto et al.(2003)

Para a obtenção do volume aparente da faixa sorteada (Vafa), mediram-se a altura e a profundidade da pilha (determinada pela média do comprimento dos toretes), já que a largura da faixa foi definida em um metro.

O fator de conversão (FC) foi obtido pela utilização da equação:

$$FC = \frac{Vr}{Vafa} \tag{18}$$

Posteriormente, mediram-se o comprimento e a altura da pilha, para comparar a estimativa do agricultor com o volume estéreo (st) das pilhas. A altura foi obtida com o auxílio de uma régua de madeira de um metro de comprimento que foi colocada horizontalmente na parte superior da pilha perpendicular aos toretes (Figura 1). A largura da pilha foi obtida pela média do comprimento unitário dos toretes. O cálculo do volume aparente (Va) resultou da multiplicação da largura, altura e comprimento da pilha de lenha.

O fator médio de conversão de ésteres para m^3, importante para a estimativa do volume sólido, foi de $0,61m^3$ para a lenha de eucalipto.

2.5 Características do clima na região central do Rio Grande do Sul e da cidade de Santa Cruz do Sul – RS

A cidade escolhida para o cálculo do desempenho do sistema de captação de energia solar proposto neste trabalho é Santa Cruz do sul – RS, já que seu principal estímulo econômico vem das plantações de fumo, que trouxeram para a cidade inúmeros fabricantes de cigarro e distribuidoras de fumo, como Universal Leaf Tabacos, Philip Morris, Souza Cruz, ATC, Alliance One entre outras (SANTA CRUZ DO SUL, 2011).

Santa Cruz do Sul possui o maior complexo beneficiador de fumo em folha no seu Distrito Industrial. No município são industrializados cerca de 13.967 toneladas de fumo/ano. Possui em torno de 3.411 propriedades rurais, com média de 2,6 hectares de extensão, totalizando 6.535 hectares cultivados (SANTA CRUZ DO SUL, 2011).

Com isto, o segmento comercial relacionado ao fumo é hoje representado por aproximadamente 3.277 estabelecimentos e mais 2.793 empresas de prestação de serviços. Na totalidade o município tem 533 indústrias e 3.914 profissionais autônomos, formando uma rede bem estruturada (SANTA CRUZ DO SUL, 2011).

Segundo a Secretaria Municipal de Santa Cruz do Sul o município localiza-se na região conhecida como Vale do Rio Pardo, na encosta inferior do nordeste do estado do Rio Grande do Sul, a 155 km de Porto Alegre. Os principais acessos são pela RSC 287 e BR 471. Suas coordenadas geográficas são 29º43'59" de Latitude Sul e 52º24'52" de Longitude Oeste. Os limites geográficos são os municípios de Vera Cruz (leste), Rio Pardo (sul), Sinimbu (noroeste), Venâncio Aires (nordeste) e Passo do Sobrado (leste). Seu relevo compõem-se de áreas levemente onduladas ao Sul, vales, morros e elevações maiores, originadas dos primeiros contrafortes da Serra Geral. Apresenta altitude média de 122m do nível do mar. O clima é subtropical temperado, com temperaturas médias de 19ºC - máxima de 42ºC e mínima de 5º C. As chuvas caem entre 100 e 126 dias ao ano, com precipitações de 1300 mm a 1800 mm. Ocorrem ventos predominantes do quadrante leste, com velocidade média de 1,5 a 2,0 metros por segundo. Possui uma área total de 794,49

km², sendo 156,96 km² de área urbana e 637,53 km² de área rural (SANTA CRUZ DO SUL, 2011).

Santa Cruz do Sul, a exemplo de outros municípios, apresenta grande concentração de habitantes na cidade. A população do município é estimada em 119.057 habitantes (FEE - 2011).

Figura 16 - Localização da cidade de Santa Cruz do Sul, RS
Fonte: Wikipedia (2011)

Segundo a norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005c), o Brasil é dividido em oito zonas bioclimáticas (Figura 17). Este zoneamento foi definido por meio de uma base de dados climáticos e tem por finalidade adequar às edificações ao clima melhorando seu desempenho térmico. Santa Cruz do Sul está situada na Zona Bioclimática 2, com clima caracterizado por estações climáticas bem definidas, com grande amplitude térmica ao longo do dia e mudanças bruscas de temperatura no decorrer do ano. Além da temperatura, outra variável importante nesse clima é a elevada umidade do ar.

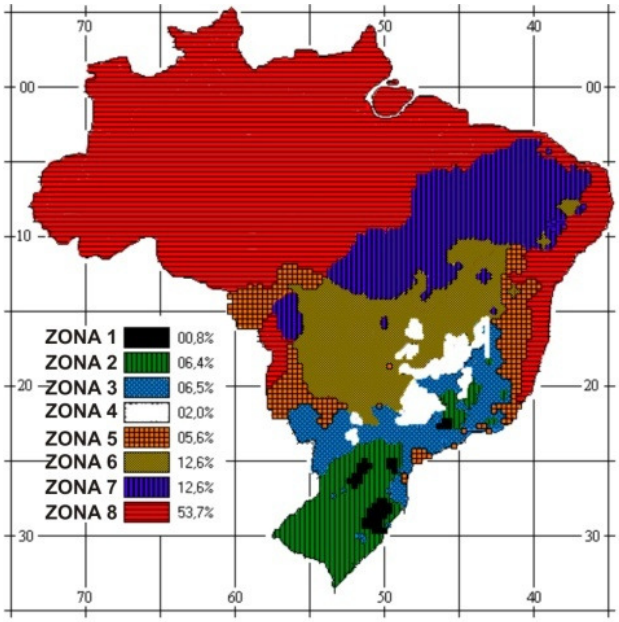

Figura 17 – Zoneamento bioclimático para o Brasil
Fonte: ABNT (2005c)

2.6 Conceitos térmicos fundamentais

Nos itens a seguir serão apresentados alguns dos conceitos das propriedades térmicas dos materiais e dos componentes, de importância nesse estudo, para o entendimento do comportamento de um sistema de captação de radiação solar.

2.6.1 Propriedades térmicas dos materiais

Neste item serão apresentadas algumas das propriedades térmicas dos materiais: condutividade térmica, densidade, calor específico, calor específico volumétrico, difusividade e efusividade térmica.

2.6.1.1 Condutividade térmica (λ)

A condutividade térmica (λ) expressa a capacidade do material para conduzir calor, e é, por definição, a relação entre a densidade do fluxo térmico e gradiente de temperatura ($\frac{W}{mK}$) (CRUZ, 2002). A gama de valores de condutividade para os materiais é muito grande. Entre os menos condutores ou isolantes, como a espuma de poliuretano (0.026 $\frac{W}{mK}$), e os mais condutores, como o cobre (389$\frac{W}{mK}$), existe uma

relação de 1 a 15000. No entanto, para os chamados materiais de construção, incluídos os isolantes, esta relação é de 1 a 135.

A condução térmica está relacionada ao transporte de energia em um meio devido ao gradiente de temperatura, e o mecanismo envolvido é a movimentação aleatória dos átomos, sendo geralmente relacionada à transferência de calor em meios sólidos (INCROPERA, 2002).

A equação utilizada para quantificar o fluxo de calor por condução em uma superfície é a lei de Fourrier descrita como:

$$q''_{cond} = \lambda \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{L} \tag{19}$$

onde:

q''_{cond} = Fluxo de calor transmitido por condução, [W/m^2]

λ = Condutividade Térmica [W/mK]

$T_{s,1}$ = Temperatura da superfície mais aquecida, [K]

$T_{s,2}$ = Temperatura da superfície menos aquecida, [K]

L = Distância entre as temperaturas mais e menos aquecida, [m]

Se o fluxo de calor for multiplicado pela área (A), chega-se à taxa de calor transferida [W], logo para condução a taxa de calor transferida é dada por:

$$q_{cond} = k.A \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{L} \tag{20}$$

onde:

q_{cond} = Taxa de transferência de calor por condução, [W]

K = Cinética final (energia por unidade de massa), [J/Kg]

$Ts,1$ = Temperatura da superfície mais aquecida, [K]

$Ts,2$ = Temperatura da superfície menos aquecida, [K]

L = Distância entre as temperaturas mais e menos aquecida, [m]

A = Área, [m^2]

2.6.1.2 Densidade (ρ)

A densidade (ρ) define o coeficiente entre a quantidade de massa (kg), que caracteriza o material e o volume unitário (m^3), sendo dada em Kg/m^3. Os valores de

densidade variam desde 5 a 30 Kg/m³ nos isolantes e até 8900 Kg/m³ no cobre. A relação é de 1 a 170 se considerarmos somente os materiais de construção, relação muito próxima àquela observada na condutividade (CRUZ, 2002).

2.6.1.3 Calor específico (*cp*)

O calor específico (*cp*) caracteriza a capacidade de uma substância de acumular calor e expressa a quantidade de calor necessária para aumentar em um Kelvin (1K) a temperatura de uma unidade de massa (kg). A unidade de medida é $\frac{J}{KgK}$..

Seu valor tem uma faixa de variação bastante pequena para a maioria dos materiais de construção como o intervalo entre 500 a 2000 $\frac{J}{KgK}$. Um caso especial é a água, cujo valor específico é elevado (4187 $\frac{J}{KgK}$). Devido à isso, a água é usada como meio de armazenamento térmico em diversos casos (CRUZ, 2002).

Estas três propriedades enunciadas anteriormente são características elementares de qualquer material sob o ponto de vista térmico. O estudo do comportamento dos materiais em regime dinâmico exige a introdução de outras características complexas dos mesmos (combinação de características elementares) e, que permitem a sua caracterização quando submetidos a mudanças climáticas cíclicas (CRUZ, 2002).

2.6.1.4 Calor específico volumétrico (c_v)

O calor específico volumétrico (c_v) é o produto do calor específico pela densidade. Este caracteriza a “capacidade de armazenamento de calor” ou “capacidade térmica volumétrica de um material”. Uma vez que o calor específico varia pouco entre os materiais, a capacidade de armazenamento deste depende extremamente da densidade dos mesmos. Por isso se faz referência às paredes de pedra, concreto e tijolo, ao contrário das paredes leves, de materiais isolantes ou compostos (CRUZ, 2002), quando existe intenção de armazenar calor.

2.6.1.5 Difusividade (a) e efusividade térmica (b)

Estas características dos materiais estão associadas ao seu comportamento dinâmico. A difusividade (a) e a efusividade (b) são parâmetros que dependem da combinação da condutividade (λ), da densidade (ρ) e do calor específico (Cp).

A difusividade expressa a capacidade de um material para transmitir uma variação de temperatura, sendo dada pela equação 21 (CRUZ, 2002).

$$a = \lambda / \rho Cp \tag{21}$$

A efusividade expressa a capacidade de um material para absorver ou restituir um fluxo de calor ou potência térmica (CRUZ, 2002). A equação 22 expressa a sua relação com a condutividade térmica, densidade e calor específico.

$$b = (\lambda \rho Cp)^{1/2} \tag{22}$$

A difusividade térmica expressa a noção de “velocidade de difusão”, noção que tem a ver com a difusão de uma temperatura em um material. Quando sujeito a alterações de temperatura, um material sentirá esta variação mais rapidamente na medida que aumentar sua difusividade térmica. Para o intervalo de temperatura suficientemente pequeno, pode-se considerar que λ é constante; então a equação de conservação da energia, em condução pura, é expressa por:

$$\rho Cp\left(\frac{dT}{dt}\right) = I\Delta T \tag{23}$$

$$\frac{dT}{dt} = a\Delta T \tag{24}$$

2.6.2 Propriedades térmicas dos componentes

Neste item serão apresentadas algumas das propriedades térmicas mais importantes dos componentes: a capacidade térmica, a resistência térmica e a transmitância térmica.

2.6.2.1 Capacidade térmica (C_T)

A capacidade térmica (C_T) é a grandeza física que determina o calor que é necessário fornecer a um corpo para produzir neste uma determinada variação de temperatura. A unidade utilizada é cal/ºC.

A capacidade térmica caracteriza o corpo, e não a substância que o constitui. Dois corpos de massas e de substâncias diferentes podem possuir a mesma capacidade térmica. Dois corpos de massas diferentes e de mesma substância possuem capacidades térmicas diferentes.

A grandeza que caracteriza uma substância é o calor específico, sendo que a capacidade térmica é o produto do calor específico da substância pela massa do corpo que ela compõe.

2.6.2.2 Resistência térmica (R)

A NBR 15220-1 (2005a) define resistência térmica (R) como o "quociente da diferença de temperatura verificada entre as superfícies de um elemento ou componente construtivo pela densidade de fluxo de calor, em regime estacionário".

O conceito de resistência está relacionado com a condutividade térmica, que é uma característica física própria do material, de maneira que quanto maior a condutividade, menor será a resistência do elemento ou componente construtivo:

$$R = \frac{e}{\lambda} \tag{25}$$

Onde:

R = resistência térmica de componentes

e = espessura de material sólido homogêneo

λ = coeficiente de condutividade

De acordo com Costa (2003), o valor da resistência térmica de condutividade diminui na ordem sólido-líquido-gasoso, tendo como extremos os valores da prata de 360 Kcal/m.h.ºC, altamente condutora; e do ar puro de 0,02 Kcal/m.h.ºC, um mau condutor de calor.

Em se tratando de fechamentos heterogêneos, a resistência térmica total é a resultante do somatório da resistência de cada camada homogênea mais as resistências superficiais externa e interna:

$$R_t = R_{c1} + R_{c2} + \cdots + R_{Se} + R_{Si} \tag{26}$$

Rivero (1985) afirma que, no cálculo da resistência térmica, considera-se que o fluxo de calor permanece constante na passagem de um ambiente para outro através do fechamento, constituindo, assim, o chamado regime estacionário ou uniforme.

Já no regime variável, o valor das temperaturas varia no interior do fechamento, e "parte do calor que entra por uma das faces da parede serve para aquecê-la, de modo que a quantidade de calor que sai pela outra face é menor, isto é, o fluxo térmico não é constante" (COSTA, 2003).

2.6.2.3 Transmitância Térmica (*U*)

A NBR 15220-1 (2005) define transmitância térmica, ou coeficiente global de transferência de calor (U) como o "inverso da resistência térmica total".

É a transmissão de calor em unidade de tempo e através de uma área unitária de um elemento ou componente construtivo, incluindo as resistências superficiais interna e externa, induzida pela diferença de temperatura entre dois ambientes. A transmitância térmica deve ser calculada utilizando o método de cálculo da NBR 15220-2 (ABNT, 2005b) ou determinada pelo método da caixa quente protegida da NBR 6488 (ABNT, 1980).

$$U = \frac{1}{R} \tag{27}$$

Onde:

U = transmitância térmica de componentes (W/m^2k)

R = resistência térmica de componentes (m^2k/W)

2.6.3 Propriedades do ar úmido - Psicrometria

A Psicrometria é o estudo das propriedades termodinâmicas de misturas de ar seco e de vapor de água e da sua utilização para analisar os processos que envolvem ar úmido (ALMEIDA, 2004).

O ar úmido é considerado uma mistura de dois componentes: ar seco e vapor de água. No ar úmido, o vapor de água comporta-se como um gás perfeito. Embora a mistura de ar seco e água não siga rigorosamente a lei dos gases ideais, esta permanece um boa aproximação do comportamento do ar úmido a pressões inferiores a 3 atm. Na realidade, o ar contém ainda outras substâncias em solução ou suspensão, tais como poeiras, microorganismos, monóxido de carbono (CO) e outros poluentes(ALMEIDA, 2004).

A pressão do ar úmido (pressão barométrica) é, de acordo com a lei de Gibbs-Dalton, a soma das pressões parciais exercidas pelo ar seco e pelo vapor de água contido na atmosfera (ALMEIDA, 2004).

$$p_B = p_a + p_v \tag{28}$$

As relações psicrométricas são representadas graficamente em diagramas. Existem vários tipos de diagramas psicrométricos, mas neste trabalho seguiremos o diagrama de Carrier (Figura 18).

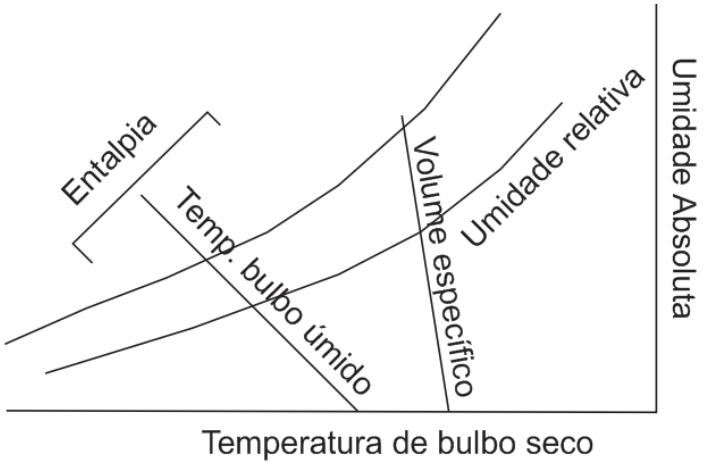

Figura 18 - Representação esquemática do diagrama psicrométrico de Carrier
Fonte: Adaptado de Almeida, 2004

No diagrama psicrométrico, estão representadas as seguinte variáveis, características do ar úmido:

- temperatura do bulbo seco;
- temperatura do bulbo úmido;
- umidade absoluta ou pressão parcial;
- umidade relativa;
- volume específico;
- entalpia.

2.6.3.1 Temperaturas de bulbo seco (*T*) e de bulbo úmido (*Tm*)

A temperatura do bulbo seco (*T*) é a temperatura do ar medida com um termômetro comum, e não é influenciada pela umidade relativa do ar (Almeida, 2004).

A temperatura de bulbo úmido é a temperatura mais baixa que pode atingir o ar úmido quando é arrefecido apenas devido à evaporação de água. A temperatura do bulbo úmido é geralmente inferior à temperatura do termômetro de bulbo seco, exceto quando o ar está saturado. Neste caso, as duas temperaturas são iguais (Almeida, 2004).

$$T_m \leq T \tag{29}$$

Quanto mais seco estiver o ar, maior é a diferença entre T_m e T.

