



Universidade Federal do Pampa

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

CAMPUS BAGÉ

CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS E AMBIENTE

Ronaldo da Silveira Oliveira

**CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA HÍBRIDO AUTOSSUSTENTÁVEL
PARA SECAGEM DE BIOMASSA**

**Bagé
2012**

Ronaldo da Silveira Oliveira

**CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA HÍBRIDO AUTOSSUSTENTÁVEL
PARA SECAGEM DE BIOMASSA**

Trabalho de Conclusão de Curso II
apresentado em Engenharia de Energias
Renováveis e Ambiente da Universidade
Federal do Pampa, como requisito final para
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia
de Energias Renováveis e Ambiente.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª Márcia Maria Lucchese

Cutter Oliveira, Ronaldo da Silveira.
Secador Solar de Biomassa / Ronaldo da Silveira Oliveira.
10/07/2012.
85 folhas

Trabalho de Conclusão de Curso II (Graduação)
Universidade Federal do Pampa. 27/06/2012. Orientação:
Profª. Drª Márcia Maria Lucchese.

1. Biomassa. 2. Secador. 3. Briquete. Lucchese, Márcia
Maria. Secador solar de Biomassa.

Ronaldo da Silveira Oliveira

**CONSTRUÇÃO DE UM SISTEMA HÍBRIDO AUTOSSUSTENTÁVEL
PARA SECAGEM DE BIOMASSA**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado em Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente da Universidade Federal do Pampa, como requisito final para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente.

Área de concentração: Equipamentos Mecânicos/Biocombustível.

Trabalho de Conclusão de Curso II defendido e aprovado em: 27/06/2012.

Banca examinadora:

Prof^a. Dr^a Márcia Maria Lucchese
Orientador
(UNIPAMPA)

Prof. Dr Allan Seeber
(UNIPAMPA)

Prof^a. Dr^a Ana Rosa Costa Muniz
(UNIPAMPA)

Dedico este trabalho aos meus amigos de quatro patas, pois estiveram presentes em todos os momentos de sua construção.

Faça o que puder, com o que você tiver, onde
você estiver.

Theodore Roosevelt

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus familiares pelo incentivo, aos professores, amigos e colegas do Curso de Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente pelo ensinamento e amizade, em especial à professora orientadora Dr^a Márcia Maria Lucchese, pela sabedoria transmitida e encorajamento na realização deste trabalho.

Também agradeço às empresas Pillon Cereais, Serralheria Karina pelo apoio na obtenção da biomassa para esse projeto, ao laboratório do Curso de Engenharia de Alimentos - UNIPAMPA pelo empréstimo de equipamentos e demais funcionários da Universidade Federal do Pampa, que de alguma forma me auxiliaram em determinados momentos.

RESUMO

Desenvolver um secador solar de biomassa para obter o comportamento do mecanismo, visando um consumo renovável de energia pelo processo na preparação da biomassa para a fabricação de briquetes no sul do Brasil. A alternativa de um secador solar na preparação de biomassa para compactação, reforça a idéia de a mesma ser uma fonte de energia limpa, pois a secagem através do aquecimento solar auxiliará diretamente na qualidade da briquetagem e proporciona uma redução de emissões durante a combustão do material. O secador solar se dispõe como opção frente aos secadores convencionais que o mercado oferece com altos custos de operação e de consumo de energia. Os dados obtidos durante os testes evidenciaram o potencial energético (solar e eólico) que um sistema deste tipo possui para secagem de biomassa, entretanto, existe ainda a necessidade de aprimoramentos dos mecanismos na busca de um melhor aproveitamento destas energias disponíveis.

Palavras-chave: Secador, Biomassa, Briquete, Solar.

ABSTRACT

Develop a solar dryer for biomass for the behavior of the mechanism, aiming at a consumption of renewable energy by the process in the preparation of biomass for the manufacture of briquettes in southern Brazil. The alternative of a solar dryer in the preparation of biomass for compression, supports the idea that the same be a source of energy, since the solar drying by heating directly assist in the quality of briquetting and provides a reduction of emissions during combustion of the material . The solar dryer is available as an option in the face of conventional dryers that the market offers with high operating costs and energy consumption. Data obtained during the tests showed the potential energy (solar and wind) that has such a system for drying of biomass, however, there is still a need for improvements in search of mechanisms for improving the use of these energies available.

Key words: Dryer, Biomass, Briquettes, Sun

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.....	18
Figura 2.2: ciclo do CO ₂ para a biomassa.....	20
Figura 2.3: movimento da Terra em torno do Sol e as estações do ano.....	27
Figura 2.3: trajetória do Sol durante o ano para um ponto fixo.....	28
Figura 2.5: secador indireto com fluxo de ar aberto.....	37
Figura 2.6: secador indireto com fluxo de ar fechado.....	38
Figura 2.7: (a) silo para secagem com ar natural ou baixa temperatura mostrado a frente de secagem (FS). (b) silo com equipamento para revolvimento do produto.....	39
Figura 2.8: Silo equipado com recirculador de grãos.....	40
Figura 2.9: imagem de uma panémona.....	41
Figura 3.1: esquema (dimensões em cm) de construção da base em madeira para as placas.....	43
Figura 3.2: esquema (dimensões em cm) de construção dos painéis, com o revestimento isolante e a cobertura de vidro.....	43
Figura 3.3: placas solares coletoras finalizadas, vistas superior, frontal e lateral (dimensões em cm).....	44
Figura 3.4: parte cônica inferior do silo que servirá de base (dimensões em cm).....	44
Figura 3.5: conjunto base cônica que forma a câmara de ar e o leito de secagem (dimensões em cm).....	45
Figura 3.6: plataforma do silo, vista lateral de um corte vertical da peça e uma vista superior completa.....	45
Figura 3.7: dimensões (em cm), vistas lateral, frontal e superior da câmara da rosca sem fim.....	46
Figura 3.8: vista de um corte vertical da plataforma do silo com a câmara da rosca sem fim fixa (dimensões em cm).....	46
Figura 3.9: dimensões (em cm) do cilindro que compõe o corpo do silo, vista lateral e superior.....	47

Figura 3.10: vista de um corte vertical da plataforma do silo com o cilindro que compõe o corpo do silo.....	48
Figura 3.11: esquema (dimensões em cm) do sistema eólico que compõe o equipamento de revolvimento.....	48
Figura 3.12: dimensões (em cm) da montagem da rosca sem fim.....	49
Figura 3.13: acoplamento da rosca sem fim ao sistema eólico (dimensões em cm).....	49
Figura 3.14: acoplamento do sistema de revolvimento ao silo utilizando uma estrutura metálica (dimensões em cm).....	50
Figura 3.15: esquema (dimensões em cm) de construção da tampa do silo.....	50
Figura 3.16: multitestador ICCEL MD-6490 utilizado com termopar para medição de temperaturas.....	51
Figura 3.17: luxímetro digital Politem, modelo LX1010B utilizado para medir a radiação recebida pelas placas.....	51
Figura 3.18: odômetro digital utilizado para verificar a movimentação das pás.....	52
Figura 3.19: balança de medição de umidade Radwag Modelo MAC210 utilizada na determinação da umidade da biomassa.....	53
Figura 3.20: granulometria das biomassas testadas no secador solar: (a) casca de arroz, (b) cavaco e (c) arroz com casca.....	54
Figura 4.1: montagem das placas solares.....	55
Figura 4.2: mecanismo para determinar a inclinação das placas.....	56
Figura 4.3: montagem do base silo.....	57
Figura 4.4: montagem do silo.....	57
Figura 4.5: colocação do duto e revestimento térmico.....	58
Figura 4.6: montagem da rosca nua que compõe equipamento de revolvimento.....	59
Figura 4.7: secador solar finalizado e instalado na UNIPAMPA- Campus Bagé.....	60
Figura 5.1: pontos nos quais foram medidas as temperaturas.....	61
Figura 5.2: gráfico da temperatura em vazio no mês de janeiro.....	62
Figura 5.3: gráfico da temperatura em vazio no mês de fevereiro.....	62
Figura 5.4: gráfico da radiação solar recebida na placa em um dia do mês de janeiro.....	63