A relação entre as pressões parciais e as temperaturas das misturas de ar seco e vapor de água é dada pela equação:

$$p_v = p_{wb} - \frac{(p_B - p_{wb})(T_a - T_v)}{1555{,}56 - 0{,}722T_v} \tag{30}$$

A temperatura do bulbo úmido mede-se com um termômetro cujo bulbo está coberto por uma mecha saturada de água pela qual passa uma corrente de ar para favorecer a evaporação da água.

2.6.3.2 Umidade absoluta (*W*)

A umidade absoluta (*W*) de uma amostra de ar úmido é a razão entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco dessa amostra (Almeida, 2004).

$$W = \frac{m_v}{m_a} \tag{31}$$

Ou seja, a razão entre as frações molares de vapor de água e de ar seco (x_y/x_a), a multiplicar pela razão das massas moleculares:

$$W = \left(\frac{18{,}01534}{28{,}9645}\right)\frac{x_y}{x_a} = 0{,}622\frac{x_y}{x_a} \tag{32}$$

ou ainda,

$$W = 0{,}622\frac{p_v}{p_a} \tag{33}$$

Como $p_a = p_B - p_v$

$$W = 0{,}622\frac{p_v}{p_B - p_a} \tag{34}$$

normalmente expressa em kg de água por kg de ar seco.

O vapor de água no ar comporta-se como um gás perfeito exercendo uma pressão parcial proporcional à umidade absoluta. A pressão parcial de vapor relaciona-se com a umidade absoluta da seguinte forma:

$$p_v = \frac{W101{,}325}{0{,}622} \tag{35}$$

A umidade absoluta mede-se pelo método gravimétrico de absorção ou com um higrômetro de condensação.

2.6.3.3 Umidade relativa (*f*)

A umidade relativa (*f*) é a razão entre a fração molar de vapor de água contido no ar e a fração molar de vapor numa amostra de ar saturado à mesma temperatura e pressão (Almeida, 2004).

$$\emptyset = \frac{x_v}{x_x}100 \tag{36}$$

$$\emptyset = \frac{p_v}{p_x} 100 \tag{37}$$

Na gama de temperaturas e de umidade normalmente encontradas em pós-colheita do tabaco, a umidade relativa pode ser calculada a partir da seguinte fórmula empírica, aplicável a –7ºC ≤ T ≤ 60ºC e 30% ≤ Ø ≤ 70%.

$$\emptyset = \left(1 - 3\frac{T - T_\infty}{T + 18}\right) 100 \tag{38}$$

A umidade relativa pode ser medida com higrômetros (de cabelo, de cinta higroscópica, de algodão), ou com psicrômetros.

2.6.3.4 Volume específico (*V'*)

É o volume ocupado pela mistura de ar seco e de vapor de água contida em 1 kg de ar seco à pressão de 1 atm (101,325 kPa). O volume específico (m^3/kg)do ar úmido é dado pela relação:

$$V' = \frac{V}{1 + W} \tag{39}$$

$$V' = (0{,}082T_a + 22{,}4)\left(\frac{1}{29} + \frac{W}{18}\right) \tag{40}$$

2.6.3.5 Entalpia (*H*)

Como o ar úmido é uma mistura de ar seco e de vapor de água, o calor específico da mistura é a soma dos calores específicos dos componentes da mistura. Sempre que as transformações tenham lugar a pressão constante, a quantidade de calor que é necessário fornecer ao ar úmido para elevar a sua temperatura a pressão constante é igual à entalpia específica do ar (Almeida, 2004). Admitindo que a entalpia é nula à temperatura de 0 ºC, para o ar à temperatura T, temos:

$$H = H_a + WH_v \tag{41}$$

Se considerarmos que

$$H_a = c_{pa} . T \tag{42}$$

e que

$$H_v = L_{v+} c_{pv} . T \tag{43}$$

temos

$$H = c_{pa} . T + W(L_{v+} c_{pv} . T) \tag{44}$$

Estas expressões mostram que a entalpia do ar úmido é composta pelos seguintes termos:

Entalpia = entalpia do ar seco + entalpia de evaporação à temperatura do ponto de orvalho + entalpia adicionada ao vapor de água após a evaporação.

Se existirem gotículas de água em suspensão no ar, é ainda necessário adicionar o termo que reflete a entalpia da água à temperatura do ponto de orvalho (massa de água x 4,186 x T).

A entalpia do ar úmido pode ser calculada através destas expressões, utilizando valores do calor latente de vaporização da água e dos calores específicos a pressão constante do ar seco e do vapor de água. As diferenças que ocorrem entre as equações utilizadas por diversos autores derivam da utilização de diferentes valores para o calor latente de vaporização e para os calores específicos, uma vez que estes variam com a temperatura (Almeida, 2004).

A expressão a seguir será usada neste estudo para o cálculo de entalpia:

$$H = 1{,}01T + W(2463 + 1{,}88T) \tag{45}$$

em que 1,01 $kJ/kg^{-1}.K^{-1}$ é o calor específico do ar seco, 2463 kJ/kg^{-1} o calor latente de vaporização da água e 1,88 $kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ o calor específico do vapor de água a pressão constante. A expressão H = 1,01T +W (2501,3 +1,86T) é também utilizada.

No diagrama psicrométrico refere-se à entalpia do ar saturado. Para determinar a entalpia do ar úmido, com uma umidade relativa inferior a 100% é necessário subtrair o fator de correção, normalmente pequeno, representado nas linhas curvas que sobem a partir do eixo da temperatura do bulbo seco.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Coletor solar a ar com leito de britas

Para este estudo foi desenvolvido um coletor solar a ar, considerando alguns fatores essenciais para que o sistema fosse desenvolvido, como: a adaptabilidade construtiva, o baixo custo dos materiais e a praticidade de instalação. Esses condicionantes foram essenciais no desenvolvimento do anteprojeto para que este possa ter uma aplicação viável na realidade atual.

3.1.1 Projeto do coletor solar a ar com leito de britas

Para o desenvolvimento do coletor solar a ar foi utilizada a metodologia descrita por SANTOS (2004): coletor com sua face voltada para o norte e sua superfície com um ângulo de inclinação igual à latitude do local, visando otimizar a incidência de radiação solar. O leito armazenador abrigará uma camada de pedras britadas n°1, possuindo espessura de 20cm e uma área coletora é de 3,60m^2 (h=1,19 e L= 3,04) A cobertura será de vidro incolor 5mm e o espaço entre o leito armazenador e a cobertura de vidro é de 5 cm (Figuras 19, 20 e 21).

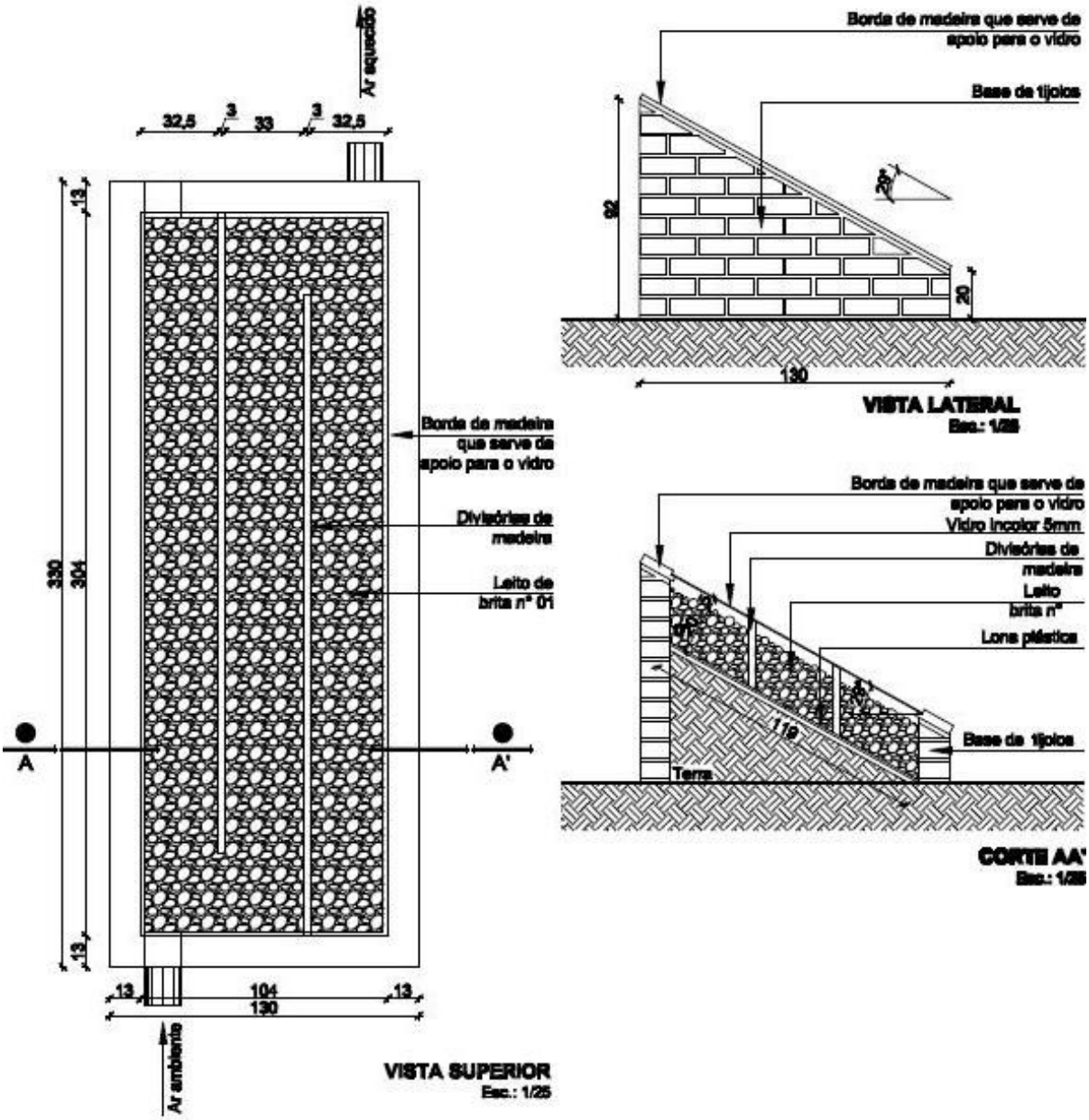

Figura 19– Detalhamento do projeto do coletor solar a ar

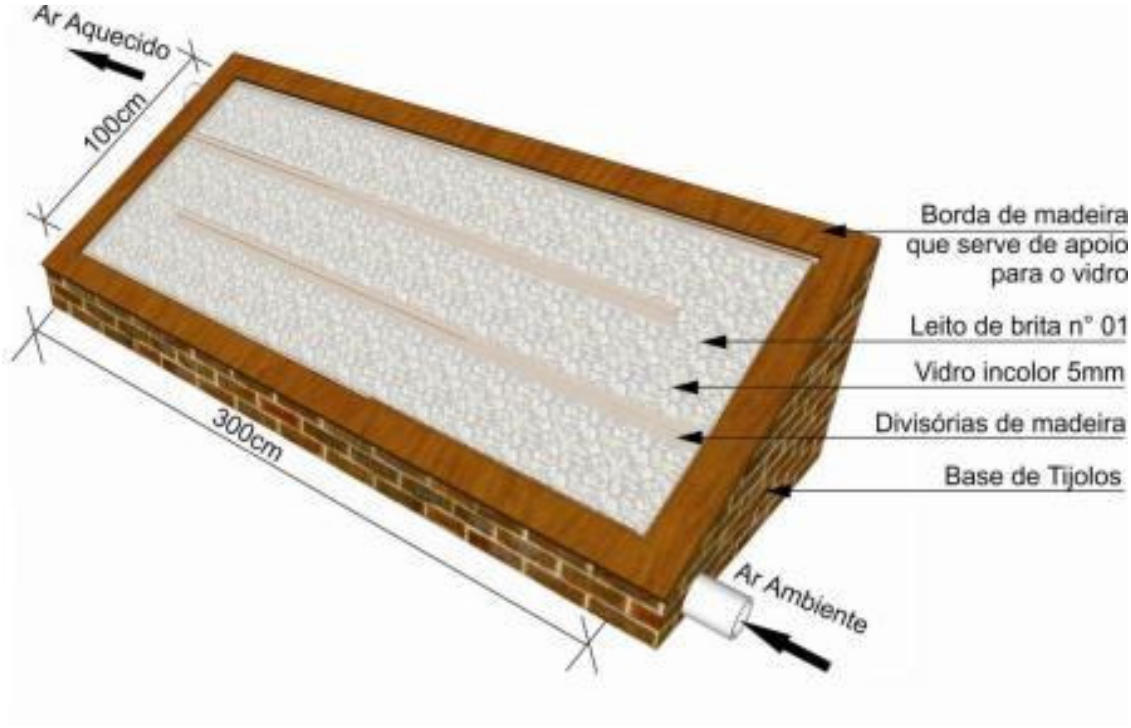

Figura 20– Perspectiva ilustrativa do coletor solar a ar

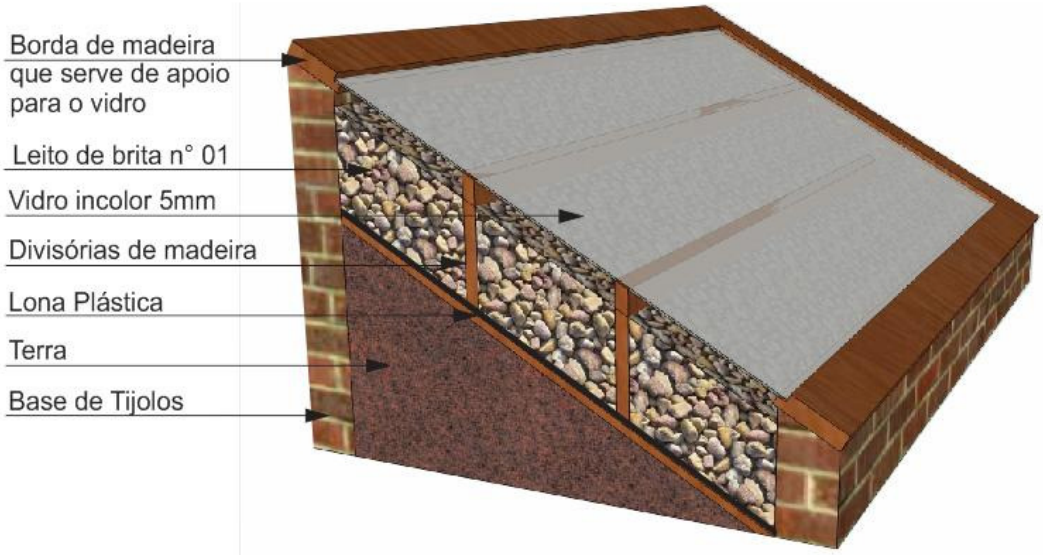

Figura 21– Corte perspectivado do coletor solar a ar

3.1.2 Construção do protótipo do coletor solar a ar com leito de britas

Para este estudo foi construído um protótipo do coletor em uma propriedade de Santa Cruz do Sul. A base de tijolos foi construída (Figura 22) para que o leito armazenador e a base que serve de apoio para a cobertura de vidro ficassem com o ângulo de inclinação adequado, sendo colocada uma lona plástica para evitar o fluxo de água do solo para o leito (Figura 23). Em seguida foram colocadas as divisórias de madeira definindo a trajetória do ar (visando aumentar o tempo de permanência e a turbulência do fluxo de ar) e a camada de 20 cm de pedras britadas n°1 que forma o leito armazenador de energia.

Figura 22– Construção da base de tijolos para o coletor solar a ar

Figura 23– Colocação de lona plástica

Para a colocação da cobertura de vidro transparente foi executado um quadro de madeira, fixo com argamassa de cimento. A vedação entre a cobertura de vidro e o quadro de madeira foi feito com silicone.

Na entrada de ar foi instalado um ventilador da Marca Ventokit modelo Ventokit 280 (Figura 24), que apresenta uma vazão de 280m^3/h.

Na Figura 25 é registrada a foto do coletor completo pronto para operação.

Figura 24– Ventilador na entrada de ar lateral

Figura 25– Vista do Coletor solar a ar com leito de brita

3.1.3 Avaliação do protótipo do coletor solar a ar com leito de britas

Para a avaliação do coletor solar de energia foram utilizados uma série de equipamentos e equações que serão descritos a seguir.

3.1.3.1 Equipamentos de medições

Medições de temperatura e umidade

Para o levantamento dos dados de temperatura e umidade foram utilizados aparelhos registradores de temperatura e umidade relativa do ar do tipo HOBO (Figura 26). Para as medições externas foram utilizadas caixas de isopor revestidas internamente por papel alumínio e com aberturas para a entrada de ar, conforme a Figura 26, para proteção da radiação.

Figura 26– Aparelho de medição de temperatura (HOBO) e a proteção contra a radiação

Este aparelho pode ser configurado para realizar leituras em intervalos de tempo determinados para um período pré-fixado, tendo a capacidade de armazenar 7.944 leituras, com intervalos de 0,5 segundos até 9 horas. No fim das medições os dados são transmitidos para um computador por meio de um programa específico, o BoxCar 3.0. A Tabela 5 traz dados específicos sobre o aparelho.

Tabela 5 - Dados referente ao instrumento de aquisição de dados

Modelo	**Dimensões (mm)**	**Precisão (a 20°C)**	**Resolução (a 20°C)**
HO8-003-02	68X48X19	±0.7 °C	0.38 °C

Para a realização dos testes a cobertura de vidro foi limpa e foram instalados cinco aparelhos do tipo HOBO para a coleta e armazenamento dos valores de temperaturas e umidade relativa nas extremidades do coletor, sendo utilizados dois aparelhos na entrada de ar do coletor (chamados nos resultados de E1-B1 e E1-B2)

e três aparelhos na saída de ar do mesmo (S1– B1, S2–B2 e S3– B3), conforme a Figura 27, sendo que dois destes ainda registravam as temperaturas através de cabos de leitura posicionados no interior do cano de PVC (Figura 28).

Figura 27– Aparelhos de medição posicionados na saída de ar do coletor

Figura 28– Cabos para registrar temperaturas no interior do cano de PVC na saída de ar do coletor

Os registradores foram programados para tomar leituras a cada cinco minutos dentro de um período de seis dias, que iniciou no dia 15/02/2012 e finalizou no dia 21/02/2012.

c) Medições de Velocidade do ar

Para o levantamento da velocidade do ar utilizou-se um anemômetro digital da marca VelociCheck Modelo 8330 (TSI Incorported) apresentado na Figura 29.

Figura 29– Anemômetro Digital

Como foi acoplado na entrada de ar do coletor um ventilador que apresentava vazão contínua, as medições de velocidade do ar na saída do coletor, para o cálculo da vazão mássica, foram realizadas somente para conferência, sendo realizadas apenas uma vez ao dia, não sendo observadas variações entre as leituras.

A velocidade do ar medida na saída do coletor foi de 4,9 m/s, sendo a vazão mássica de ar determinada de acordo com as equações abaixo:

$$m = V_{ar}\, A_{seç}\, \rho_{ar} \tag{49}$$

$$\rho_{ar} = \frac{P_{atm}}{287{,}09 T_{bs}} \tag{50}$$

$$A_{seç} = \pi R^2 \tag{51}$$

onde:

m – vasão mássica de ar (Kg/s)

V_{ar} - velocidade do ar (m/s)

$A_{seç}$ - área da seção transversal do duto de alimentação do coletor (m^2)

ρ_{ar} - densidade do ar (kg/m^3)

P_{atm} - pressão atmosférica (Pa)

T_{bs} - temperatura de bulbo seco do ar (K)

R - raio da seção transversal do duto de alimentação do coletor (m)

Portanto, assumindo como densidade do ar 1,225 kg/m³, (International Standard Atmosfere, 2012), ao nível do mar e a 15°C, a vasão mássica de ar é de 169,63m^3/h = 207,79 Kg/h (m^3 de ar = 1,225 – 1,225 x155,78).

3.1.3.2 Determinação do calor útil fornecido

Para o cálculo da taxa de calor fornecida pelo coletor armazenador (equação 14), é necessário o conhecimento da vazão mássica do ar e a variação de entalpia ΔH do ar no aquecimento. A variação de entalpia é dada pela diferença entre as entalpias do ar na entrada e na saída do coletor (Almeida, 2004):

$$H = 1{,}01T + W(2463 + 1{,}88T) \tag{45}$$

onde:

H - entalpia do ar (J/kg ar seco)

T_{bs} - temperatura de bulbo seco do ar (°C)

W - umidade absoluta (kg H_2O/kg ar seco)

Para o cálculo da umidade absoluta W e demais propriedades psicrométricas do ar foram utilizadas equações apresentadas por Santos (2004). O valor da umidade absoluta é dado por:

$$W = \frac{W_{sa}\, H_{i-v} + C_{p_{ar}}(T_{bu} - T_{bs})}{(H_v - H_i)} \tag{52}$$

onde:

W_{sa} - umidade absoluta de saturação adiabática

$H_{l\text{-}v}$ - entalpia da mudança de fase (líquido-vapor) (kJ/kg)

H_v - entalpia do vapor (kJ/kg)

H_l - entalpia do líquido (kJ/kg)

T_{bu} - temperatura de bulbo úmido do ar (°C)

C_{par} - calor específico do ar (1012 J/kg°C para temperaturas entre 0 e 300°C)

Os valores de entalpia envolvidos na equação (52) são obtidos pelas expressões:

$$H_{i-v} = 2501 - 2{,}381T_{bu} \tag{53}$$

$$H_v = 2501 + 1{,}805T_{bs} \tag{54}$$

$$H_i = 4{,}186T_{bu} \tag{55}$$

A umidade absoluta de saturação adiabática é dada por:

$$W_{sa} = 0{,}622\frac{p_{vsa}}{p_T - p_{vsa}} \tag{56}$$

onde:

p_{vsa} - pressão de vapor de saturação adiabática (Pa)

p_T - pressão total

A pressão de vapor de saturação adiabática pode ser calculada através da equação:

$$p_{vsa} = exp\left[18{,}3036 - \frac{3816{,}44}{T_{bu}(K) - 46{,}13}\right] (mmHG) \tag{57}$$

Através das equações (45) e (52) a (57) determina-se a variação de entalpia do ar entre a entrada e a saída do coletor (ΔH). A taxa de calor útil fornecida pelo coletor é obtida pela equação (14):

$$Q_u = m\Delta H \tag{14}$$

3.2 Estudo de caso – Cura do tabaco

Para este estudo, foi proposto um estudo de caso considerando a utilização do coletor solar como sistema suplementar na cura do tabado em estufas existentes a lenha, com intuito de diminuir o consumo desta.

3.2.1 Modelo de estufa considerado

Uma estufa a lenha típica existente foi utilizada como modelo para o estudo de implantação do sistema proposto, localizada na propriedade Bublitz, no interior do

Município de Santa Cruz do Sul, a 17 km do centro da cidade na Linha Antão, estrada que liga Santa Cruz do Sul-RS à Monte Alverne, terceiro distrito da cidade.

A Figura 30 apresenta a estufa em estudo e a Figura 31, a fornalha da mesma.

Figura 30– Estufa a lenha em estudo

Figura 31– Fornalha da estufa a lenha em estudo

A estufa possui 5m de largura por 5m de profundidade, um telhado de uma água com pé-direito de 6 m de altura no lado mais alto e de 5,5 no lado mais baixo. A fornalha está situada na fachada norte e no seu interior possui uma malha de 20 barrotes de madeira (04 na largura x 05 na altura) onde são amarrados os pés de tabaco. Na Figura 32 são apresentadas as perspectivas da estufa considerada.

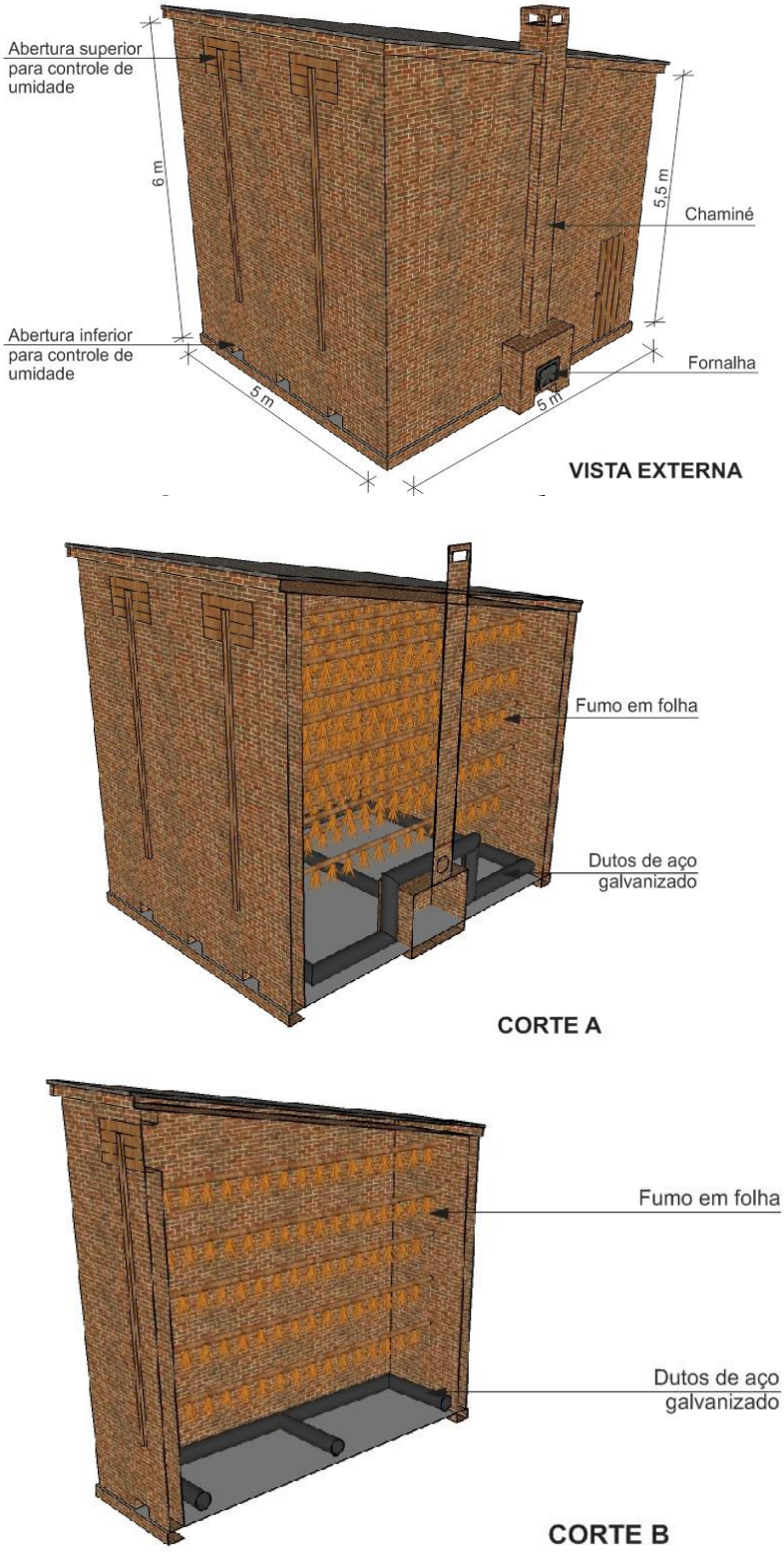

Figura 32– Perspectivas ilustradas da estufa

Dutos de aço galvanizado de 40 cm de diâmetro são utilizados para que a transferência de calor, proveniente da combustão da lenha dentro da fornalha,

ocorra por convecção natural devido à leve inclinação dos dutos até à chaminé. Assim que aquecidos, os dutos passam a irradiar o calor para dentro da estufa (Figura 33).

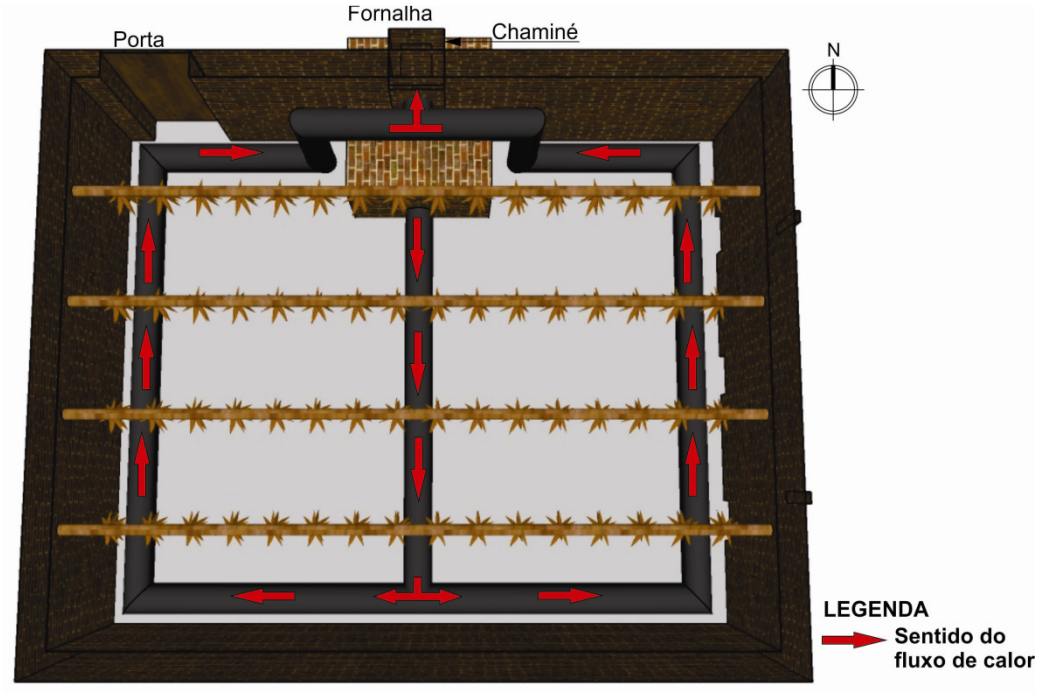

Figura 33– Fluxo de calor nos dutos de aço galvanizado no interior da estufa

3.2.2 Estudo experimental da estufa

A cura do tabaco é realizada dentro de uma estufa de características artesanais, na qual a variação da temperatura é decorrente da energia liberada pela combustão dentro de uma fornalha, sendo que a maior parte desta energia é transferida por convecção dentro da estufa. Alterando a temperatura juntamente com o fluxo de ar na estufa, pode-se estabelecer uma umidade relativa para cada fase do processo de cura.

Para a realização dos procedimentos experimentais de medição da temperatura, foram utilizados alguns componentes eletrônicos e instrumentos, bem como uma metodologia simples para a execução, que será descrita a seguir.

3.2.2.1 Equipamentos

Para o estudo experimental de medições no interior da estufa foram utilizados os seguintes equipamentos:

a) Sensor de Temperatura

Para a medição de temperatura foi utilizado o sensor LM35, que é um sensor de precisão, fabricado pela National Semiconductor. Fornece uma escala de temperatura em graus Celsius, não necessitando de calibração externa para fornecer valores de temperatura com variações de 0,25ºC dentro da faixa de temperatura de –55ºC à 150ºC.

b) Higrômetro tipo bulbo úmido e bulbo seco

A umidade é uma variável de grande importância para a cura do fumo. Com base nas informações de psicrometria serão utilizadas informações de temperatura, para o calculo de umidade relativa, que pode ser determinada indiretamente através da medição de duas temperaturas: bulbo seco e bulbo úmido. Optou-se pelo uso do sensor LM35 devido a sua linearidade, na faixa de temperatura que ocorre no processo de cura (10℃ a 80℃), bem como por sua alta resistência a ambientes agressivos, como no caso de estufas de secagem de fumo.

A temperatura de bulbo seco é a obtida através do sensor que faz a leitura da temperatura do ambiente, e a temperatura de bulbo úmido é coletada através de um sensor coberto por um tecido de algodão, este tecido está imerso em um pote de água. Assim por capilaridade a água vai subindo até chegar ao sensor fazendo com que o bulbo deste fique recoberto de água.

Um protótipo de psicrômetro tipo bulbo úmido e bulbo seco, aspirado, foi construído baseado no modelo esquemático mostrado na Figura 34.

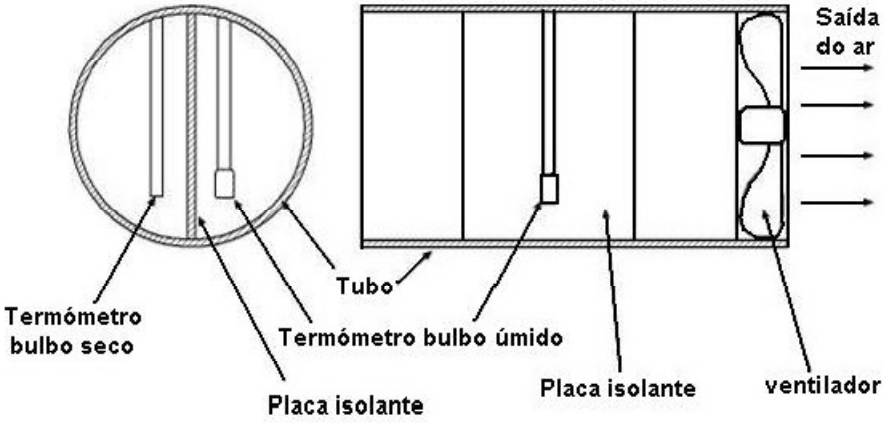

Figura 34– Modelo esquemático do psicrômetro tipo bulbo úmido e bulbo seco

Neste protótipo, foi utilizado um ventilador da Marca Ventokit modelo Ventokit 280 (Figura 35), que apresenta uma vazão de 280m^3/h, fornecendo assim uma velocidade média de 9,5 m/s no interior do tubo de PVC que apresenta 100mm de diâmetro.

Figura 35– Psicrômetro tipo bulbo úmido e bulbo seco

Com isso, foi satisfeita a condição de que a velocidade deve ser de pelo menos 5m/s (ASHRAE, 41.1-1974).

Para o cálculo da umidade relativa, neste trabalho, foi considerado o ar úmido como um gás perfeito, sendo determinado utilizando a seguinte expressão:

$$UR = \frac{ea}{es} 100 \tag{46}$$

onde:

UR =umidade relativa

ea = pressão de vapor real em (kPa) que é calculada mediante a equação (47), a seguir

es = pressão parcial de saturação na temperatura do ar (kPa), calculada com a temperatura do bulbo seco.

$$e_a = e_{sTu} - (\delta p(T_{bs} - t_{bu}) \tag{47}$$

onde:

δ = constante psicrométrica sist. ventilado (0,067 kPa/ºC)

T_{bs} = temperatura do bulbo seco

T_{bu} = temperatura do bulbo úmido

e_{sTu} = pressão (kPa) de vapor de saturação que foi calculada mediante a equação de Tetens utilizando a temperatura de bulbo úmido representada por:

$$e_s = 0{,}611 * 10^{\left[\frac{7{,}5T_{bs}}{237{,}3+T_{bs}}\right]} \tag{48}$$

Finalmente, a umidade relativa é a razão calculada entre a pressão de vapor real e a pressão de vapor de saturação, expressa em porcentagem.

Placa de Aquisição e Sistema de Condicionamento do Sinal

Para gravar os dados no computador foi necessário um sistema eletrônico que converte os sinais de entrada analógico dos sensores em sinais digitais. Este sistema geralmente é denominado como placa de aquisição de dados ou *datalogger*.