Figura 5.5: gráfico da radiação solar recebida na placa para um dia do mês de fevereiro.....	63
Figura 5.6: gráfico que mostra a perda de umidade da casca de arroz no secador durante o tempo secagem.....	65
Figura 5.7: gráfico das umidades do secador durante a secagem da casca de arroz e da umidade ambiente média e umidade ambiente hora.....	66
Figura 5.8: gráfico da temperatura do secador com casca de arroz.....	67
Figura 5.9: gráfico da radiação solar recebida na placa em um dia de secagem da casca de arroz.....	68
Figura 5.10: gráfico que mostra a variação de umidade do cavaco no secador durante o tempo secagem.....	69
Figura 5.11: gráfico das umidades do secador durante a secagem do cavaco e da umidade ambiente média e umidade ambiente hora.....	70
Figura 5.12: gráfico das temperaturas do secador com cavaco.....	71
Figura 5.13: gráfico da radiação solar recebida na placa em um dia de sec. do cavaco.....	71
Figura 5.14: definição dos pontos para obtenção da temperatura com adição de dois novos pontos.....	73
Figura 5.15: gráfico que mostra a variação de umidade do arroz com casca no secador durante o tempo secagem.....	74
Figura 5.16: gráfico das umidades do secador durante a secagem do arroz com casca e da umidade ambiente média e umidade ambiente hora.....	75
Figura 5.17: gráfico das temperaturas do secador com arroz com casca.....	75
Figura 5.18: gráfico da radiação solar recebida na placa em um dia de secagem do arroz com casca.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Alguns dados para ar e água a 25 °C e 1 bar.....	30
Tabela A1: lista de produtos para construção do secador solar	85

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Biomassa	17
2.2	Características Químicas e Físicas da Biomassa	20
2.2.1	Características químicas	20
2.2.2	Características Físicas	21
2.3	Radiação Solar.....	26
2.3.1	Radiação Solar durante o ano	26
2.3.2	Radiação Solar e a Interação com Materiais	29
2.4	Os Secadores Solar	31
2.4.1	Tipos de Secadores Solares	33
2.4.2	Forma de Operação	35
2.4.3	Tempo de Secagem e o Fluxo de Ar	36
2.5	Movimentação do Produto no Silo	38
2.6	O Vento na Movimentação da Biomassa	40
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1	Protótipo do Secador Solar	42
3.2	Medidas de temperaturas e radiação	51
3.3	Posicionamento da Placa Solar.....	52
3.4	Movimentação das pás	52
3.5	Umidade	53
4	CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	55

5 ANÁLISE E DISCUSSÕES	61
5.1 Dados de temperatura, radiação incidente e velocidades do Secador Vazio.....	61
5.2 Dados de temperatura, radiação incidente e velocidades do Secador Com Biomassa	64
5.2.1 Secagem de Casca de Arroz	64
5.2.2 Secagem do Cavaco.....	68
5.2.3 Secagem de Arroz com casca	73
6 DISCUSSÃO.....	78
CONCLUSÃO.....	82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
ANEXOS	

1 INTRODUÇÃO

A busca por fontes energéticas alternativas e sustentáveis é uma realidade em qualquer parte do mundo. O reaproveitamento energético de resíduos vegetais gerados a partir de várias atividades agro-industriais pode ser uma forma de reduzir a pressão sobre recursos naturais diretamente explorados como fonte de combustíveis. Esse processo vai de encontro com as características da região da campanha, visto que ela possui na sua base produtiva produtos agroindustriais geradores de resíduos.

A compactação desses resíduos providencia um produto (briquete) diretamente competitivo com lenha e carvão vegetal, podendo, em alguns casos, ser um ótimo substituto. A compactação é uma alternativa não somente para aproveitamento dos resíduos como para facilitar o transporte destes em aplicações distantes da fonte produtora.

Para que a briquetagem ocorra, a biomassa deve apresentar algumas características peculiares ao processo, como exemplo a umidade, sendo necessária na maioria das vezes a secagem desta matéria prima anteceder à compactação. No mercado já existem diversos equipamentos para diminuir a concentração de água nos resíduos vegetais, inclusive alguns que utilizam como combustível a própria biomassa para alimentar fornalhas. Entretanto, um dos métodos mais usados pelo homem para secar algo sem duvida é a exposição do material ao calor do Sol como uma simples roupa ou na agricultura os grãos de café.

Um secador solar na preparação de biomassa para compactação é uma alternativa sustentável ambiental e economicamente, pois a secagem através do

aquecimento solar auxiliará diretamente na qualidade da briquetagem sem possuir uma fonte de calor emissora de poluentes. O secador Solar se dispõe como opção frente aos secadores convencionais que o mercado oferece com altos custos de operação e de consumo de energia.

O tema torna-se pertinente visto que a humanidade passa por um momento onde a busca por uma energia limpa ou menos agressiva à natureza é fundamentalmente necessária, credenciando a biomassa como um caminho viável dentre as possibilidades.

De posse desta argumentação o presente trabalho tem por objetivo construir desenvolver e analisar um secador solar de biomassa, visando um consumo renovável de energia pelo processo na preparação da biomassa para a fabricação de briquetes no sul do Brasil. Tal análise pretende especificamente averiguar a eficácia dos trocadores de calor, tanto do coletor, quanto do reservatório de biomassa; obter temperaturas médias e máximas do processo; determinar o tempo médio de secagem da biomassa; verificar a eficiência do secador na redução de umidade na biomassa e outras fontes de energias alternativas que auxiliem na melhoria do processo.

No capítulo dois é apresentada uma revisão bibliográfica referentes aos principais conceitos que envolvem o tema proposto. Materiais e métodos compõem o terceiro capítulo no qual é realizada a descrição de como foram desenvolvido os trabalhos de projeto, montagem e medições do secador solar. No quarto capítulo são apresentados os dados obtidos com as medições no aparato. O capítulo cinco faz-se a discussão sobre os resultados obtidos seguido da conclusão que os mesmos conduziram.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Biomassa

Há muitos anos já ocorrem buscas por combustíveis alternativos ao petróleo e gás natural devido a possível extinção destes recursos fósseis, sem contar a poluição gerada pela queima destes combustíveis convencionais. Uma opção presente no dia a dia das pessoas é a biomassa, caracterizada como uma fonte de energia tão antiga quanto a própria existência do homem, ao mesmo tempo em que se apresenta como uma nova alternativa.

Biomassa é o resultado do processo de transformação que sofre a matéria orgânica de origem animal ou vegetal. Por meio deste processo, de forma natural ou artificialmente, se geram subprodutos que não tem valor para indústria alimentícia ou de produtos comerciais, mas que tem potencial para ser matéria prima para a geração de energia. Portanto, esses dejetos produzidos pelas atividades rurais, industriais ou urbanas podem ser aproveitados como combustível.