Para este trabalho foi utilizado um módulo de aquisição da empresa Measurement Computing modelo USB-1208FS, que apresenta alguns parâmetros importantes listadas na tabela abaixo.

A Tabela 6 apresenta os dados de configuração do módulo de aquisição e a Figura 36 a foto desse módulo.

Tabela 6 - Dados referentes ao módulo de aquisição

Parâmetros	**Descrição**
Tipo de A/D	Aproximações sucessivas
Numero Canais	8 comum / 4 diferencial
Faixa de entrada	±10
Resolução	11bits(comum) / 12bits (Diferencial)
Em modo comum ±10	4 LSB

Figura 36 – Módulo de aquisição de dados de temperatura e umidade relativa

3.2.2.2 Pontos de medição no interior da estufa

Os sensores de temperatura e o higrômetro de bulbo úmido e bulbo seco foram instalados no interior da estufa conforme o *layout* apresentado nas Figuras 37 e 38.

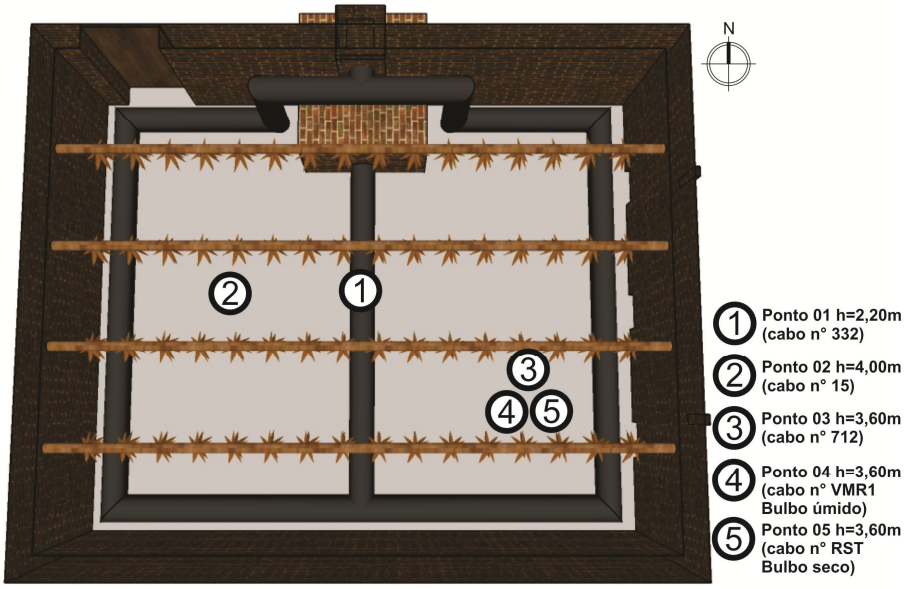

Figura 37– Planta baixa da estufa com localização dos pontos de medições

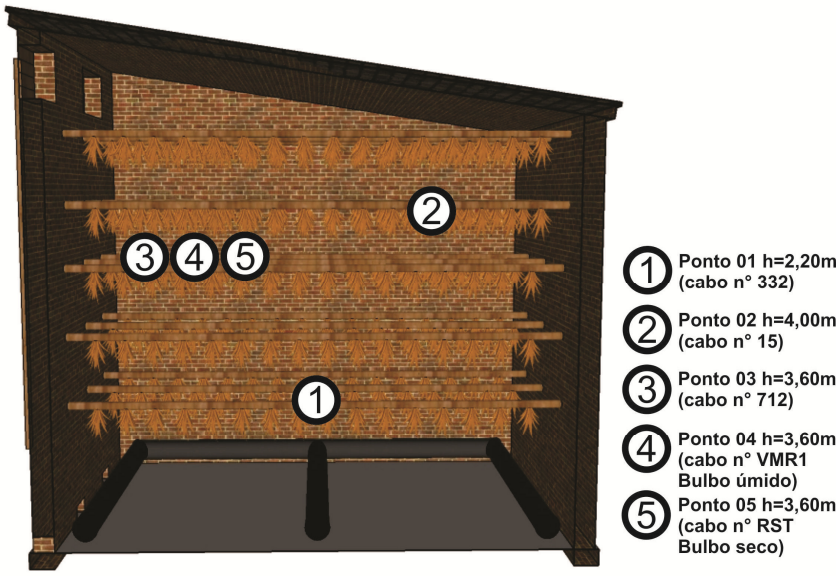

Figura 38– Corte da estufa com localização dos pontos de medições

O sistema de aquisição dos dados iniciou o monitoramento no dia 19/01/2012 e finalizou no dia 22/01/2012, totalizando 42,7 horas de medição, no período que se refere à fase inicial do processo de cura do tabaco, a amarelação da folha.

Nos dias de medição a temperatura ambiente apresentou uma pequena variação de 3°C, assim a faixa de temperatura ambiente ficou ente 33ºC e 37ºC.

Com base no Psicrômetro de bulbo úmido e seco, foi calculada a umidade relativa e realizado a média de algumas medidas apresentado na figura 3.9. Estes valores são decorrentes do processo de secagem do fumo na fase de amarelação.

Houve uma variação da UR na interior da estufa, como esperado pois nesta estufa, do caso estudado, não existe nenhum controle de temperatura e nem de vazão da ar seco admitido na parte inferior da estufa bem como ar úmido na parte superior.

Todo o controle de temperatura é feito manualmente através do ar admitido pela fornalha.

Assim, valida-se o uso de um sistema auxiliar como fonte de calor, como o sistema com coletores solares com armazenamento do calor em leito de pedras, já utilizado em campo, conforme revisão bibliográfica. A idéia central do uso deste sistema seria a substituição de parte da energia gerada pela queima da lenha pela energia acumulada pelo coletor solar.

3.2.3 Consumo de lenha

Durante o processo de cura acompanhado no estudo de caso, foi controlado o consumo de lenha, sendo que no total foram consumidos 5 m^3 de lenha empilhada de madeira eucalipto no decorrer dos 6 dias. A quantidade de lenha utilizada em cada fase da cura é demonstrada na Tabela 7.

Tabela 7 – Consumo de lenha durante o processo de cura acompanhado

Fase	**Horas**	**Lenha empilhada (m^3)**	**Lenha Volume sólido (m^3)**	**Temperatura (°C)**
Amarelação	48	1,1	0,67	35
Secagem da Folha	36	1,3	0,793	54
Secagem do talo	60	2,6	1,586	71
TOTAL	144	5,0	3,05	-

Considerando que 1 m^3 de lenha empilhada é igual a 01 estere e este igual a cerca de 0,61 m^3 de volume sólido de lenha (30% de vazios), foram consumidos 3,05m^3 de lenha em volume sólido.

Um estere de lenha de eucalipto, parcialmente seca, pesa aproximadamente, 600 a 700 kg.

3.2.4 Proposta de acoplamento do coletor solar às estufas a lenha existentes

Um dos principais objetivos para o desenvolvimento do protótipo do coletor solar com armazenamento do calor em leito de pedras foi a simplicidade, de forma que os próprios usuários pudessem construir o coletor.

A idéia central do uso deste sistema seria a substituição de parte da energia gerada pela queima da lenha pela energia acumulada pelo coletor solar. Assim, o sistema auxiliar de fonte de calor poderá ser acoplado às estufas a lenha existentes, de forma que o ar aquecido no coletor seja direcionado diretamente ao interior da estufa (Figura 39). O duto de saída do ar aquecido pelo coletor solar deve ser colocado junto à fornalha para que este circule pelos dutos de aço galvanizado, juntamente com o ar aquecido pela combustão da lenha, para que a umidade do ar ambiente não prejudique o processo de cura do tabaco.

Figura 39– Coletor solar acoplado em estufa à lenha existente

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Rendimento do Sistema

Sendo que as temperaturas de entrada e de saída de ar do protótipo do coletor solar a ar composto por pedras britadas foram coletadas durante um período de 144 horas (de 15/02/2012 a 21/02/2012) e que os registradores foram programados para tomar leituras a cada cinco minutos, foram calculadas as médias horárias das temperaturas de entrada e saída do coletor.

Foram ainda calculadas médias das temperaturas obtidas pelos dois equipamentos instalados na entrada do coletor e pelos três aparelhos na saída de ar deste, que totalizaram cinco registros de temperatura simultâneos, já que dois deles ainda registravam simultaneamente as temperaturas em cabos posicionados no interior do cano de PVC.

Durante o período ocorreram dois dias encobertos (dias 16/02/2012 e 18/02/2012) e três dias de céu claro (dias 17/02/2012, 19/02/2012 e 20/02/2012). Os dias 15/02/2012 e 21/02/2012 (quando as medições iniciaram e terminaram ao meio-dia) também apresentaram céu claro.

A Figura 40 ilustra o comportamento das médias horárias destas temperaturas, sendo que a linha azul representa a temperatura do ar na entrada do coletor – média de 2 sensores, e a linha vermelha representa a temperatura do ar na saída do coletor – média de 3 sensores, e que cada ponto é uma média de 12 medições ao longo de uma hora.

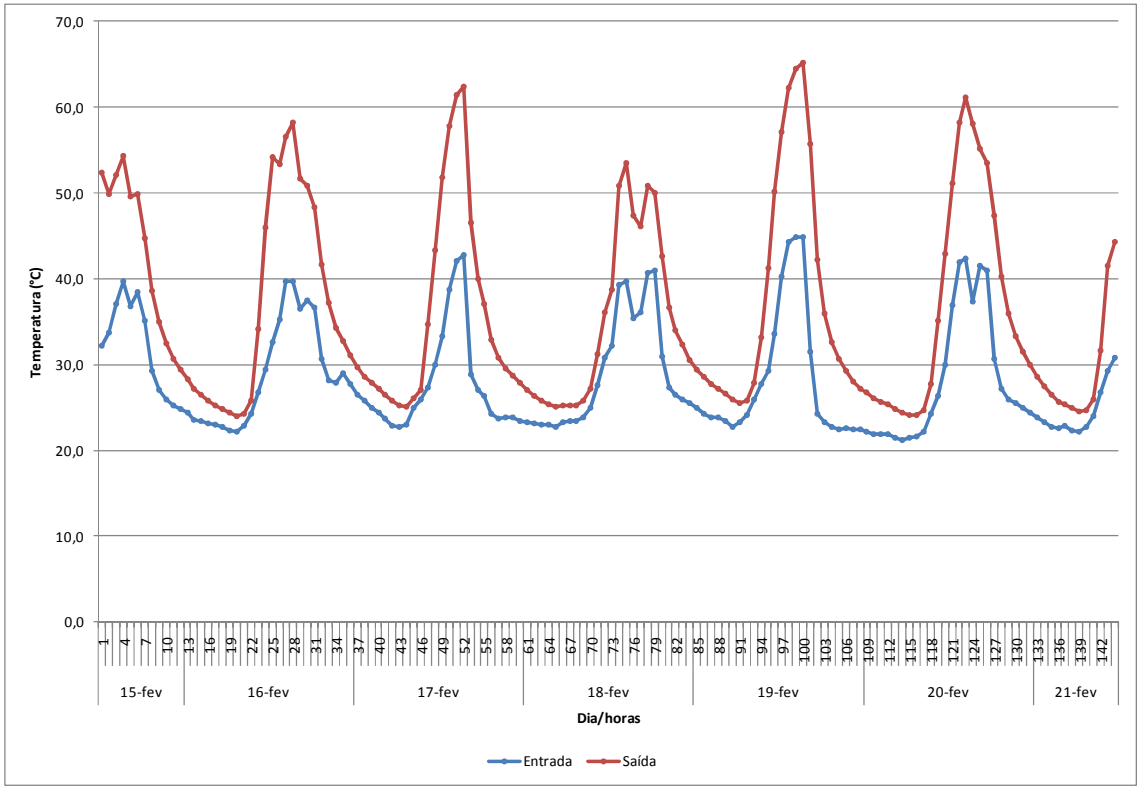

Figura 40– Temperatura horária média do ar na entrada e na saída do coletor

Durante o dia, a diferença de temperatura do ar entre a entrada e a saída do coletor foi bastante elevada, com valores que ultrapassam 20^{0}C, sendo que durante a noite as diferenças desses valores reduziram, mas ainda assim mostram o acúmulo de energia que ocorre no leito de brita, que continua a aquecer o ar que passa pelo coletor.

Uma vez que durante o período de medições ocorreram dois dias de céu encoberto, assumiu-se, para a análise dos dados, a média de temperaturas dos três dias mais propícios para captação de energia. Tomando-se estes valores, as curvas de medições de temperaturas apresentam os resultados na Figura 41:

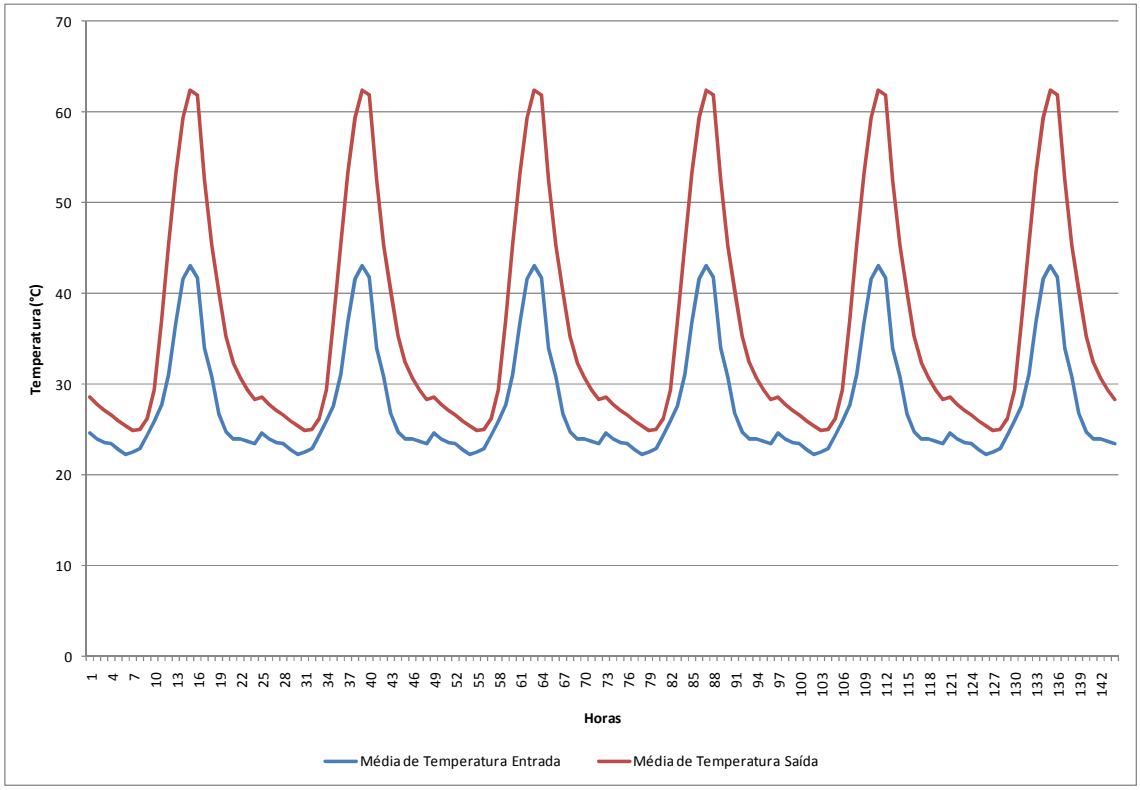

Figura 41 – Média de temperaturas de entrada e de saída do coletor dos três dias de céu claro

4.1.1 Calor Útil (Q_u) fornecido pelo Coletor

Para determinar o Calor Útil fornecido pelo coletor, primeiramente foram calculados os valores horários de entalpia (H) na entrada e na saída do coletor, utilizando-se a equação 44 do capítulo 3 e então determinou-se a variação de entalpia do ar entre a entrada e a saída do coletor (ΔH). A taxa de Calor Útil fornecida pelo coletor foi obtida pela equação 14 e calculada por hora.

A Tabela apresentada no Anexo 1 contém os dados de todos os dias de medições com os cálculos de Entalpia (H) e Calor Útil (Q_u) acima descritos, mas para fins de demonstração, foram extraídos da Tabela apresentada no Anexo 01 dados de apenas três dias de medições (16/02/2012,18/02/2012 e 20/02/2012), representando cada fase do processo de cura (amarelação, secagem da folha e secagem do talo, respectivamente).

Os dados destes três dias de medições são apresentados a seguir (Tabela 8), com os resultados dos cálculos de Entalpia (H) e Calor Útil (Q_u) no horário do meio dia.

Tabela 8 – Extração de três dias de medições da tabela do Anexo 1 com cálculo de entalpia e calor útil

Dia	Horário	Hora	Entrada		Saída		Entalpia (H) (KJ/KG)		Calor Útil (Qu) fornecido pelo Coletor - (KJ/h)
			Média de Temp. (°C)	Média de UA (kg/kg)	Média de Temp. (°C)	Média de UA (kg/kg)	Entrada	Saída	
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
16	12	24	29,4	0,0137	46,0	0,0248	347,064	398,251	10.636,4
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
18	12	72	30,8	0,0157	36,1	0,0217	354,381	378,125	4.934,0
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
20	12	120	29,9	0,0160	42,9	0,0212	354,480	383,941	6.121,7
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)

A Figura 42 apresenta a média horária do Calor Útil (Q_u) fornecido pelo coletor durante os seis dias de medições, sendo que no total somam-se 922.863,5 KJ.