Uma possível classificação da biomassa pode ser estabelecida através de sua origem: a biomassa natural, produzida pela natureza sem intervenção humana; a biomassa seca, subproduto sólido não utilizado em atividades agrícolas, florestais, na indústria agroalimentícia ou madeireiras; a biomassa residual úmida ou esgoto urbano ou industrial; a biomassa de cultivos energéticos cuja finalidade é a de produzir biocombustível e a biomassa oriunda da reciclagem de óleos vegetais.

Para Hinrichs e Kleinbach (2008, p. 437), a biomassa, na primeira década deste milênio, abasteceu 3,6% da energia dos Estados Unidos e pode fornecer varias vezes mais energia que a estimada pelas fontes eólicas e fotovoltaicas, além da possibilidade de ser produzida em qualquer lugar. Pode ser uma alternativa para países em desenvolvimento, onde o petróleo possui altos preços, inibindo seu crescimento econômico além de pode ser transformada em combustíveis líquidos, gasosos ou ser submetida à combustão direta para produção de vapor ou eletricidade. Consoante Hinrichs e Kleinbach (2008, p. 445), os processos de conversão da biomassa em outras formas de energia podem ser classificados de varias formas.

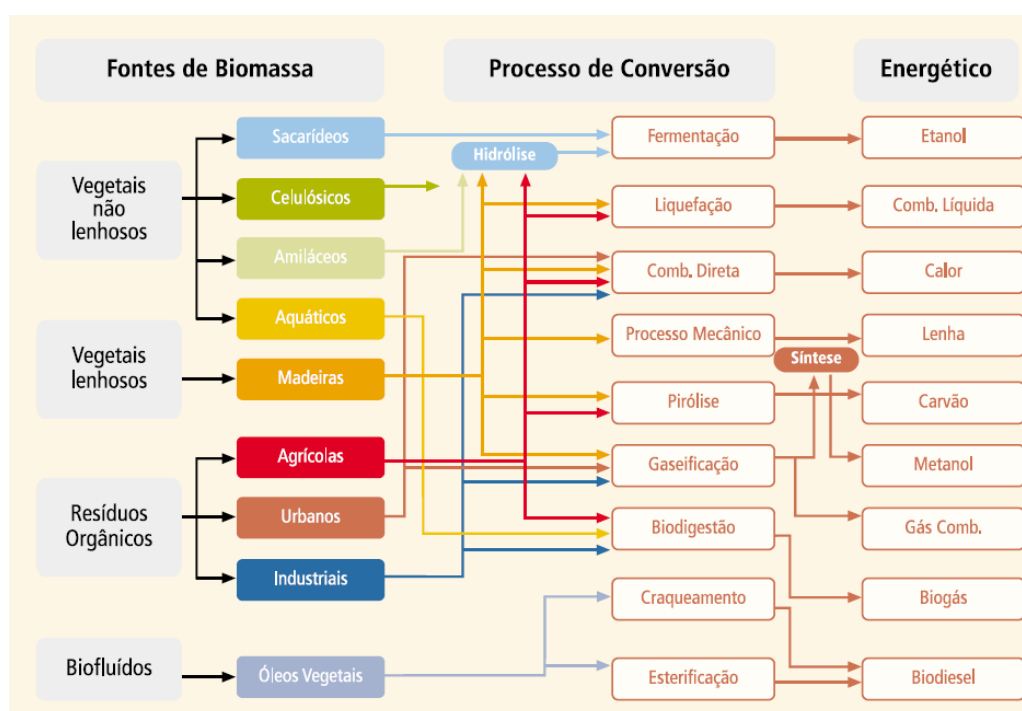


Figura 2.1: diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa

O diagrama da figura 1 mostra as principais tecnologias de aproveitamento energético da biomassa são descritas a como: combustão direta, a biomassa é queimada para produção de calor utilizado no aquecimento de ambientes, caldeiras ou produção de energia elétrica através de turbinas a vapor; gaseificação, processo de conversão de combustíveis sólidos em gasosos, por meio de reações termoquímicas, envolvendo

vapor quente e ar, ou oxigênio, em quantidades inferiores à estequiométrica; Pirólise, é o mais simples e mais antigo processo de conversão de um combustível em outro de melhor qualidade e conteúdo energético; digestão anaeróbia, a digestão anaeróbia, assim como a pirólise, ocorre na ausência de ar, o processo consiste na decomposição do material pela ação de bactérias; fermentação, processo biológico anaeróbio em que os açúcares de plantas como a batata, o milho, a beterraba e, principalmente, a cana de açúcar são convertidos em álcool, por meio da ação de microrganismos; e a transesterificação, processo químico que consiste na reação de óleos vegetais com um produto intermediário ativo, oriundo da reação entre álcoois e uma base.

A principal vantagem em utilizarmos a biomassa como combustível é o fato dela ser um combustível renovável, além de poder se utilizar resíduos agrícolas e industriais como combustíveis. Do ponto de vista social a utilização de biomassa como combustível pode auxiliar na independência energética de um país minimizando, por exemplo, a dependência dos combustíveis fósseis. Em relação à emissão de gases a queima da biomassa não produz gases responsáveis pelo efeito estufa, conforme podemos ver na figura 2.1, onde pode ser visto que o CO_2 liberado da combustão da lenha é incorporado pelas plantas no processo de fotossíntese, em relação ao ciclo das águas este processo também está fechado, a umidade da lenha transforma-se em vapor, que condensa e retorna as plantas.

O índice de enxofre é praticamente nulo na emissão, substância esta que juntamente com óxidos de nitrogênio são causadores da chuva ácida. O uso da biomassa como biocombustível em motores de combustão interna reduz a utilização de motores movidos a combustível fóssil, que por sua vez provocam altos índices de contaminação.

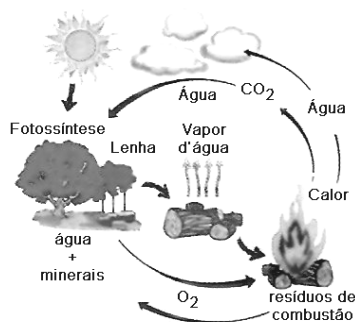


Figura 2.2: ciclo do CO₂ para a biomassa.

As desvantagens seriam o rendimento deste combustível frente aos combustíveis fósseis o que acarreta a necessidade maior de biomassa para conseguir a mesma quantidade de energia, podemos exemplificar tomando como medida o valor energético da biomassa, ou seja: um quilo de gasolina equivale a três quilos de biomassa; em outras palavras, a biomassa possui um terço do potencial energético da gasolina. Outra questão são os canais de distribuição da biomassa estarem menos desenvolvido que os de combustíveis fósseis.

2.2 Características Químicas e Físicas da Biomassa

Como o termo biomassa é bastante amplo, existe a necessidade de considerar algumas características químicas e físicas quando se refere à secagem/secador para melhor entendimento do processo. Além de ser necessário para um melhor aproveitamento energético da biomassa o entendimento destas propriedades.

2.2.1 Características químicas

A potencialidade de um combustível é determinada através das suas características químicas fundamentais. Essas características são:

- A composição elementar – é o conteúdo em porcentagem de massa de carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N), umidade (W) e material residual (cinzas) (A); Para a casca de arroz a análise elementar consiste de, aproximadamente 40,9% de C, 3,32 de H, 0,42 de N, 35,8 de O, 0,044 de S e 18,34 de (A) (Avaliação Computacional de um Sistema de Gaseificação em leito Fluidizado utilizando o software CSFB).