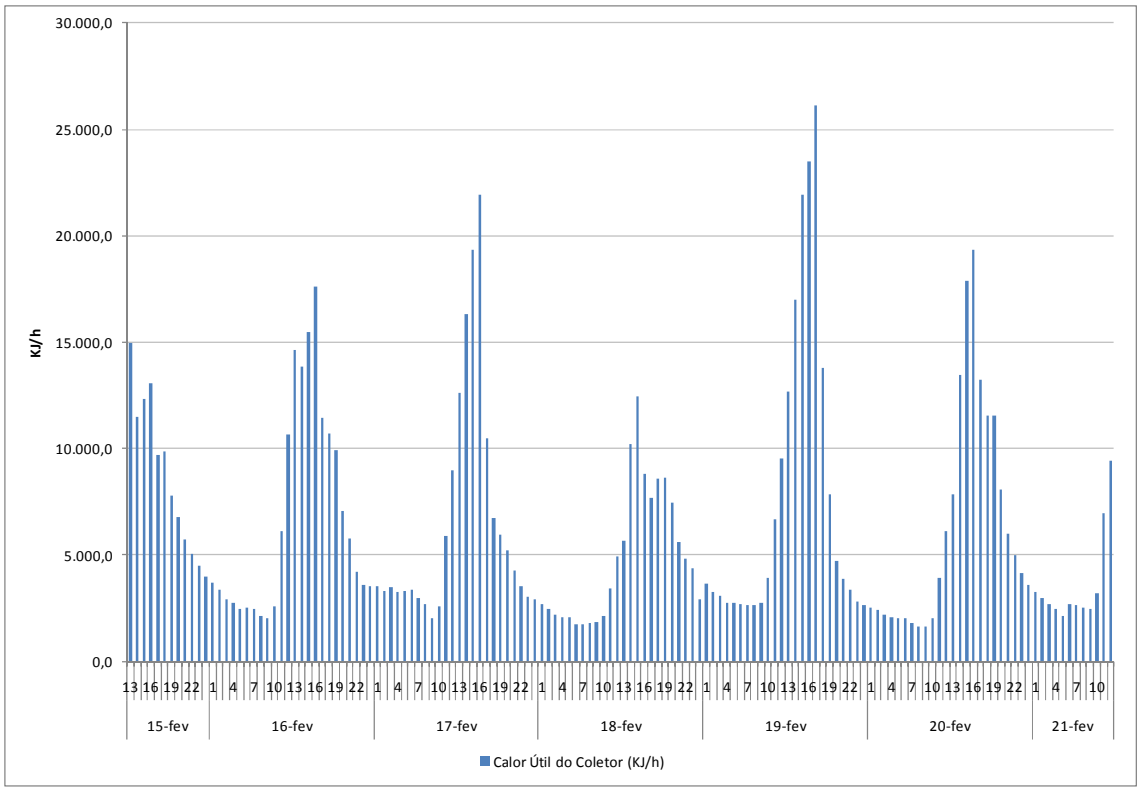

Figura 42 – Calor Útil fornecido pelo coletor

A Figura 43, por sua vez, apresenta a média do Calor Útil (Q_u) considerando um dia com valores médios dos três dias de céu claro.

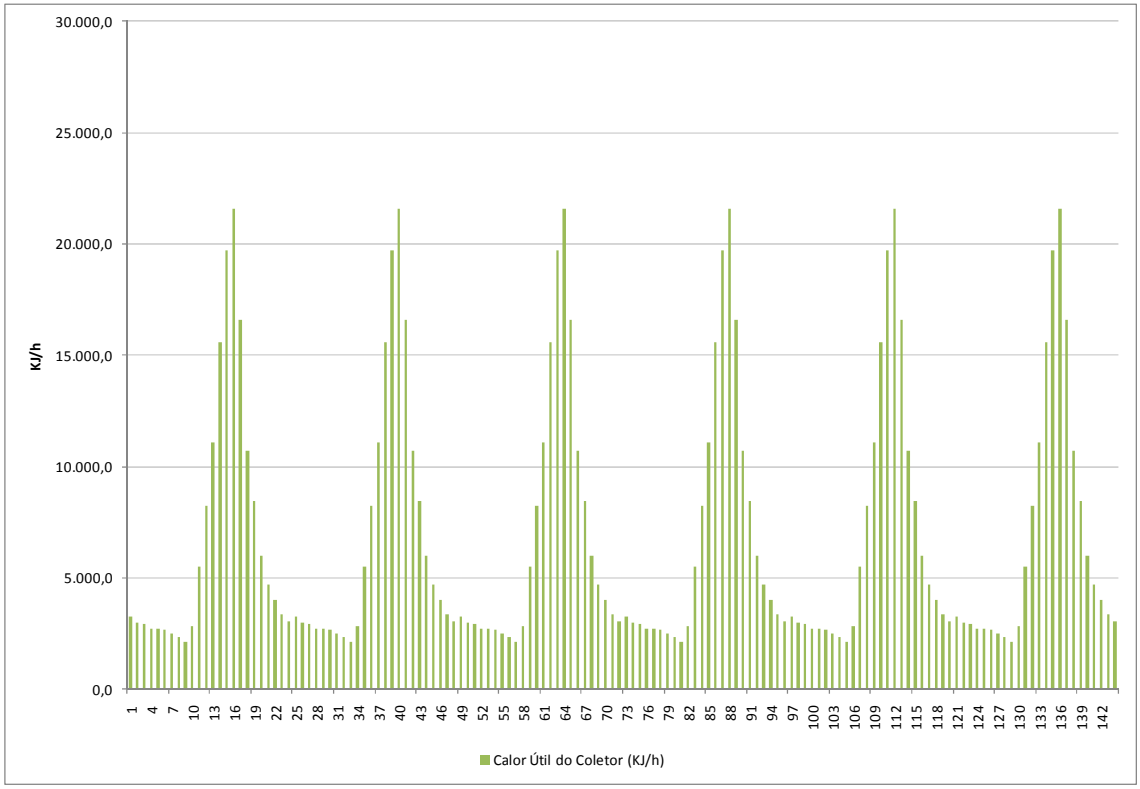

Figura 43– Calor Útil da média dos três dias de céu claro

4.2 Estudo de caso – Cura do tabaco com o uso do coletor solar

Para este estudo, foi calculada a demanda de energia e lenha que é necessária para um processo de cura com um período de seis dias e verificada a economia na demanda energética com o uso do coletor solar, considerando o Calor Útil (Q_u) fornecido pelo coletor constatado na seção anterior. Por fim, foi determinada a viabilidade econômica de uso do coletor solar na secagem do tabaco.

4.2.1 Demanda de energia e lenha do processo de cura

A temperatura dentro da estufa de cura deve ser constante: 35°C na dase de amarelação, 54°C na fase de secagem da folha e 71°C na fase de secagem do talo. Considerando que a temperatura ambiente é variável ao longo do dia, o consumo de lenha é uma função exponencial ao longo do tempo.

Para adequar o consumo de lenha a essa variação, pressupôs-se neste estudo que o consumo de lenha seja inversamente proporcional à temperatura ambiente (quanto maior a temperatura ambiente, menor a demanda energética). Isto

foi feito para cada uma das fases com base na diferença entre a temperatura a ser alcançada em cada fase e a temperatura medida na entrada do coletor (assumida como a temperatura ambiente). A Tabela 9 apresenta a extração de três dias de medições (16/02/2012, 18/02/2012 e 20/02/2012) da Tabela apresentada no Anexo 1, para melhor entendimento do método.

Tabela 9 – Extração de três dias de medições da tabela do Anexo 2 com cálculo de demanda e redução de lenha

Dia	Hora	Temp Fase (°C)	Calor Útil (Qu) fornecido pelo Coletor - (KJ/h)	Necessidade para Cura		Redução de Lenha	
				KJ/h	m^3/h Lenha	%	m^3
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
16	12	35	10.636,4	56.809,2	0,0114	18,7	0,0021
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
18	12	54	4.934,0	102.814,4	0,0206	4,8	0,0010
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
20	12	71	6.121,7	124.480,3	0,0249	4,9	0,0012
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)

A Figura 44 mostra os resultados obtidos através do método de cálculo descrito acima, onde a maior demanda energética é no período noturno, devido à ausência da radiação solar. Nas tardes do primeiro e do segundo dias de monitoramento, a demanda energética é nula, ou seja, a temperatura ambiente superou 35 °C, a temperatura necessária para a fase de amarelação, bastando nesse caso insuflar o ar na temperatura ambiente.

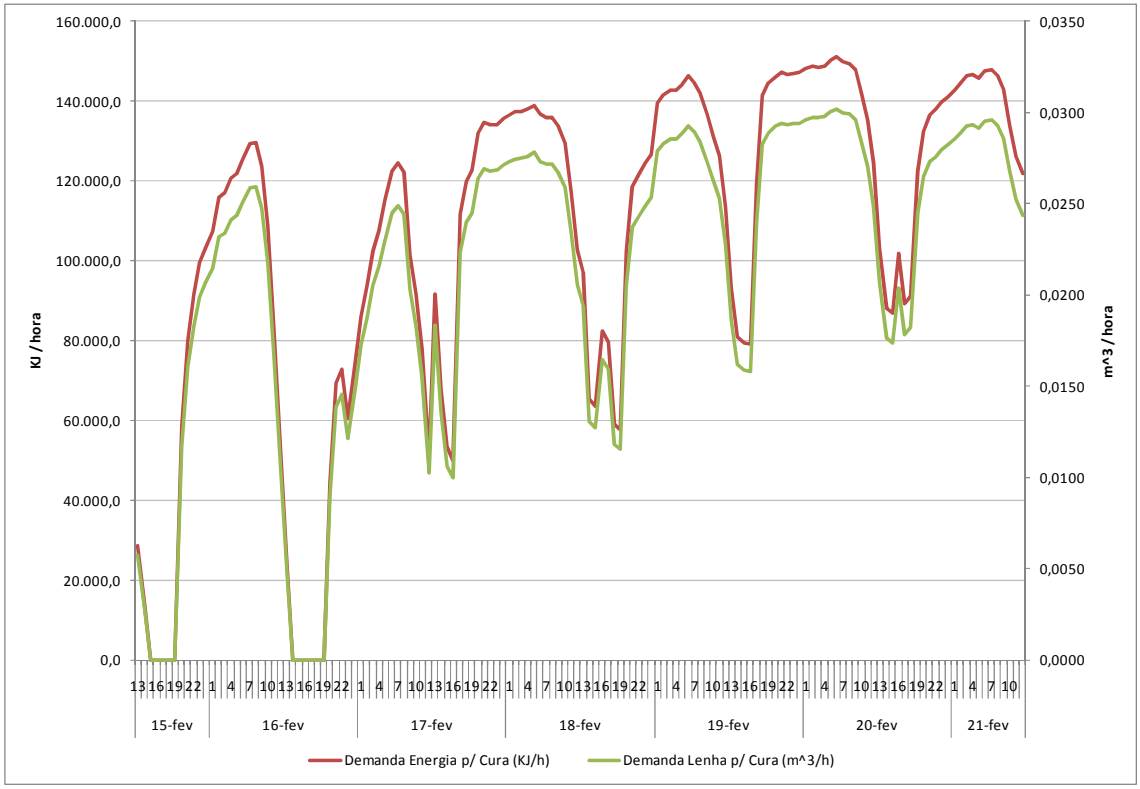

Figura 44 – Demanda de energia e total de lenha ao longo do período de coleta de dados

4.2.2 Economia na demanda energética da cura do tabaco com o uso do coletor solar

Durante o processo de cura do tabaco acompanhado no estudo de caso que teve duração de seis dias, foram utilizados 5 m^3 de lenha empilhada, o equivalente à 3,05 m^3 de lenha maciça. Considerando que o calor específico da lenha eucalipto é de 5GJ/m3 (Bazzo, 1995), o calor necessário para um processo de cura completo é de 25.000.000 KJ.

Os resultados do cruzamento do Calor Útil fornecido pelo coletor e da demanda energética do processo de cura acompanhado no estudo de caso são apresentados no Anexo 01. A economia de lenha total no processo de cura é de 5,2%, ou de aproximadamente 0,16m^3 de lenha (Figura 45), considerando-se puramente as medições tomadas no protótipo do coletor solar.

Considerando-se as temperaturas médias dos três dias de céu claro, a economia de lenha total no processo de cura do tabaco chega a 5,6% ou de

aproximadamente 0,17 m^3 de lenha, conforme memorial de cálculo demonstrado no Anexo 02.

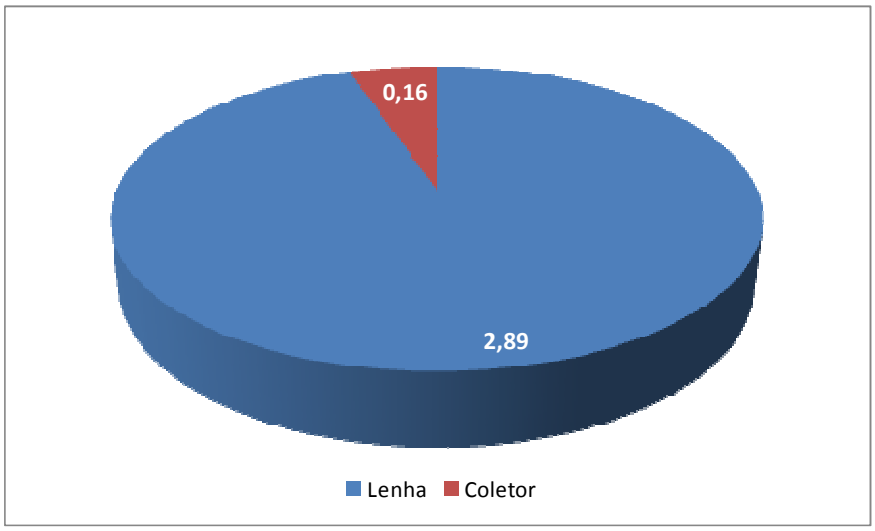

Figura 45 – Economia na demanda energética da cura do tabaco

4.2.3 Viabilidade econômica de uso do coletor solar na secagem do tabaco

A lenha foi considerada como fonte convencional de energia utilizada. O preço da lenha de eucalipto no estado do Rio Grande do Sul (R$53,00/$m^3$) foi obtido através da Associação dos Fumicultores do Brasil – AFUBRA (2012).

Os materiais utilizados na construção do protótipo do coletor solar de energia com leito de pedras britadas, bem como as quantidades e preços cotados em janeiro de 2012, estão listados na Tabela 10.

Tabela 10– Custo de construção do coletor armazenador de energia

Coletor 3X1m						Custo estimado para:			
Item	Unidade de medida	Qtde	R$/unid.	R$	R$/$m^2$	3m2 (3X1m) Vidro Duplo	6m2 (6X1m)	9m2 (9X1m)	12m2 (12X1m)
Tijolos 6 furos padrão	milheiro	0,17	380,00	64,60	21,53	64,60	129,20	193,80	258,40
Areia	m^3	0,1	65,00	6,50	2,17	6,50	13,00	19,50	26,00
Cimento	saco	0,8	19,90	15,92	5,31	15,92	31,84	47,76	63,68
Brita n°1	m^3	1	60,00	60,00	20,00	60,00	120,00	180,00	240,00
Lona preta	m	1	11,00	11,00	3,67	11,00	22,00	33,00	44,00
Madeira	ripa 3x0,15	3	1,00	3,00	1,00	3,00	6,00	9,00	12,00
Silicone	tubo	1	12,00	12,00	4,00	12,00	24,00	36,00	48,00
Vidro	m^2	3	57,00	171,00	57,00	342,00	342,00	513,00	684,00
Tubo PVC	m	2	4,60	9,20	3,07	9,20	18,40	27,60	36,80
Ventilador	unidade	1	208,25	208,25	208,25	208,25	208,25	208,25	208,25
Valor Total (R$)				**561,47**	**325,99**	**732,47**	**914,69**	**1.267,91**	**1.621,13**
Valor por m^2 (R$)					**325,99**	**244,16**	**152,45**	**140,88**	**135,09**

Na tabela de custos acima, o lado esquerdo apresenta os custos na montagem do protótipo (coletor com 3m^2). Ao lado direito estão calculados os custos proporcionais a um coletor da mesma dimensão do protótipo com a utilização de vidro duplo e para distintas dimensões de coletores (6 m2, 9 m2 e 12 m^2). Nota-se a diminuição do custo por m2 em função de alguns valores que são considerados invariáveis independentes da dimensão do coletor.

Tomando-se em conta tais custos de investimento e potenciais economias de combustível (lenha), a Tabela 11 mostra que o tempo de retorno do investimento para o protótipo do coletor solar a ar composto por pedras britadas é de 3,4 anos ou três safras.

Tabela 11 – Retorno de investimento para o protótipo de 3m^2

Iitem	Unidade	Protótipo 3 m^2
Volume Lenha por processo	m^3	5
Valor da lenha	R$/m^3	53,00
Quantidade processos por safra	un.	12
Economia de lenha	%	5,2%
Investimento em estrutura	R$	561,47
Consumo normal lenha	m^3	60,0
Consumo normal lenha	R$	3.180,00
Redução consumo lenha	m^3	3,1
Redução consumo lenha	R$	164,98
Tempo retorno investimento	**safra**	**3,4**

Para os estudos de viabilidade econômica de coletores com utilização de vidro duplo ou com diferentes dimensionamentos, seriam necessários novos levantamentos de dados, já que é evidente que dobrar o tamanho do coletor não dobraria o calor útil fornecido por este e que as perdas também não seriam as mesmas.

Conforme a Tabela 10, o coletor solar a ar composto por pedras britadas de 3m^2 com utilização de vidro duplo é o modelo sugerido com menor custo por m^2, sendo que neste caso o isolamento da caixa é de extrema importância para que a eficiência deste seja superior ao protótipo deste estudo.

O dimensionamento do coletor e a utilização de vidro duplo são sugestões para pesquisas futuras.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi projetado, construído e avaliado um coletor solar com leito de pedras britadas para pré-aquecimento de ar, com materiais de baixo custo e de fácil execução, que pode ser utilizado para fornecer uma contribuição energética em processos de secagem.

O um protótipo do coletor solar foi construído na cidade de Santa Cruz do Sul – RS. Com uma área de $3m^2$. Entre os materiais utilizados para a construção do coletor estão tijolos, cimento e areia, brita para o leito de britas e vidro para a cobertura – sendo este o material com o valor mais elevado. A construção do coletor se demonstrou ser de fácil execução, de forma que o próprio agricultor poderia fazê-la.