A composição imediata – é o conteúdo em porcentagem de massa de carbono (F), voláteis (V), umidade (W) e cinzas (A);

2.2.2 Características Físicas

i) Poder Calorífico

É a quantidade de energia liberada na forma de calor durante a combustão completa da unidade de massa do combustível (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2008, p 47-51).

ii) Umidade

Durante o processo de secagem é essencial conhecer o teor de umidade da matéria prima a ser secada. Nas diferentes amostras a água pode estar presente sob duas formas, a primeira é a água livre – é a água que está simplesmente adsorvida no material, é a mais abundante. É perdida facilmente às temperaturas em torno da ebulição. A outra forma é a água ligada – é a água da constituição, que faz parte da estrutura do material, ligada a proteínas, açúcares e adsorvida na superfície de partículas

coloidais, e necessita de níveis elevados de temperatura para sua remoção (ANTONIO, 2006, p 4).

As determinações de umidade são classificadas em métodos diretos e indiretos e a escolha do método vai depender: da forma a qual a água está presente na amostra, da natureza da amostra, da quantidade relativa de água, da rapidez desejada na determinação e do equipamento disponível.

No caso específico de alimentos a determinação de umidade é uma das medidas fundamentais, pois a umidade de uma matéria orgânica está relacionada com sua estabilidade, qualidade e composição, podendo afetar as seguintes características do produto: estocagem, embalagem, processamento. A umidade é o principal fator para os processos microbiológicos, como o desenvolvimento de fungos, leveduras e bactérias, e também para o desenvolvimento de insetos. O teor de umidade pode ser expresso em termos da base seca (W_d) ou da base úmida (W_w):

- Base Seca – é o quociente entre a massa de umidade (M_a) e a massa do sólido isenta de umidade (M_d), W_d pode ser expresso, por exemplo, em kg de água por kg de sólido seco.

$$W_d = \frac{M_a}{M_d} \quad (1)$$

- Base Úmida – é o quociente entre a massa de umidade (M_a) e a massa de sólido úmido ($M_d + M_a$).

$$W_w = \frac{M_a}{M_d + M_a}$$

(2)

W_w pode ser expresso, por exemplo, em kg de água por kg de sólido úmido. A transformação de uma base em outra pode ser feita através de:

$$W_w = \frac{W_d}{1 + W_d} \quad (3)$$

$$W_d = \frac{W_w}{1 - W_w} \quad (4)$$

iii) Peso Hectolitro

Medida de capacidade, em massa, equivalente em 100 litros. O peso hectolitro de uma massa de grão será menor quanto maior for o conteúdo de umidade do mesmo. O peso hectolitro tem várias aplicações práticas, entre eles a mais conhecida é a fixação do preço mínimo de trigo feito para um peso hectolitro de 78 com 13% de umidade (PARK, A.; OLIVEIRA; PARK; 2007, p 9).

iv) Porosidade

É o espaço vazio ocupado pelo ar existente dentro de uma massa de grãos. A porosidade influi na facilidade de escoamento do ar, além de influenciar na capacidade do silo. A porosidade de uma massa de grãos varia de 30 a 50%, conforme tipo, teor de umidade e quantidade de grãos quebrados. A porosidade é menor em grãos maiores, porém as dimensões dos poros são maiores, e como consequência é mais fácil escoar o ar. Grãos quebrados aumentam a porosidade, mas diminuem as dimensões dos poros dificultando o escoamento do ar. As impurezas finas preenchem os espaços vazios, diminuindo a porosidade. Grãos úmidos possuem maior volume, portanto apresentam

menor porosidade com maior dimensão dos poros em relação aos grãos secos (PARK, A.; OLIVEIRA; PARK; 2007, p 11).

v) Condutividade Térmica

A condutividade térmica é uma propriedade termo-física do material, que descreve a taxa na qual o fluxo de calor passa através do mesmo sob a influência de uma diferença de temperatura. O calor é transmitido no corpo sólido pela transferência física de elétrons livres e pela vibração de átomos e moléculas e cessa quando a temperatura em todos os pontos do corpo for igual à temperatura do meio em que se encontra, isto é, atinge-se o equilíbrio térmico.

No caso dos grãos, devido à baixa condutividade térmica dos mesmos, temos um bom isolamento térmico. Uma camada de 1 cm de espessura de trigo tem uma capacidade equivalente a 9 cm de concreto. Em grandes silos, de diâmetro ou altura acima de 5m, variações de 10°C de temperatura ambiental causam 1°C a cada 10 cm de profundidade. Devido a este isolamento térmico, qualquer foco de aquecimento que ocorre no interior do silo pode não ser detectado em tempo hábil para a sua correção. A condutividade térmica dos grãos aumenta com o aumento de conteúdo de umidade (PARK, A.; OLIVEIRA; PARK; 2007, p 11).

vi) Higroscopicidade

Uma substância é denominada higroscópica, se a mesma pode conter a umidade ligada. A umidade ligada num sólido é o líquido cuja pressão de vapor é menor que a do líquido puro na mesma temperatura. O líquido pode estar ligado por retenção em

pequenos poros capilares, por soluções em paredes de células ou de fibras, por soluções homogêneas no sólido, ou por absorção física ou química nas superfícies sólidas. Portanto, os materiais biológicos são materiais higroscópios. A biomassa expostas em um ambiente absorve ou perde água, até entrar em equilíbrio com o ambiente. Este equilíbrio depende da temperatura e da umidade relativa do ar, assim como do tipo de matéria. Substâncias sólidas ricas em óleos possuem menor teor de umidade de equilíbrio em relação a outras nas mesmas condições de temperatura e de umidade relativa do ar (PARK, A.; OLIVEIRA; PARK; 2007, p 12).

vii) Ângulo de Repouso

Ângulo máximo formado entre o talude do material amontoado e o plano horizontal. Este ângulo existe devido ao coeficiente de fricção, entre as partículas do material granular. Existem os ângulos de repouso estático e dinâmico. O estático é o ângulo de fricção de material granular sólido quando desliza sobre si próprio. O dinâmico é aquele que aparece quando de um lote de material granular está em movimento, como a descarga de silos ou moegas. A variação do ângulo de repouso ocorre da seguinte maneira: quanto mais esférico for o grão, menor o ângulo; quanto maior o grão, menor o ângulo; quanto menor a superfície lisa do grão, maior o ângulo; maior teor de umidade, maior o ângulo e; impurezas geralmente aumentam o ângulo.

O ângulo de repouso determina o volume do cone na parte superior do silo, inclinação do fundo do silo para a descarga natural, inclinação de dutos de transporte por gravidade e capacidade de transporte nas correias transportadoras (PARK, A.; OLIVEIRA; PARK; 2007, p 10).

vii) Forma e Tamanho

Essencial para entender não só o processo de secagem como também o processo de briquetagem é definir a forma e o tamanho da biomassa que se pretende trabalhar. Para definir estes dois conceitos, tradicionalmente se utiliza o conceito de forma e tamanho com parâmetros conhecidos, para forma se utiliza o conceito de esfericidade (ϕ) e em relação a tamanhos o conceito aceito é o de composição granulométrica. A esfericidade para a casca de arroz é de 0,3 e para o grão de soja é 0,98.

2.3 Radiação Solar

2.3.1 Radiação Solar durante o ano

A Terra realiza uma trajetória elíptica em torno do Sol, tendo o Sol como um dos focos da elipse. O movimento aparente do Sol visto do referencial Terra ocorre na eclíptica que é o plano da órbita da Terra ao redor do Sol. Embora a órbita da Terra em torno do Sol seja uma elipse, distância da Terra ao Sol varia somente 3%, sendo menor em janeiro onde no Hemisfério Sul é verão e no Norte é inverno.

O eixo de rotação da Terra está inclinado $23^{\circ}27'$ em relação a eclíptica ocasionando as estações do ano. Devido a essa inclinação, à medida que a Terra orbita em torno do Sol, os raios solares incidem mais diretamente em um hemisfério ou outro, proporcionando mais horas com luz durante o dia a um hemisfério ou outro e, portanto, aquecendo mais um hemisfério ou outro.

Durante o ano o Sol ocupa quatro posições características na eclíptica: 21 de março, o Sol cruza o Equador, indo do hemisfério sul para o hemisfério norte, ; 22 de julho, o Sol está na máxima declinação norte, incidindo diretamente na região do Trópico de Câncer na Terra; 23 de setembro, Sol cruza o equador, indo do hemisfério norte para o hemisfério sul e 22 de dezembro, o Sol está na máxima declinação sul incidindo diretamente na região do Trópico de Capricórnio na Terra (OLIVEIRA FILHO; KEPLER DE SOUZA, 2004, p 35).

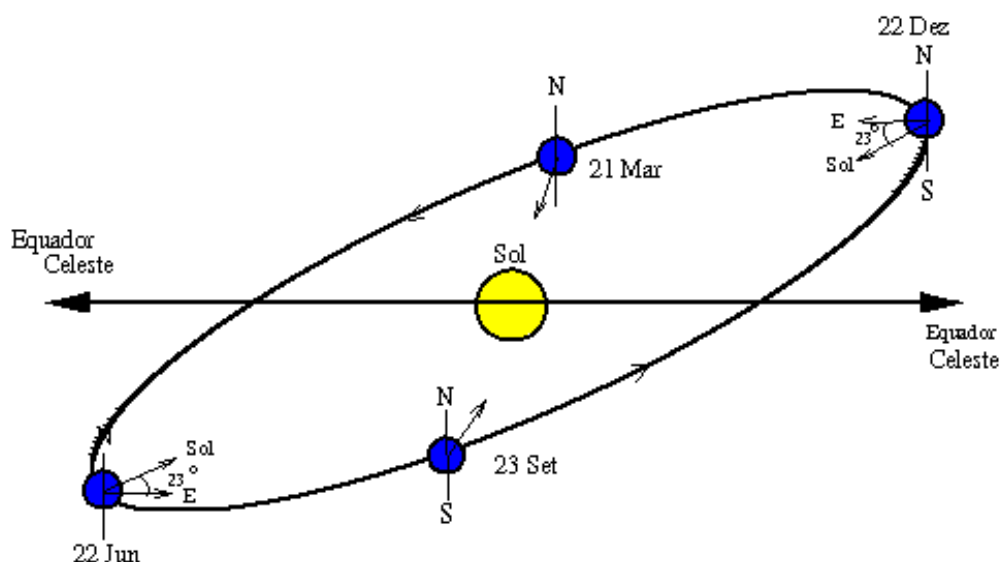


Figura 2.3: movimento da Terra em torno do Sol e as estações do ano

No Equador todas as estações são muito parecidas, à medida que se afasta do equador as estações ficam mais acentuadas e as diferenças tornam-se máximas nos pólos.

Em geral nos interessa definir a quantidade de energia solar que chega a Terra, a quantidade de energia solar que chega, por unidade de tempo e por unidade de área, a

uma superfície perpendicular aos raios solares, à distância média Terra – Sol, se chama contante solar, e vale 1367W/m^2 . Esse valor é medido por satélites logo acima da atmosfera terrestre.

Quando nos referimos a quantidade de energia que chega na superfície terrestre temos que definir a insolação solar (I) que é a quantidade de energia solar que atinge uma unidade de área da Terra (equação 5), que corresponde a insolação solar no zênite (E_z) dividido pela área (A). Considerando que o Sol está a uma altura θ em relação ao horizonte, a mesma energia é espalhada por uma área (equação 6). Isto significa que a variação da altura máxima do Sol para um lugar (devido à inclinação da órbita), acontece uma variação da área iluminada na superfície da Terra, o que leva a uma variação na insolação (OLIVEIRA FILHO; KEPLER DE SOUZA, 2004, p 36).

$$I = \frac{E_z}{A} \quad (5)$$

$$A' = \frac{A}{\sin \theta} \quad (6)$$

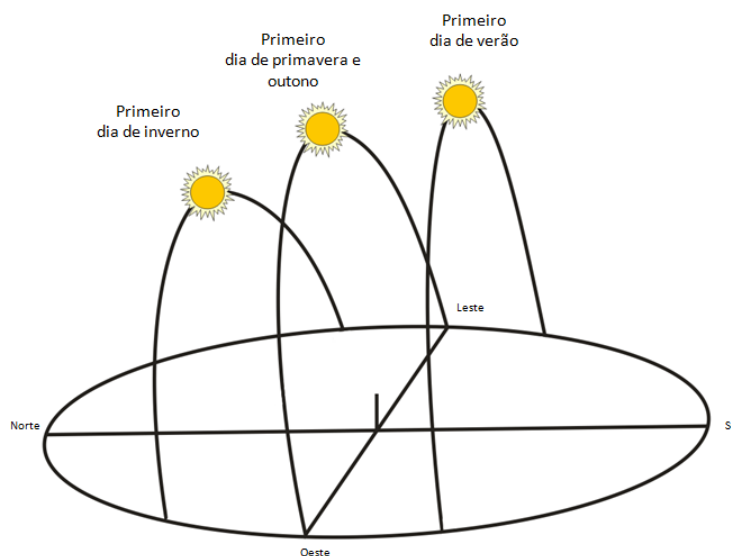


Figura 2.34: trajetória do Sol durante o ano para um ponto fixo

2.3.2 Radiação Solar e a Interação com Materiais

O espectro da radiação solar extraterrestre cobre um intervalo de comprimentos de onda de 0,2 até 25 μm . A intensidade da radiação varia com o comprimento de onda. Quando a luz solar de comprimento de onda 0,3 - 3,0 μm atinge um objeto, por exemplo, uma cobertura solar, estas são refletidas de acordo com a estrutura da superfície (material, rugosidade, cor). Superfícies claras refletem mais, comparadas com superfícies escuras. A proporção de radiação refletida (especialmente com superfícies de vidro) é também dependente do ângulo de incidência da radiação (lei de Fresnel). A radiação que não é refletida é absorvida pelo objeto, ou no caso de objetos de material translúcido é também transmitida através desses objetos. A parte absorvida é convertida em radiação térmica de comprimento de onda 3,0-30 μm e radiada de acordo com a estrutura da superfície. Este processo é descrito fisicamente, como o grau de reflexão, absorção, transmissão e emissividade de um corpo (ALTENER, 2004). Sendo, portanto, o grau de reflexão (ρ) (7), grau de absorção (α) (8), grau de transmissão (τ) (9) e emissividade (ε) (10) apresentados respectivamente pelas equações a seguir:

$$\rho = \frac{\text{Radiação reflectida}}{\text{Radiação incidente}} \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{\text{Radiação absorvida}}{\text{Radiação incidente}} \quad (8)$$

$$\tau = \frac{\text{Radiação transmitida}}{\text{Radiação incidente}} \quad (9)$$

$$\varepsilon = \frac{\text{Radiação emitida}}{\text{Radiação absorvida}} \quad (10)$$