Para a realização das medições foram instalados cinco aparelhos do tipo HOBO para a coleta e armazenamento dos valores de temperaturas e umidade relativa nas extremidades do coletor, sendo utilizados dois aparelhos na entrada de ar do coletor e três aparelhos na saída de ar do mesmo. Na entrada de ar do coletor foi acoplado um ventilador que apresentava vazão contínua. Os registradores foram programados para tomar leituras a cada cinco minutos dentro de um período de seis dias, iniciando no dia 15/02/2012 e finalizando no dia 21/02/2012. A duração e o período do ano das medições foram definidos tendo em vista o estudo de caso proposto.

O coletor solar apresentou, durante o dia, diferenças significativas de temperatura do ar entre a entrada e a saída do coletor, com valores que ultrapassam 20^0C, sendo que durante a noite as diferenças desses valores são menores, mas ainda assim mostram o acúmulo de energia que ocorre no leito de brita, que continua a aquecer o ar que passa pelo coletor. A taxa de Calor Útil fornecida pelo coletor foi calculada por hora.

Um estudo de caso foi proposto considerando a utilização do coletor solar como sistema suplementar na cura do tabaco em estufas existentes a lenha com intuito de diminuir o consumo desta. Para isso, foi acompanhado um processo de cura e verificou-se que foram necessários 5 m^3 de lenha empilhada como fonte de energia, o equivalente à 3,05 m^3 de lenha maciça. Considerando que o calor

específico da lenha eucalipto é de 5GJ/m^3, calor necessário para um processo de cura completo é de 25.000.000 KJ.

Como o Calor Útil fornecido pelo coletor solar foi calculado por hora, assumiu-se que o consumo de lenha é inversamente proporcional à temperatura ambiente. Com isso, a demanda de lenha e, conseqüentemente de energia necessária para um ciclo de cura com o período de seis dias, também fosse demonstrado por hora.

Assim, foi calculada uma redução de 5,2% no consumo de lenha com o uso do coletor solar, considerando o aproveitamento Calor Útil (Q_u) fornecido pelo coletor de 3m^2 na demanda energética do processo de cura.

Foram somados os custos da montagem do protótipo (coletor com 3 m^2) e calculados os custos proporcionais a um coletor da mesma dimensão do protótipo com a utilização de vidro duplo e para distintas dimensões de coletores (6 m^2, 9 m^2 e 12 m^2).

Tomando-se em conta tais custos de investimento e potenciais economias de combustível (lenha), o tempo de retorno do investimento para o protótipo do coletor solar a ar composto por pedras britadas é de 3,4 anos ou três safras.

Para os estudos de viabilidade econômica de coletores com utilização de vidro duplo ou com diferentes dimensionamentos, seriam necessários novos levantamentos de dados, já que é evidente que dobrar o tamanho do coletor não dobraria o calor útil fornecido por este e que as perdas também não seriam as mesmas.

O coletor solar a ar composto por pedras britadas de 3m^2 com utilização de vidro duplo é o modelo sugerido com menor custo por m^2, sendo que neste caso o isolamento da caixa é de extrema importância para que a eficiência deste seja superior ao protótipo deste estudo. O dimensionamento do coletor e a utilização de vidro duplo são sugestões para pesquisas futuras, assim como o estudo de caso em outras culturas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-1**: **Desempenho Térmico de Edificações: Parte 1: Definições, símbolos e unidades.** Rio de Janeiro, 2005a. 8p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações.** Rio de Janeiro, 2005b. 34p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.** Rio de Janeiro, 2005c. 30p.

AFUBRA . ASSICIAçÃO DOS FUMICULTORES DO BRASIL. Disponível em: <http://www.afubra.com.br/>. Acesso em: 11 jan. 2012

ALDABÓ, R. **Energia solar**. São Paulo: Artliber, 2002. 155p.

ALMEIDA, D. **Psicrometria:** apontamentos de apoio as aulas de tecnologia pós-colheita, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto, 2004 Disponível em: <http://dalmeida.com/poscolheita/ISA2005/Psicrometria-Almeida-2004.pdf>. Acesso em 05 mar. 2012

ARRUDA, L. B. **Operação de sistemas de aquecimento solar de água com controle de vazões em coletores planos.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade de São Paulo, São Paulo 2004.

ASHRAE Standard 93: **Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors**, American society of heatihg, refrigeration and air conditioning engineers, Nova Iorque, 1977.

BAZZO, E. **Geração de vapor**, 2. Ed., Florianópolis: Ed. Da UFSC, 1995. 216p.

BLISS, R. W. Jr. **The derivations of several "plate – efficiency factors" useful in the design of flat – plate solar heat collectors**. Solar Energy, v.3, n.4, p.55-64, 1959.

BOPSHETTY, S. V.; NAYAK, K.; SUKHATME, S. P. **Performance analysis of a solar concrete collector**. Energy Conversion and Management, v.33, n.11, p.1007-1016,1992.

CABIROL, T.; FAURÉ, D.; ROUX D. **O aquecimento das habitações e a energia solar Vol. 1**. Lisboa: Edições Cetop, n.° 06 16 010/067, 1984a, 317p.

CABIROL, T.; ROUX D. **O aquecimento das habitações e a energia solar Vol. 2.** Lisboa: Edições Cetop, n.° 06 16 011/068, 1984b, 317p.

CHOUDHURY, C.; GARG, H. P. **Performance of air – heating collectors with packed airflow passage**. Solar Energy, v.50, n.3, p.205-221, 1993.

COSTA, E. C. **Física Aplicada à Construção**. 4.ed. São Paulo: Edgar Blücher, 2003. 263 p.

CRUZ, E. M. G. **Seleción de Materiales em la Concepción Arquitectónica bioclimática.** In: ESTUDIOS DE ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA, vol. IV, p.119-134

DICKINSON,W.C; CHEREMISINOFF, P. N; **Solar Energy Technology.** Handbook, Dekker, Inc, 1980.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes,** New York, John Wiley & Sons, 1991, 920p.

ESPINO, E. **El mejoramiento genético del tabaco (nicotiana tabacum L.) en Cuba.** Boletín de Reseñas. Tabaco.No.14: CIDA, 1988.

FEE . Fundação de Economia e Estatística. Disponível em: <http://www.fee.rs.gov.br>. Acesso em: dez. 2011.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S.T. R. **Manual de conforto térmico.** 5. ed. São Paulo, Studio Nobel, 2001, 243 p. ISBN 85-85445-39-4.

GOMES, D. G. **Otimização teórica/experimental de um coletor de energia solar plano**. Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 1998.

GRATTO, D. A.; SANTINI, E. J.; HASELEIN, C. R.; DURLO, L. A. **Características da lenha produzida na região da quarta colônia de imigração italiana do Rio Grande do Sul**, Ciêcia Florestal, vol. 13, número 002, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Brasil, 2003

GUANDAGNIN, O. **Secagem de grãos com energia solar:** experiência realizada na propriedade do senhor Adilson Peruzzo. Nova Bassano: Emater, 2005. Disponível em: <http://www.emater.tche.br/site/br/arquivos/ area/frentes/1/secagem_graos.pdf>. Acesso em 17 out. 2009

HARRISON, E.F.; MINNIS P.; BARKSTROM, B.R.; GIBSON, G.G. **Radiation budget at the top of atmosphere**. Edited by R.J., 1993.

HAWKS, Jr. **Tabaco Flue-Cured**. Madrid, 1980.

HAWKS, Jr.; COLLINS W. K. **Principles of Flue-Cured Tobacco Production**, N. C. State University, 1983.

HOTTEL, H. C.; WOERTZ, B., B. **The performance of flat–plate solar heat collectors**. Transactions ASME, v.64, p.91–103, 1942.

INCROPERA, F. P.; DEWWIT, D.P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

KALOUGIROU, S. A. **Solar Thermal Collectors and Applications**, Progress in Energy and Combustion Science, v.30, n.3, p.231-295, 2004.

KONTTINEN, P.; LUND, P.D.; KILPI, R.J. **Mechanically manufactured selective solar absorber surfaces**. Solar Energy Mater Solar Cells 2003; 79(3): 273-83.
KREIDER, J.F. **The solar heating design process**. Nova Iorque: McGraw-Hill; 1982 apud KALOUGIROU, S. A. **Solar Thermal Collectors and Applications,** Progress in Energy and Combustion Science, v.30, n.3, p.231-295, 2004.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW, 1997.

LIBUY, W. R. **Manual especializado sobre manejo de nutrição de plantas de tabaco.** Crop Kit. SQM, 2005. Disponível em: <http://www.sqm.cl/PDF/SPN/CropKits/SQM-Crop_Kit_Tobacco_L-PTG.pdf>. Acesso em 11 set. 2009.

MORAES-DUZAT R.; MACEDO H.; ROCHA L. C.; NASCIMENTO R. C.; BARBOSA A. P. **Secador solar multi-uso para beneficiamento de Produtos naturais da Amazônia**. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Manaus. 2004.

NAYAK, J. K.; SUKHATME, S. P.; LIMAYE, R. G.; BOPSHETTY, S. V. **Performance studies on solar concrete collector**s. Solar Energy, v.42, n.1, p.45-56, 1989.

PROFIGEN. Disponível em: <http://profigen.com.br>. Acesso em: 20 nov. 2011.

RADIASOL, versão 2.1. **Laboratório de Energia Solar** – Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos (GESTE), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2001.

RIVERO, R. **Acondicionamento Térmico Natural**: arquitetura e clima. Porto Alegre: DC Luzzatto, 1985. 225 p.

ROBINSON, N. **The radiation reaching the earth.** In: Solar Radiation. Amsterdam: Elsevier, 1966.

RODRÍGUEZ V., M.; FUENTES F. V., et al.; **Estudios De Arquitectura Bioclimática**, Anuário 2002 Vol. IV Editorial Limusa SA de CV, UAM. 240 pp. México, D.F. 2002.

SANTA CRUZ DO SUL. Disponível em: <http://www.pmscs.rs.gov.br>. Acesso em: 20 nov. 2011.

SANTOS, L., A. **Construção e avaliação de um coletor armazenador de energia solar, não convencional, para aquecimento de ar na secagem de produtos agrícolas.** 135p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade

de Engenharia de Alimentos – Universidade Estadual de Campinas, 1980. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/ document/?code=vtls000052688>. Acesso em 15 set. 2011.

SANTOS, B. M. **Metodologia de dimensionamento de sistemas de aquecimento solar para secagem de produtos agrícolas.** 78p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas, 2004. Disponível em: < http://www. bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000362229>. Acesso em 02 set. 2011.

SCHWEIGER H. **Optimisation of solar thermal absorber elements with transparent insulation**. Universitat Politecnica de Catalunya, Terrassa, Barcelona, Espanha; 1997.

SMITH SCHNEIDER, P. **Termometria e Psicrometria**, Apostila da disciplina de Medições Térmicas, Engenharia Mecânica, UFRGS, Porto Alegre. 2008.

SWERA Data, (Solar and Wind Energy Resource Assesment). Disponível em: <http://swera.unep.net/>. Acesso em: jan. 2011.

TRIPANAGNOSTOPOULOS, Y.; SOULIOTIS, M.; NOUSIA, T. **Solar collectors with colored absorbers**. Solar Energy 2000;68: 343-56.

WACKELGARD, E.; NIKLASSON, G. A.; GRANQVIST, C. G. **Selective solar-absorbing coatings**. In: Gordon J., editor. Solar energy: the state of the art. Germany: ISES; 2001. P.109-44.

WEISS, W.; BUCHINGER, J.; **Solar Drying**, Austrian Development Cooperation (2009)

WIKIPEDIA. Disponível em: <http://www.wikipedia.org/>. Acesso em: 20 jul. 2011.

Anexo 01

Legenda:
- Fase Amarelação (35°C)
- Fase Secagem Folha (52°C)
- Fase Secagem Talo (71°C)

vazão mássica do fluido (m) - (Kg/h)
207,8

Cálculos Calor útil

Dia	Horário	Hora	Entrada		Saída		Entalpia (H) - (KJ/Kg)		Calor Útil (Qu) fornecido pelo Coletor - (KJ/h)	Necessidade para cura		Redução de Lenha	
			Média de Temp. (°C)	Média de UA (kg/kg)	Média de Temp. (°C)	Média de UA (kg/kg)	Entrada	Saída		KJ/h	m^3/h Lenha	%	m^3
15-fev	13	1	32,2	0,0133	52,4	0,0299	348,720	420,619	14.940,3	28.637,2	0,0057	52,2%	0,0030
	14	2	33,7	0,0141	49,9	0,0266	352,541	407,727	11.467,4	13.267,6	0,0027	86,4%	0,0023
	15	3	37,1	0,0139	52,1	0,0281	355,420	414,699	12.317,9	0,0	0,0000	0,0%	0,0000
	16	4	39,6	0,0144	54,3	0,0300	359,840	422,792	13.081,2	0,0	0,0000	0,0%	0,0000
	17	5	36,8	0,0154	49,6	0,0263	359,899	406,509	9.685,3	0,0	0,0000	0,0%	0,0000
	18	6	38,5	0,0147	49,9	0,0263	359,331	406,926	9.890,3	0,0	0,0000	0,0%	0,0000
	19	7	35,1	0,0146	44,7	0,0236	355,590	393,002	7.774,2	0,0	0,0000	0,0%	0,0000
	20	8	29,2	0,0139	38,5	0,0215	347,347	380,071	6.799,8	58.484,0	0,0117	11,6%	0,0014
	21	9	27,1	0,0137	34,9	0,0201	344,500	372,115	5.738,2	80.121,6	0,0160	7,2%	0,0011
	22	10	26,0	0,0133	32,4	0,0191	342,225	366,589	5.062,8	91.532,5	0,0183	5,5%	0,0010
	23	11	25,2	0,0130	30,6	0,0183	340,600	362,260	4.500,9	99.593,8	0,0199	4,5%	0,0009
	24	12	24,8	0,0130	29,4	0,0178	340,075	359,340	4.003,3	103.336,8	0,0207	3,9%	0,0008
16-fev	1	13	24,4	0,0129	28,3	0,0174	339,278	357,099	3.703,2	107.426,6	0,0215	3,4%	0,0007
	2	14	23,6	0,0129	27,1	0,0171	338,506	354,783	3.382,3	115.910,8	0,0232	2,9%	0,0007
	3	15	23,5	0,0134	26,4	0,0170	339,806	353,951	2.939,3	117.065,4	0,0234	2,5%	0,0006
	4	16	23,1	0,0134	25,8	0,0169	339,580	352,786	2.744,2	120.491,2	0,0241	2,3%	0,0005
	5	17	23,0	0,0135	25,3	0,0167	339,750	351,686	2.480,3	121.941,9	0,0244	2,0%	0,0005
	6	18	22,7	0,0131	24,8	0,0164	338,215	350,397	2.531,3	125.316,9	0,0251	2,0%	0,0005
	7	19	22,3	0,0129	24,3	0,0161	337,050	348,966	2.476,1	129.394,1	0,0259	1,9%	0,0005
	8	20	22,2	0,0132	24,0	0,0160	337,885	348,252	2.154,2	129.559,0	0,0259	1,7%	0,0004
	9	21	22,8	0,0136	24,3	0,0163	339,765	349,550	2.033,3	123.709,8	0,0247	1,6%	0,0004

	10	22	24,3	0,0133	25,8	0,0169	340,528	352,841	2.558,7	108.572,8	0,0217	2,4%	0,0005
	11	23	26,8	0,0132	34,1	0,0204	342,830	372,307	6.125,2	83.073,7	0,0166	7,4%	0,0012
	12	24	29,4	0,0137	46,0	0,0248	347,064	398,251	10.636,4	56.809,2	0,0114	18,7%	0,0021
	13	25	32,7	0,0143	54,2	0,0299	352,209	422,545	14.615,5	23.705,7	0,0047	61,7%	0,0029
	14	26	35,2	0,0136	53,4	0,0291	352,665	419,199	13.825,7	0,0	0,0000	0,0%	0,0000
	15	27	39,7	0,0140	56,5	0,0325	358,534	432,919	15.457,1	0,0	0,0000	0,0%	0,0000
	16	28	39,6	0,0133	58,2	0,0345	356,408	441,009	17.579,8	0,0	0,0000	0,0%	0,0000
	17	29	36,4	0,0150	51,7	0,0278	358,068	413,229	11.462,2	0,0	0,0000	0,0%	0,0000
	18	30	37,5	0,0149	50,9	0,0272	358,888	410,544	10.733,8	0,0	0,0000	0,0%	0,0000
	19	31	36,7	0,0137	48,3	0,0254	354,627	402,253	9.896,5	0,0	0,0000	0,0%	0,0000
	20	32	30,6	0,0148	41,6	0,0223	351,669	385,720	7.075,6	44.548,2	0,0089	15,9%	0,0014
	21	33	28,2	0,0147	37,2	0,0208	348,824	376,622	5.776,2	69.247,9	0,0138	8,3%	0,0012
	22	34	27,8	0,0154	34,2	0,0198	350,500	370,614	4.179,5	72.906,3	0,0146	5,7%	0,0008
	23	35	29,0	0,0148	32,8	0,0192	349,957	367,248	3.593,0	60.687,6	0,0121	5,9%	0,0007
	24	36	27,7	0,0140	31,1	0,0184	346,048	363,124	3.548,2	73.934,0	0,0148	4,8%	0,0007
17-fev	1	37	26,5	0,0133	29,6	0,0178	342,689	359,688	3.532,3	86.068,2	0,0172	4,1%	0,0007
	2	38	25,8	0,0136	28,6	0,0178	342,757	358,560	3.283,9	93.676,8	0,0187	3,5%	0,0007
	3	39	24,9	0,0132	27,9	0,0177	340,770	357,618	3.501,0	102.368,2	0,0205	3,4%	0,0007
	4	40	24,4	0,0131	27,2	0,0173	339,949	355,728	3.278,8	107.595,8	0,0215	3,0%	0,0007
	5	41	23,7	0,0126	26,5	0,0169	337,592	353,569	3.320,0	115.102,9	0,0230	2,9%	0,0007
	6	42	22,9	0,0122	25,7	0,0166	335,825	351,903	3.341,0	122.567,8	0,0245	2,7%	0,0007
	7	43	22,7	0,0122	25,3	0,0161	335,642	349,938	2.970,7	124.369,5	0,0249	2,4%	0,0006
	8	44	23,0	0,0124	25,1	0,0160	336,438	349,380	2.689,3	122.094,1	0,0244	2,2%	0,0005
	9	45	25,0	0,0139	26,0	0,0167	342,886	352,587	2.015,9	101.382,8	0,0203	2,0%	0,0004
	10	46	26,0	0,0135	27,0	0,0173	342,811	355,263	2.587,5	91.532,5	0,0183	2,8%	0,0005
	11	47	27,3	0,0140	34,6	0,0208	345,648	374,100	5.912,4	77.757,4	0,0156	7,6%	0,0012
	12	48	30,0	0,0138	43,4	0,0234	347,883	391,174	8.995,6	51.209,5	0,0102	17,6%	0,0018
	13	49	33,3	0,0143	51,8	0,0279	352,975	413,751	12.629,1	91.775,7	0,0184	13,8%	0,0025
	14	50	38,7	0,0143	57,7	0,0333	358,324	436,923	16.332,7	67.934,8	0,0136	24,0%	0,0033
	15	51	42,0	0,0148	61,4	0,0383	363,349	456,303	19.315,5	53.265,8	0,0107	36,3%	0,0039
	16	52	42,8	0,0141	62,4	0,0417	362,180	467,709	21.928,6	49.861,3	0,0100	44,0%	0,0044
	17	53	28,9	0,0146	46,5	0,0250	349,009	399,363	10.463,4	111.669,9	0,0223	9,4%	0,0021