Algumas variáveis são dependentes do material e do comprimento de onda. Em tecnologia solar térmica aplica-se a lei de Stefan-Boltzmann, que diz que um corpo emite radiação correspondente à 4ª potência da sua temperatura.

$$Q = \sigma \times T^4 \quad (11)$$

Onde:

Q = Radiação térmica emitida (W/m²)

σ = Constante de Stefan-Boltzmann (5,67x10⁸)(W/m²K⁴)

T⁴ = Temperatura absoluta de um corpo (K)

Os sistemas solares para aquecimento ambiente através do aquecimento de ar são comparáveis a sistemas solares cujo meio de transferência de calor é um líquido. Contudo, o ar, o meio de transferência de calor nestes sistemas solares, tem características físicas diferentes da água, o que conduz a consequências profundas. Uma comparação das diferentes propriedades torna esta questão mais clara (ALTENER, 2004, p 197). Segundo o autor as características do ar apresentam como consequência uma velocidade de aquecimento rápida podendo alcançar temperaturas úteis mesmo a níveis baixos de radiação, a condutividade térmica também é outro fator ser considerado no processo, juntamente, com o fluxo mássico e volúmico elevados necessitando de dimensionamento e instalações específicas.

Tabela 2.1: Alguns dados para ar e água a 25 °C e 1 bar (ALTENER, 2004, p 197)

	Ar	Água
Densidade	1,185 kg/m ³	998,200 kg/m ³
Capacidade calorífica específica c (massa)	0,28 Wh/kgK	1,16 Wh/kgK
Capacidade calorífica específica c (volume)	0,31 Wh/m ³ K	1,16 Wh/m ³ K
Condutividade térmica	0,026 W/mK	0,559 W/mK

O ar apresenta como meio de transferência de calor a vantagem de necessitar uma estrutura mais simples para o sistema, devido ao ar não congelar e nem ferver

como o aquecimento de água. Uma vantagem genérica da utilização dos sistemas solares térmicos de aquecimento ambiente é a capacidade de utilizar temperaturas baixas, obtendo-se um efeito positivo na eficiência do coletor sem as perdas na transferência de calor decorrentes do aquecimento da água (ALTENER, 2004, p 197).

As desvantagens desse sistema seriam decorrentes da capacidade térmica mais baixa e da fraca condutividade térmica, em comparação com os líquidos, são necessárias tubagens de maior diâmetro e permutadores de maiores dimensões para a transferência de calor. De um modo geral, estas propriedades permitem um sistema muito simples para o aquecimento solar direto de ambiente, visto que não é necessário um circuito separado para esta tarefa. O ar que passa através dos coletores pode ser diretamente introduzido no ambiente (ALTENER, 2004, p 197).

2.4 Os Secadores Solar

Para Palz (2002, p. 153), os processos agrícolas necessitam uma grande quantidade de energia para secagem. A energia solar é utilizada fortemente para secagem de várias colheitas em países em desenvolvimento. O método clássico de secagem solar consiste na exposição dos produtos à radiação solar ao ar livre. Entretanto, existe a necessidade de aproveitar melhor a energia solar para que o rendimento do processo seja mais eficiente. A utilização do efeito estufa no processo aprimora os sistemas de secagem solar, possibilitando não só a secagem de alimentos, mas outros produtos diferentes dos alimentícios como tijolos ou madeira.

Um secador solar pode ter dois princípios de funcionamento. O primeiro possui o aquecimento do ar efetuado no interior do espaço reservado à secagem e sua

montagem é muito simples, geralmente usados para secar madeira, pois a aeração é incompleta. O segundo princípio contém um coletor solar ligado a um recipiente fechado no qual se colocam os objetos a serem secados. A extremidade inferior do coletor solar é aberta para receber o ar fresco devido ao efeito termossifão, o qual pode ser variado através de uma convecção forçada, conforme Palz (2002, p.154).

Para Moreno (2006), os secadores solares possuem basicamente dois elementos: um coletor, onde a radiação esquenta o ar e a câmara de secagem, onde o produto é desidratado pelo ar que passa. Estes elementos podem ser desenhados de diferentes formas para formar diferentes equipamentos de secagem solar.

Os secadores solares podem variar a circulação de ar desde a placa coletora até a câmara de secagem. O ar circula dentro do secador com a finalidade de retirar a umidade evaporada do produto, esta movimentação de ar pode ser obtida por dois métodos: circulação forçada e por convecção natural.

Moreno (2006), diz que a circulação forçada ocorre quando o ar é movido por um ventilador que consome energia mecânica ou elétrica. Esta circulação facilita o desenho no caso dos equipamentos de tamanho grande e propicia o controle do processo de secagem. Este tipo de projeto pode ter velocidades de circulação de ar entre 0,5 e 1 m/s, tendo como principal desvantagem o fato do sistema depender de uma fonte de energia externa. Na circulação por convecção natural, o ar é movido pela diferença de temperatura entre as distâncias do equipamento que promove a convecção térmica do ar. Este tipo de circulação é mais difícil incorporar em projetos de grande escala, já para pequenas ou medianas se pode conseguir velocidades de ar entre 0,4 a 1 m/s no interior

da câmara, mas nos equipamentos de grande porte esta velocidade alcança apenas 0,1 a 0,3 m/s.

Consoante Palz (2002, p. 153), a utilização da eletricidade solar para alimentar o ventilador apresenta vantagens devido ao fluxo de ar manter uma relação com a quantidade de calor solar disponível. Portanto, o emprego deste mecanismo, placa fotovoltaica para obtenção de energia, ajuda a controlar a temperatura na câmara através da variação do fluxo alcançando velocidades maiores quando a energia do Sol é mais alta e velocidades menores quando a incidência solar é fraca.

2.4.1 Tipos de Secadores Solares

Secadores solares indiretos possuem separados o coletor e a câmara de secagem. Consoante Moreno (2006), o ar é aquecido no coletor e a radiação não incide sobre o produto colocado em uma câmara de secagem, esta por sua vez não permite entrada da radiação solar. Estes secadores são basicamente convectivos, no qual o Sol é a fonte energética. A diferença dos secadores diretos para os indiretos simplificada é a transmissão de calor e a separação de vapor. Algumas características de operação definem este tipo de secador indireto.

Os secadores indiretos que utilizam fluidos de condensação como meio de aquecimento são, em geral, econômicos desde o ponto de vista do consumo de calor, já que o coletor solar fornece calor somente de acordo com a demanda feita pelo material que se está secando. O calor se transfere ao material úmido por condução através de uma parede de retenção de sólidos, quase sempre de natureza metálica. As temperaturas

de superfície podem variar desde níveis inferiores a de congelamento, até maiores de 550 °C, no caso de secadores indiretos aquecidos por meio de produtos de combustão.

Seu funcionamento se caracteriza por algum método de agitação para aumentar o contato entre o material úmido e a superfície metálica para efetuar, assim, uma troca contínua de material úmido na superfície quente. A natureza do dito contato determina a velocidade de secagem total dos secadores indiretos. Os materiais granulares pesados dão maiores coeficientes de transferência de calor de contato que os materiais sólidos volumosos (MORENO, 2006).