	18	54	27,0	0,0167	39,9	0,0230	353,701	386,161	6.745,1	119.794,4	0,0240	5,6%	0,0013
	19	55	26,4	0,0163	37,1	0,0220	351,609	380,117	5.923,9	122.612,4	0,0245	4,8%	0,0012
	20	56	24,3	0,0144	32,9	0,0197	343,869	368,878	5.196,7	132.089,5	0,0264	3,9%	0,0010
	21	57	23,7	0,0145	30,8	0,0189	343,576	364,106	4.266,0	134.665,1	0,0269	3,2%	0,0009
	22	58	23,8	0,0150	29,6	0,0186	344,960	362,069	3.555,3	134.019,4	0,0268	2,7%	0,0007
	23	59	23,8	0,0151	28,7	0,0183	345,368	360,076	3.056,3	134.163,7	0,0268	2,3%	0,0006
	24	60	23,5	0,0148	27,8	0,0180	344,217	358,308	2.928,0	135.658,7	0,0271	2,2%	0,0006
18-fev	1	61	23,3	0,0147	27,1	0,0176	343,571	356,479	2.682,2	136.445,1	0,0273	2,0%	0,0005
	2	62	23,1	0,0146	26,4	0,0174	343,152	354,996	2.461,2	137.227,8	0,0274	1,8%	0,0005
	3	63	23,1	0,0146	25,8	0,0172	343,144	353,706	2.194,9	137.438,7	0,0275	1,6%	0,0004
	4	64	22,9	0,0146	25,4	0,0170	342,926	352,845	2.061,1	137.930,9	0,0276	1,5%	0,0004
	5	65	22,7	0,0144	25,1	0,0169	342,145	352,154	2.079,8	138.985,5	0,0278	1,5%	0,0004
	6	66	23,2	0,0150	25,2	0,0171	344,363	352,874	1.768,6	136.661,6	0,0273	1,3%	0,0004
	7	67	23,4	0,0150	25,2	0,0172	344,765	353,265	1.766,3	135.729,0	0,0271	1,3%	0,0004
	8	68	23,4	0,0150	25,3	0,0173	344,757	353,423	1.800,7	135.940,0	0,0272	1,3%	0,0004
	9	69	23,9	0,0154	25,8	0,0177	346,362	355,181	1.832,6	133.734,4	0,0267	1,4%	0,0004
	10	70	24,9	0,0160	27,2	0,0186	349,216	359,509	2.138,7	129.227,2	0,0258	1,7%	0,0004
	11	71	27,6	0,0165	31,3	0,0207	353,497	370,041	3.437,9	117.063,4	0,0234	2,9%	0,0007
	12	72	30,8	0,0157	36,1	0,0217	354,381	378,125	4.934,0	102.814,4	0,0206	4,8%	0,0010
	13	73	32,1	0,0159	38,7	0,0226	356,549	383,840	5.671,0	97.080,4	0,0194	5,8%	0,0011
	14	74	39,3	0,0160	50,9	0,0280	364,130	413,192	10.194,8	65.194,6	0,0130	15,6%	0,0020
	15	75	39,7	0,0144	53,4	0,0292	359,725	419,581	12.437,9	63.579,3	0,0127	19,6%	0,0025
	16	76	35,5	0,0153	47,3	0,0251	358,159	400,397	8.777,0	82.339,2	0,0165	10,7%	0,0018
	17	77	36,1	0,0160	46,1	0,0247	360,791	397,824	7.695,4	79.674,8	0,0159	9,7%	0,0015
	18	78	40,7	0,0172	50,8	0,0272	369,326	410,589	8.574,2	58.970,2	0,0118	14,5%	0,0017
	19	79	41,0	0,0159	49,9	0,0264	365,641	407,325	8.661,9	57.680,6	0,0115	15,0%	0,0017
	20	80	30,9	0,0149	42,6	0,0227	352,285	388,180	7.458,9	102.374,1	0,0205	7,3%	0,0015
	21	81	27,3	0,0153	36,7	0,0209	349,671	376,538	5.582,7	118.401,2	0,0237	4,7%	0,0011
	22	82	26,5	0,0152	34,0	0,0202	348,447	371,633	4.817,9	121.963,0	0,0244	4,0%	0,0010
	23	83	26,0	0,0147	32,3	0,0195	346,536	367,563	4.369,4	124.416,4	0,0249	3,5%	0,0009
	24	84	25,5	0,0144	30,6	0,0173	344,993	359,141	2.940,0	126.617,3	0,0253	2,3%	0,0006
19-fev	1	85	25,0	0,0144	29,4	0,0187	344,560	362,046	3.633,6	139.385,9	0,0279	2,6%	0,0007
	2	86	24,3	0,0148	28,6	0,0184	344,928	360,465	3.228,7	141.583,0	0,0283	2,3%	0,0006

	3	87	23,9	0,0145	27,8	0,0181	343,708	358,536	3.081,2	142.803,4	0,0286	2,2%	0,0006
	4	88	23,8	0,0146	27,2	0,0178	343,764	357,089	2.768,9	142.851,3	0,0286	1,9%	0,0006
	5	89	23,4	0,0143	26,6	0,0176	342,623	355,761	2.730,1	144.262,2	0,0289	1,9%	0,0005
	6	90	22,7	0,0141	26,0	0,0172	341,125	353,984	2.672,1	146.238,5	0,0292	1,8%	0,0005
	7	91	23,3	0,0131	25,5	0,0166	338,858	351,635	2.655,0	144.547,5	0,0289	1,8%	0,0005
	8	92	24,2	0,0125	25,7	0,0162	337,861	350,590	2.644,9	141.869,5	0,0284	1,9%	0,0005
	9	93	26,0	0,0129	27,8	0,0166	340,918	354,236	2.767,4	136.348,2	0,0273	2,0%	0,0006
	10	94	27,7	0,0131	33,2	0,0175	343,416	362,279	3.919,7	131.204,3	0,0262	3,0%	0,0008
	11	95	29,3	0,0143	41,2	0,0208	348,730	380,976	6.700,7	126.334,2	0,0253	5,3%	0,0013
	12	96	33,5	0,0149	50,2	0,0242	354,793	400,762	9.552,2	113.516,0	0,0227	8,4%	0,0019
	13	97	40,3	0,0159	57,2	0,0300	364,897	425,890	12.674,1	93.119,5	0,0186	13,6%	0,0025
	14	98	44,3	0,0158	62,2	0,0361	368,750	450,390	16.964,4	80.926,0	0,0162	21,0%	0,0034
	15	99	44,8	0,0160	64,5	0,0434	369,832	475,222	21.899,6	79.290,5	0,0159	27,6%	0,0044
	16	100	44,9	0,0159	65,2	0,0456	369,891	482,905	23.484,1	79.059,5	0,0158	29,7%	0,0047
	17	101	31,5	0,0150	55,7	0,0477	353,100	478,833	26.127,1	119.511,8	0,0239	21,9%	0,0052
	18	102	24,3	0,0111	42,2	0,0267	333,646	399,949	13.777,6	141.511,1	0,0283	9,7%	0,0028
	19	103	23,3	0,0129	35,9	0,0210	338,165	375,851	7.831,0	144.500,8	0,0289	5,4%	0,0016
	20	104	22,7	0,0153	32,6	0,0194	344,910	367,536	4.701,6	146.190,6	0,0292	3,2%	0,0009
	21	105	22,4	0,0148	30,7	0,0182	343,148	361,888	3.894,1	147.105,5	0,0294	2,6%	0,0008
	22	106	22,6	0,0144	29,3	0,0175	342,070	358,311	3.374,9	146.718,1	0,0293	2,3%	0,0007
	23	107	22,5	0,0146	28,0	0,0172	342,439	356,031	2.824,2	146.957,9	0,0294	1,9%	0,0006
	24	108	22,4	0,0144	27,2	0,0170	341,855	354,487	2.625,0	147.105,5	0,0294	1,8%	0,0005
20-fev	1	109	22,1	0,0142	26,7	0,0167	341,069	353,177	2.516,0	147.990,2	0,0296	1,7%	0,0005
	2	110	21,9	0,0139	26,1	0,0163	339,951	351,514	2.402,6	148.618,7	0,0297	1,6%	0,0005
	3	111	21,9	0,0139	25,6	0,0161	339,793	350,325	2.188,6	148.570,7	0,0297	1,5%	0,0004
	4	112	21,9	0,0139	25,3	0,0160	339,896	349,803	2.058,7	148.810,5	0,0298	1,4%	0,0004
	5	113	21,4	0,0138	24,8	0,0159	338,954	348,775	2.040,7	150.153,3	0,0300	1,4%	0,0004
	6	114	21,1	0,0134	24,3	0,0155	337,432	347,164	2.022,2	151.064,4	0,0302	1,3%	0,0004
	7	115	21,5	0,0133	24,1	0,0153	337,409	346,108	1.807,6	149.961,5	0,0300	1,2%	0,0004
	8	116	21,7	0,0136	24,1	0,0153	338,513	346,422	1.643,5	149.433,9	0,0299	1,1%	0,0003
	9	117	22,2	0,0137	24,6	0,0155	339,396	347,347	1.652,2	147.840,0	0,0296	1,1%	0,0003
	10	118	24,2	0,0138	27,8	0,0157	341,748	351,417	2.009,2	141.773,6	0,0284	1,4%	0,0004
	11	119	26,4	0,0149	35,1	0,0182	347,512	366,419	3.928,8	135.212,4	0,0270	2,9%	0,0008

	12	120	29,9	0,0160	42,9	0,0212	354,480	383,941	6.121,7	124.480,3	0,0249	4,9%	0,0012
	13	121	36,9	0,0175	51,1	0,0250	366,185	404,026	7.863,3	103.428,8	0,0207	7,6%	0,0016
	14	122	41,9	0,0154	58,2	0,0309	364,946	429,704	13.456,4	88.133,3	0,0176	15,3%	0,0027
	15	123	42,4	0,0158	61,1	0,0373	366,651	452,630	17.866,2	86.770,4	0,0174	20,6%	0,0036
	16	124	37,3	0,0159	58,1	0,0391	361,824	454,966	19.354,6	101.949,8	0,0204	19,0%	0,0039
	17	125	41,6	0,0153	55,2	0,0314	364,542	428,244	13.237,0	89.129,1	0,0178	14,9%	0,0026
	18	126	40,9	0,0168	53,5	0,0306	368,286	423,928	11.562,2	91.142,0	0,0182	12,7%	0,0023
	19	127	30,6	0,0160	47,3	0,0285	355,063	410,739	11.569,3	122.333,7	0,0245	9,5%	0,0023
	20	128	27,2	0,0144	40,2	0,0227	346,855	385,620	8.055,2	132.592,5	0,0265	6,1%	0,0016
	21	129	25,9	0,0140	35,9	0,0201	344,363	373,134	5.978,6	136.595,6	0,0273	4,4%	0,0012
	22	130	25,5	0,0138	33,3	0,0191	343,294	367,361	5.001,0	137.826,0	0,0276	3,6%	0,0010
	23	131	24,9	0,0142	31,5	0,0185	343,802	363,864	4.168,7	139.676,1	0,0279	3,0%	0,0008
	24	132	24,4	0,0141	30,0	0,0179	343,176	360,403	3.579,8	140.994,9	0,0282	2,5%	0,0007
21-fev	1	133	23,8	0,0140	28,6	0,0175	342,037	357,688	3.252,1	142.851,3	0,0286	2,3%	0,0007
	2	134	23,3	0,0137	27,4	0,0170	340,615	354,891	2.966,5	144.455,3	0,0289	2,1%	0,0006
	3	135	22,7	0,0136	26,4	0,0166	339,732	352,723	2.699,3	146.286,5	0,0293	1,8%	0,0005
	4	136	22,6	0,0135	25,7	0,0163	339,173	351,104	2.479,2	146.720,6	0,0293	1,7%	0,0005
	5	137	22,9	0,0135	25,4	0,0160	339,541	349,709	2.112,7	145.613,8	0,0291	1,5%	0,0004
	6	138	22,3	0,0118	24,9	0,0152	333,786	346,695	2.682,3	147.644,4	0,0295	1,8%	0,0005
	7	139	22,2	0,0114	24,5	0,0147	332,362	344,987	2.623,5	147.939,7	0,0296	1,8%	0,0005
	8	140	22,7	0,0114	24,7	0,0147	332,901	344,963	2.506,4	146.386,2	0,0293	1,7%	0,0005
	9	141	23,9	0,0121	25,9	0,0153	336,305	348,240	2.480,1	142.605,2	0,0285	1,7%	0,0005
	10	142	26,8	0,0128	31,6	0,0163	341,695	357,143	3.210,1	133.833,0	0,0268	2,4%	0,0006
	11	143	29,3	0,0130	41,5	0,0197	344,576	377,905	6.925,7	126.331,7	0,0253	5,5%	0,0014
	12	144	30,8	0,0140	44,3	0,0243	349,336	394,725	9.431,5	121.909,6	0,0244	7,7%	0,0019
Total											3,0500		0,1582
										Economia de lenha >>>			*5,2%*

Anexo 02

Legenda:
Fase Amarelação (35°C)
Fase Secagem Folha (52°C)
Fase Secagem Talo (71°C)

Dia	Horário	Hora	Entrada		Saída		Entalpia (H) - (KJ/Kg)		Calor Útil (Qu) fornecido pelo Coletor - (KJ/h)	Necessidade para cura		Redução de Lenha	
			Média de Temp. (°C)	Média de UA (kg/kg)	Média de Temp. (°C)	Média de UA (kg/kg)	Entrada	Saída		KJ/h	m^3/h Lenha	%	m^3
	13	1	24,5	0,0140	28,6	0,0177	342,774	358,302	3.226,7	90.605,3	0,0181	3,6%	0,0006
	14	2	24,0	0,0141	27,8	0,0175	342,546	356,845	2.971,3	95.466,3	0,0191	3,1%	0,0006
	15	3	23,6	0,0139	27,1	0,0173	341,424	355,492	2.923,2	99.058,6	0,0198	3,0%	0,0006
	16	4	23,4	0,0139	26,6	0,0171	341,203	354,205	2.701,8	100.821,0	0,0202	2,7%	0,0005
	17	5	22,8	0,0136	26,0	0,0168	339,723	352,701	2.696,6	105.584,6	0,0211	2,6%	0,0005
	18	6	22,3	0,0132	25,3	0,0164	338,128	351,016	2.678,2	110.463,7	0,0221	2,4%	0,0005
	19	7	22,5	0,0129	24,9	0,0160	337,303	349,226	2.477,6	108.311,2	0,0217	2,3%	0,0005
	20	8	22,9	0,0128	25,0	0,0158	337,605	348,797	2.325,6	104.605,8	0,0209	2,2%	0,0005
	21	9	24,4	0,0135	26,1	0,0163	341,068	351,389	2.144,8	91.923,5	0,0184	2,3%	0,0004
	22	10	26,0	0,0135	29,3	0,0168	342,659	356,318	2.838,2	78.426,1	0,0157	3,6%	0,0006
	23	11	27,7	0,0144	37,0	0,0199	347,297	373,829	5.513,2	63.600,9	0,0127	8,7%	0,0011
	24	12	31,1	0,0149	45,5	0,0230	352,386	391,953	8.222,0	33.579,7	0,0067	24,5%	0,0016
	1	13	36,8	0,0159	53,4	0,0276	361,349	414,546	11.054,3	0,0	0,0000	0,0%	0,0000
	2	14	41,6	0,0151	59,4	0,0335	364,004	438,999	15.583,7	0,0	0,0000	0,0%	0,0000
	3	15	43,1	0,0155	62,3	0,0397	366,610	461,377	19.692,4	0,0	0,0000	0,0%	0,0000
	4	16	41,7	0,0153	61,9	0,0421	364,633	468,512	21.585,9	0,0	0,0000	0,0%	0,0000
	5	17	34,0	0,0150	52,5	0,0347	355,547	435,423	16.597,9	8.761,5	0,0018	189,4%	0,0033
	6	18	30,7	0,0149	45,2	0,0268	351,854	403,314	10.693,0	36.952,8	0,0074	28,9%	0,0021
	7	19	26,8	0,0150	40,1	0,0238	348,273	388,871	8.436,1	71.392,1	0,0143	11,8%	0,0017
	8	20	24,7	0,0147	35,3	0,0206	345,212	374,001	5.982,2	88.956,0	0,0178	6,7%	0,0012
	9	21	24,0	0,0145	32,4	0,0191	343,697	366,373	4.712,0	95.323,1	0,0191	4,9%	0,0009
	10	22	24,0	0,0144	30,7	0,0184	343,442	362,578	3.976,5	95.707,1	0,0191	4,2%	0,0008

	11	23	23,7	0,0146	29,4	0,0180	343,870	359,989	3.349,4	97.794,6	0,0196	3,4%	0,0007
	12	24	23,4	0,0145	28,3	0,0176	343,083	357,732	3.044,1	100.166,1	0,0200	3,0%	0,0006
	13	25	24,5	0,0140	28,6	0,0177	342,774	358,302	3.226,7	90.605,3	0,0181	3,6%	0,0006
	14	26	24,0	0,0141	27,8	0,0175	342,546	356,845	2.971,3	95.466,3	0,0191	3,1%	0,0006
	15	27	23,6	0,0139	27,1	0,0173	341,424	355,492	2.923,2	99.058,6	0,0198	3,0%	0,0006
	16	28	23,4	0,0139	26,6	0,0171	341,203	354,205	2.701,8	100.821,0	0,0202	2,7%	0,0005
	17	29	22,8	0,0136	26,0	0,0168	339,723	352,701	2.696,6	105.584,6	0,0211	2,6%	0,0005
	18	30	22,3	0,0132	25,3	0,0164	338,128	351,016	2.678,2	110.463,7	0,0221	2,4%	0,0005
	19	31	22,5	0,0129	24,9	0,0160	337,303	349,226	2.477,6	108.311,2	0,0217	2,3%	0,0005
	20	32	22,9	0,0128	25,0	0,0158	337,605	348,797	2.325,6	104.605,8	0,0209	2,2%	0,0005
	21	33	24,4	0,0135	26,1	0,0163	341,068	351,389	2.144,8	91.923,5	0,0184	2,3%	0,0004
	22	34	26,0	0,0135	29,3	0,0168	342,659	356,318	2.838,2	78.426,1	0,0157	3,6%	0,0006
	23	35	27,7	0,0144	37,0	0,0199	347,297	373,829	5.513,2	63.600,9	0,0127	8,7%	0,0011
	24	36	31,1	0,0149	45,5	0,0230	352,386	391,953	8.222,0	33.579,7	0,0067	24,5%	0,0016
	1	37	36,8	0,0159	53,4	0,0276	361,349	414,546	11.054,3	0,0	0,0000	0,0%	0,0000
	2	38	41,6	0,0151	59,4	0,0335	364,004	438,999	15.583,7	0,0	0,0000	0,0%	0,0000
	3	39	43,1	0,0155	62,3	0,0397	366,610	461,377	19.692,4	0,0	0,0000	0,0%	0,0000
	4	40	41,7	0,0153	61,9	0,0421	364,633	468,512	21.585,9	0,0	0,0000	0,0%	0,0000
	5	41	34,0	0,0150	52,5	0,0347	355,547	435,423	16.597,9	8.761,5	0,0018	189,4%	0,0033
	6	42	30,7	0,0149	45,2	0,0268	351,854	403,314	10.693,0	36.952,8	0,0074	28,9%	0,0021
	7	43	26,8	0,0150	40,1	0,0238	348,273	388,871	8.436,1	71.392,1	0,0143	11,8%	0,0017
	8	44	24,7	0,0147	35,3	0,0206	345,212	374,001	5.982,2	88.956,0	0,0178	6,7%	0,0012
	9	45	24,0	0,0145	32,4	0,0191	343,697	366,373	4.712,0	95.323,1	0,0191	4,9%	0,0009
	10	46	24,0	0,0144	30,7	0,0184	343,442	362,578	3.976,5	95.707,1	0,0191	4,2%	0,0008
	11	47	23,7	0,0146	29,4	0,0180	343,870	359,989	3.349,4	97.794,6	0,0196	3,4%	0,0007
	12	48	23,4	0,0145	28,3	0,0176	343,083	357,732	3.044,1	100.166,1	0,0200	3,0%	0,0006
	13	49	24,5	0,0140	28,6	0,0177	342,774	358,302	3.226,7	119.257,0	0,0239	2,7%	0,0006
	14	50	24,0	0,0141	27,8	0,0175	342,546	356,845	2.971,3	121.527,8	0,0243	2,4%	0,0006
	15	51	23,6	0,0139	27,1	0,0173	341,424	355,492	2.923,2	123.205,9	0,0246	2,4%	0,0006
	16	52	23,4	0,0139	26,6	0,0171	341,203	354,205	2.701,8	124.029,2	0,0248	2,2%	0,0005
	17	53	22,8	0,0136	26,0	0,0168	339,723	352,701	2.696,6	126.254,4	0,0253	2,1%	0,0005
	18	54	22,3	0,0132	25,3	0,0164	338,128	351,016	2.678,2	128.533,7	0,0257	2,1%	0,0005

	19	55	22,5	0,0129	24,9	0,0160	337,303	349,226	2.477,6	127.528,2	0,0255	1,9%	0,0005
	20	56	22,9	0,0128	25,0	0,0158	337,605	348,797	2.325,6	125.797,2	0,0252	1,8%	0,0005
	21	57	24,4	0,0135	26,1	0,0163	341,068	351,389	2.144,8	119.872,8	0,0240	1,8%	0,0004
	22	58	26,0	0,0135	29,3	0,0168	342,659	356,318	2.838,2	113.567,5	0,0227	2,5%	0,0006
	23	59	27,7	0,0144	37,0	0,0199	347,297	373,829	5.513,2	106.642,0	0,0213	5,2%	0,0011
	24	60	31,1	0,0149	45,5	0,0230	352,386	391,953	8.222,0	92.617,8	0,0185	8,9%	0,0016
	1	61	36,8	0,0159	53,4	0,0276	361,349	414,546	11.054,3	69.589,1	0,0139	15,9%	0,0022
	2	62	41,6	0,0151	59,4	0,0335	364,004	438,999	15.583,7	50.093,6	0,0100	31,1%	0,0031
	3	63	43,1	0,0155	62,3	0,0397	366,610	461,377	19.692,4	44.299,0	0,0089	44,5%	0,0039
	4	64	41,7	0,0153	61,9	0,0421	364,633	468,512	21.585,9	49.925,5	0,0100	43,2%	0,0043
	5	65	34,0	0,0150	52,5	0,0347	355,547	435,423	16.597,9	81.024,1	0,0162	20,5%	0,0033
	6	66	30,7	0,0149	45,2	0,0268	351,854	403,314	10.693,0	94.193,6	0,0188	11,4%	0,0021
	7	67	26,8	0,0150	40,1	0,0238	348,273	388,871	8.436,1	110.281,7	0,0221	7,6%	0,0017
	8	68	24,7	0,0147	35,3	0,0206	345,212	374,001	5.982,2	118.486,5	0,0237	5,0%	0,0012
	9	69	24,0	0,0145	32,4	0,0191	343,697	366,373	4.712,0	121.460,9	0,0243	3,9%	0,0009
	10	70	24,0	0,0144	30,7	0,0184	343,442	362,578	3.976,5	121.640,3	0,0243	3,3%	0,0008
	11	71	23,7	0,0146	29,4	0,0180	343,870	359,989	3.349,4	122.615,4	0,0245	2,7%	0,0007
	12	72	23,4	0,0145	28,3	0,0176	343,083	357,732	3.044,1	123.723,3	0,0247	2,5%	0,0006
	13	73	24,5	0,0140	28,6	0,0177	342,774	358,302	3.226,7	119.257,0	0,0239	2,7%	0,0006
	14	74	24,0	0,0141	27,8	0,0175	342,546	356,845	2.971,3	121.527,8	0,0243	2,4%	0,0006
	15	75	23,6	0,0139	27,1	0,0173	341,424	355,492	2.923,2	123.205,9	0,0246	2,4%	0,0006
	16	76	23,4	0,0139	26,6	0,0171	341,203	354,205	2.701,8	124.029,2	0,0248	2,2%	0,0005
	17	77	22,8	0,0136	26,0	0,0168	339,723	352,701	2.696,6	126.254,4	0,0253	2,1%	0,0005
	18	78	22,3	0,0132	25,3	0,0164	338,128	351,016	2.678,2	128.533,7	0,0257	2,1%	0,0005
	19	79	22,5	0,0129	24,9	0,0160	337,303	349,226	2.477,6	127.528,2	0,0255	1,9%	0,0005
	20	80	22,9	0,0128	25,0	0,0158	337,605	348,797	2.325,6	125.797,2	0,0252	1,8%	0,0005
	21	81	24,4	0,0135	26,1	0,0163	341,068	351,389	2.144,8	119.872,8	0,0240	1,8%	0,0004
	22	82	26,0	0,0135	29,3	0,0168	342,659	356,318	2.838,2	113.567,5	0,0227	2,5%	0,0006
	23	83	27,7	0,0144	37,0	0,0199	347,297	373,829	5.513,2	106.642,0	0,0213	5,2%	0,0011
	24	84	31,1	0,0149	45,5	0,0230	352,386	391,953	8.222,0	92.617,8	0,0185	8,9%	0,0016
	1	85	36,8	0,0159	53,4	0,0276	361,349	414,546	11.054,3	106.471,9	0,0213	10,4%	0,0022
	2	86	41,6	0,0151	59,4	0,0335	364,004	438,999	15.583,7	91.476,3	0,0183	17,0%	0,0031

	3	87	43,1	0,0155	62,3	0,0397	366,610	461,377	19.692,4	87.019,2	0,0174	22,6%	0,0039
	4	88	41,7	0,0153	61,9	0,0421	364,633	468,512	21.585,9	91.347,0	0,0183	23,6%	0,0043
	5	89	34,0	0,0150	52,5	0,0347	355,547	435,423	16.597,9	115.267,5	0,0231	14,4%	0,0033
	6	90	30,7	0,0149	45,2	0,0268	351,854	403,314	10.693,0	125.397,2	0,0251	8,5%	0,0021
	7	91	26,8	0,0150	40,1	0,0238	348,273	388,871	8.436,1	137.771,9	0,0276	6,1%	0,0017
	8	92	24,7	0,0147	35,3	0,0206	345,212	374,001	5.982,2	144.082,9	0,0288	4,2%	0,0012
	9	93	24,0	0,0145	32,4	0,0191	343,697	366,373	4.712,0	146.370,7	0,0293	3,2%	0,0009
	10	94	24,0	0,0144	30,7	0,0184	343,442	362,578	3.976,5	146.508,7	0,0293	2,7%	0,0008
	11	95	23,7	0,0146	29,4	0,0180	343,870	359,989	3.349,4	147.258,8	0,0295	2,3%	0,0007
	12	96	23,4	0,0145	28,3	0,0176	343,083	357,732	3.044,1	148.110,9	0,0296	2,1%	0,0006
	13	97	24,5	0,0140	28,6	0,0177	342,774	358,302	3.226,7	144.675,5	0,0289	2,2%	0,0006
	14	98	24,0	0,0141	27,8	0,0175	342,546	356,845	2.971,3	146.422,2	0,0293	2,0%	0,0006
	15	99	23,6	0,0139	27,1	0,0173	341,424	355,492	2.923,2	147.712,9	0,0295	2,0%	0,0006
	16	100	23,4	0,0139	26,6	0,0171	341,203	354,205	2.701,8	148.346,2	0,0297	1,8%	0,0005
	17	101	22,8	0,0136	26,0	0,0168	339,723	352,701	2.696,6	150.057,8	0,0300	1,8%	0,0005
	18	102	22,3	0,0132	25,3	0,0164	338,128	351,016	2.678,2	151.811,0	0,0304	1,8%	0,0005
	19	103	22,5	0,0129	24,9	0,0160	337,303	349,226	2.477,6	151.037,6	0,0302	1,6%	0,0005
	20	104	22,9	0,0128	25,0	0,0158	337,605	348,797	2.325,6	149.706,2	0,0299	1,6%	0,0005
	21	105	24,4	0,0135	26,1	0,0163	341,068	351,389	2.144,8	145.149,2	0,0290	1,5%	0,0004
	22	106	26,0	0,0135	29,3	0,0168	342,659	356,318	2.838,2	140.299,3	0,0281	2,0%	0,0006
	23	107	27,7	0,0144	37,0	0,0199	347,297	373,829	5.513,2	134.972,3	0,0270	4,1%	0,0011
	24	108	31,1	0,0149	45,5	0,0230	352,386	391,953	8.222,0	124.185,2	0,0248	6,6%	0,0016
	1	109	36,8	0,0159	53,4	0,0276	361,349	414,546	11.054,3	106.471,9	0,0213	10,4%	0,0022
	2	110	41,6	0,0151	59,4	0,0335	364,004	438,999	15.583,7	91.476,3	0,0183	17,0%	0,0031
	3	111	43,1	0,0155	62,3	0,0397	366,610	461,377	19.692,4	87.019,2	0,0174	22,6%	0,0039
	4	112	41,7	0,0153	61,9	0,0421	364,633	468,512	21.585,9	91.347,0	0,0183	23,6%	0,0043
	5	113	34,0	0,0150	52,5	0,0347	355,547	435,423	16.597,9	115.267,5	0,0231	14,4%	0,0033
	6	114	30,7	0,0149	45,2	0,0268	351,854	403,314	10.693,0	125.397,2	0,0251	8,5%	0,0021
	7	115	26,8	0,0150	40,1	0,0238	348,273	388,871	8.436,1	137.771,9	0,0276	6,1%	0,0017
	8	116	24,7	0,0147	35,3	0,0206	345,212	374,001	5.982,2	144.082,9	0,0288	4,2%	0,0012
	9	117	24,0	0,0145	32,4	0,0191	343,697	366,373	4.712,0	146.370,7	0,0293	3,2%	0,0009
	10	118	24,0	0,0144	30,7	0,0184	343,442	362,578	3.976,5	146.508,7	0,0293	2,7%	0,0008

	11	119	23,7	0,0146	29,4	0,0180	343,870	359,989	3.349,4	147.258,8	0,0295	2,3%	0,0007
	12	120	23,4	0,0145	28,3	0,0176	343,083	357,732	3.044,1	148.110,9	0,0296	2,1%	0,0006
	13	121	24,5	0,0140	28,6	0,0177	342,774	358,302	3.226,7	144.675,5	0,0289	2,2%	0,0006
	14	122	24,0	0,0141	27,8	0,0175	342,546	356,845	2.971,3	146.422,2	0,0293	2,0%	0,0006
	15	123	23,6	0,0139	27,1	0,0173	341,424	355,492	2.923,2	147.712,9	0,0295	2,0%	0,0006
	16	124	23,4	0,0139	26,6	0,0171	341,203	354,205	2.701,8	148.346,2	0,0297	1,8%	0,0005
	17	125	22,8	0,0136	26,0	0,0168	339,723	352,701	2.696,6	150.057,8	0,0300	1,8%	0,0005
	18	126	22,3	0,0132	25,3	0,0164	338,128	351,016	2.678,2	151.811,0	0,0304	1,8%	0,0005
	19	127	22,5	0,0129	24,9	0,0160	337,303	349,226	2.477,6	151.037,6	0,0302	1,6%	0,0005
	20	128	22,9	0,0128	25,0	0,0158	337,605	348,797	2.325,6	149.706,2	0,0299	1,6%	0,0005
	21	129	24,4	0,0135	26,1	0,0163	341,068	351,389	2.144,8	145.149,2	0,0290	1,5%	0,0004
	22	130	26,0	0,0135	29,3	0,0168	342,659	356,318	2.838,2	140.299,3	0,0281	2,0%	0,0006
	23	131	27,7	0,0144	37,0	0,0199	347,297	373,829	5.513,2	134.972,3	0,0270	4,1%	0,0011
	24	132	31,1	0,0149	45,5	0,0230	352,386	391,953	8.222,0	124.185,2	0,0248	6,6%	0,0016
	1	133	36,8	0,0159	53,4	0,0276	361,349	414,546	11.054,3	106.471,9	0,0213	10,4%	0,0022
	2	134	41,6	0,0151	59,4	0,0335	364,004	438,999	15.583,7	91.476,3	0,0183	17,0%	0,0031
	3	135	43,1	0,0155	62,3	0,0397	366,610	461,377	19.692,4	87.019,2	0,0174	22,6%	0,0039
	4	136	41,7	0,0153	61,9	0,0421	364,633	468,512	21.585,9	91.347,0	0,0183	23,6%	0,0043
	5	137	34,0	0,0150	52,5	0,0347	355,547	435,423	16.597,9	115.267,5	0,0231	14,4%	0,0033
	6	138	30,7	0,0149	45,2	0,0268	351,854	403,314	10.693,0	125.397,2	0,0251	8,5%	0,0021
	7	139	26,8	0,0150	40,1	0,0238	348,273	388,871	8.436,1	137.771,9	0,0276	6,1%	0,0017
	8	140	24,7	0,0147	35,3	0,0206	345,212	374,001	5.982,2	144.082,9	0,0288	4,2%	0,0012
	9	141	24,0	0,0145	32,4	0,0191	343,697	366,373	4.712,0	146.370,7	0,0293	3,2%	0,0009
	10	142	24,0	0,0144	30,7	0,0184	343,442	362,578	3.976,5	146.508,7	0,0293	2,7%	0,0008
	11	143	23,7	0,0146	29,4	0,0180	343,870	359,989	3.349,4	147.258,8	0,0295	2,3%	0,0007
	12	144	23,4	0,0145	28,3	0,0176	343,083	357,732	3.044,1	148.110,9	0,0296	2,1%	0,0006

Total	3,0500	0,1713
		5,6%