Os secadores solares diretos possuem o coletor e a câmara de secagem juntos, fazendo da câmara também um local de recebimento da radiação solar. Para Moreno (2006), nos secadores solares diretos a radiação solar é absorvida pelo próprio produto, resultando num aproveitamento mais efetivo da energia para produzir a evaporação da água. Isto se deve à pressão de vapor na superfície do produto aumentar pela absorção da radiação solar. Quanto maior o gradiente de pressão de vapor entre o produto, mais acelerado o processo de secagem. A combinação de coletor e câmara em uma só unidade pode ser mais econômica em muitos casos, especialmente nos secadores de menor tamanho. Este tipo de secador é quase sempre com circulação de ar por convecção natural, devido ao controle do processo ser pouco confiável. Para alguns produtos a ação da radiação solar pode destruir alguns compostos orgânicos que o compõem e que tem interesse comercial. As características gerais de operação dos secadores diretos serão apresentadas a seguir para um melhor entendimento.

O agente de secagem pode ser ar aquecido por vapor, gases de combustão, gás inerte aquecido ou vapor de água sobreaquecido. A secagem se efetua por transferência de calor por convecção entre os gases quentes e os sólidos molhados, onde o fluxo de gases extrai o líquido vaporizado e separa o vapor. Um secador direto consome mais combustíveis por kilograma de água evaporada enquanto mais baixo seja o conteúdo de umidade. A eficiência melhora quando aumenta a temperatura do gás de entrada a uma temperatura de saída constante.

Existe a possibilidade de mesclar os dois tipos de secadores solar, onde Moreno (2006) fala que este nesta configuração a radiação é coletada tanto no coletor solar acoplado a câmara quanto na mesma, apresentando várias janelas, tornando o processo de controle mais simples, como a integração de uma fonte auxiliar de energia para construir um sistema híbrido. Ter uma câmara de secagem separada dos coletores facilita a manipulação do produto e o trabalho de cargas e descargas permitindo a entrada da radiação solar no sistema sendo, portanto, conveniente utilizar produtos que possam perder ou ganhar qualidade por exposição direta ao Sol. Este tipo de secador apresenta algumas desvantagens como o aumento do tamanho e conseqüentemente dos custos por agregar a placa coletora solar. Outra questão negativa seria a necessidade de movimentação de ar maior para evaporar a mesma quantidade de água que os secadores diretos, o que implica numa temperatura maior.

2.4.2 Forma de Operação

Para Moreno (2006), os secadores solares possuem duas formas básicas de operação: a secagem de turno, onde o produto é carregado em uma vez e o mesmo não é retirado até que esteja completamente seco. Todo produto dentro do secador vai

passando de um estado úmido para um estado seco paulatinamente. Este arranjo é mais simples do que o processo de carga e movimento do produto dentro do equipamento, direcionado para secadores pequenos ou médios.

Já nos secadores contínuos, o produto vai sendo carregado e descarregado em turnos parciais dentro do mesmo secador onde se encontra uma parte do produto úmido e outro quase seco. O período entre cargas de turno varia de acordo com o equipamento. Em alguns casos a carga e descarga parcial se realizam uma ou várias vezes por dia, podendo ter sua convecção natural ou forçada.

2.4.3 Tempo de Secagem e o Fluxo de Ar

A capacidade de produção é definida com a relação do peso do produto fresco total a ser secado. Em geral, cada tipo de secador solar tem um funcionamento mais apropriado para medição da capacidade de produção, existem, por exemplo, os secadores solares de fluxo aberto conforme a Figura 2.2 e os secadores solares de fluxo fechado referente à Figura 2.3 (MORENO, 2006).

O tempo de secagem deve ser considerado em três períodos distintos: no primeiro acontece o aquecimento inicial do produto no qual a velocidade de secagem em função do tempo aumenta. O segundo, o lapso de velocidade de secagem permanece constante e é independente do sólido de modo que para as mesmas condições externas o processo é similar ao que acontece na superfície de uma massa de água. No terceiro momento, a umidade superficial já foi eliminada, já a umidade interna remanescente começa a ser eliminada, mas a velocidade da secagem decresce à medida que se perde

umidade interna por evaporação na superfície. As durações dos períodos de secagem variam de um secador para outro e de um produto para outro.

O melhoramento do fluxo requerido de ar é importante já que este ar em contato com o produto extrai a umidade. A temperatura inicial da corrente de ar desce conforme avança a secagem. No percurso do secador o ar aumenta sua umidade relativa, para um processo de secagem ideal, esta umidade relativa deve chegar a ser o mais próximo possível da umidade de saturação. Em um processo eficiente é necessário determinar o fluxo mássico de ar ótimo para secar o produto num menor tempo possível, o qual vai depender da natureza do produto, tipo de secador, entre outras coisas.

Conhecendo as temperaturas existentes nos diversos pontos do secador, pode-se determinar aproximadamente quanto corretamente o secador esta sendo eficaz relacionado ao ar de entrada. A corrente de ar ótima do secador será alcançada quando no ponto final de secagem, a umidade do ar esteja perto da umidade de saturação. Isto acontecerá quando a temperatura na saída do secador for igual a temperatura do bulbo úmido correspondente as condições da temperatura de fluxo do ar e de umidade iniciais na entrada do secador (MORENO, 2006).

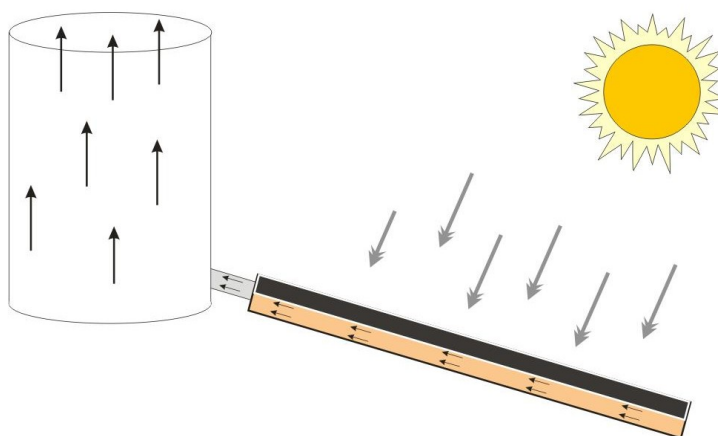


Figura 2.5: secador indireto com fluxo de ar aberto

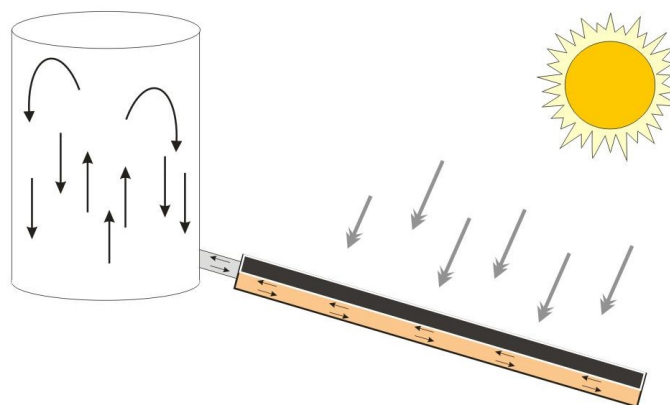


Figura 2.6: secador indireto com fluxo de ar fechado

2.5 Movimentação do Produto no Silo

O processo de secagem com baixas temperaturas pode ser classificado de duas formas quanto ao tipo de movimentação do produto. A primeira é o processo estático, onde o produto não é movimentado durante o processo e observam-se as três regiões distintas na massa de grãos, conforme na figura 2.7(a). A segunda é chamada de Revolvimento do produto, esta operação geralmente é associada à secagem em regiões de umidade relativa média inferior a 60% ou onde há necessidade de aquecer o ar de secagem. Nessas condições, os gradientes de umidade e temperatura estabelecidos na massa de grãos são maiores, podendo ocorrer supersecagem da massa de grãos. Para solucionar o problema, a frente de secagem deve ser destruída por uma rosca transportadora nua, que faz o revolvimento do produto no interior do silo, homogeneizando e elevando as camadas inferiores secas para a parte superior do silo. O esquema de um equipamento revolverdor “stirring device” é apresentado na figura 2.7 (b). O aquecimento misturador é formado por uma rosca vertical que se movimenta radialmente do centro para a parede do silo e vice-versa, misturando o produto verticalmente (SILVA; DONZELLES; CORRÊA; 2008, p 117)

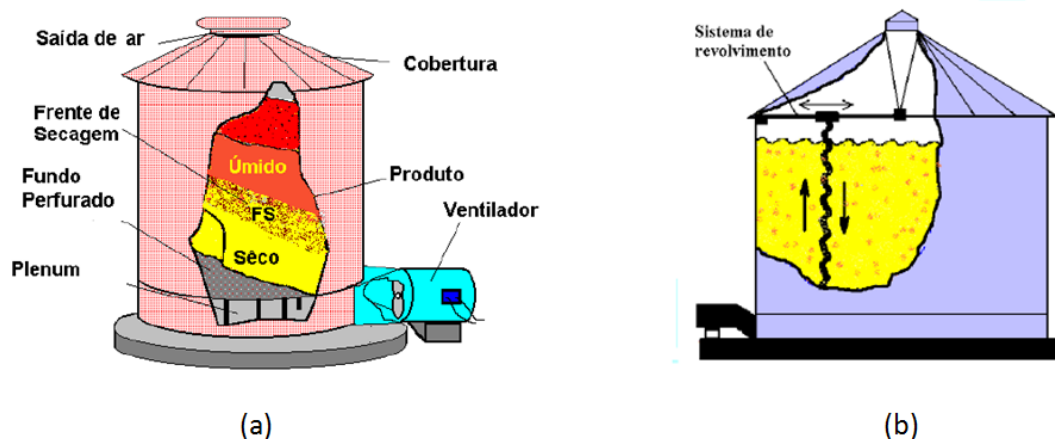


Figura 2.7: (a) silo para secagem com ar natural ou baixa temperatura mostrado a frente de secagem (FS). (b) silo com equipamento para revolvimento do produto (SILVA; DONZELLES; CORRÊA; 2008)

Outro método de revolvimento do produto consiste no uso de recirculadores, figura 2.8, o equipamento remove os grãos das camadas próximas ao piso e os colocam no topo da massa. O teor de umidade da camada a ser removida é função de sua temperatura. A camada de grãos é removida a medida que a frente de secagem é parcialmente formada. Assim, a frente de secagem não se estabelece completamente junto à sua superfície inferior, e o grão não atinge o equilíbrio com o ar de secagem. A zona de secagem permanece estacionária, com os grãos úmidos movimentando-se para baixo. Esse método possui como vantagens o maior rendimento para o mesmo volume de produto e fluxo de ar do que o método de enchimento em uma etapa, menor risco de deterioração do que os métodos anteriores e eliminação do gradiente de umidade. As desvantagens são a maior manipulação do produto do que em todos os métodos estáticos, o que pode provocar maior índice de produto com danos mecânicos, maior investimento inicial e maior custo operacional do que no método estático, sobrecarga do equipamento sobre as paredes e o piso do silo e o acúmulo de materiais finos no centro do silo (SILVA; DONZELLES; CORRÊA; 2008, p 119)

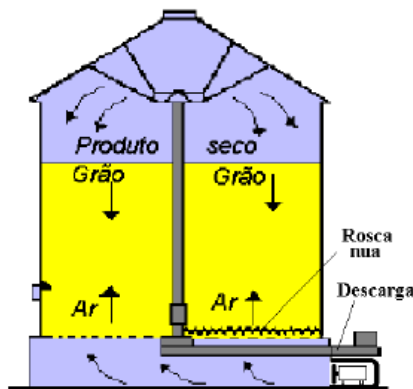


Figura 2.8: Silo equipado com recirculador de grãos (SILVA; DONZELLES; CORRÊA; 2008)

2.6 O Vento na Movimentação da Biomassa

O vento é uma energia limpa e abundante que apresenta a vantagem da complementaridade com os sistemas hidrelétricos ou de biomassa, pois em muitas regiões do país os ventos são mais fortes e constantes justamente nas épocas de seca nos reservatórios e na entressafra das culturas cujos resíduos podem ser utilizados na geração de energia.

Um exemplo a ser utilizado, é a *panémona* nomenclatura de origem espanhola que representa um aerogerador composto de um rotor de eixo vertical lento, de construção simples, criado na China para mover bombas e pequenos moinhos de cereais. É um dos melhores equipamentos de baixo custo para retirar água a grandes profundidades, entre 15 e 40 m. Uma de suas características é um torque muito lento, cerca de 20 e 30 rpm, portanto, com poucas vibrações na sua estrutura. Sua construção pode ser feita através de toneis cortados ao meio ou até mesmo com garrafas plásticas para movimentação (LUS, 2003, p. 110-122). A estrutura de uma *panémona* fica evidenciada na Figura 2.6.

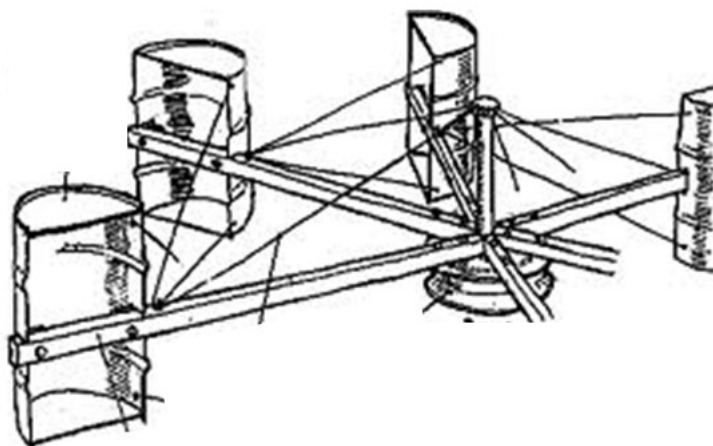


Figura 2.9: imagem de uma panémona (LUS, 2003, p. 112)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A proposta deste trabalho foi construir o secador solar híbrido. Após a construção, foram realizadas análises de temperatura no interior do secador e velocidade de movimentação em função do vento disponível no período. Para verificar o funcionamento do sistema foram realizados testes com diferentes biomassas, os testes consistiram em colocar uma quantidade de biomassa no secador e analisar em períodos regulares a umidade da biomassa para poder verificar a eficiência do sistema.

3.1 Protótipo do Secador Solar

A terceira etapa do projeto constituiu a montagem do secador híbrido autossustentável e foi realizada em 3 fases, construção das placas solares coletoras, construção do silo para armazenamento e a parte do revolvimento da biomassa movida com energia eólica. A seguir descreveremos as etapas e dimensões, com cotas em cm, do projeto de cada parte respectivamente.

As placas solares foram montadas a partir do corte das tabuas de pinos, em 96 cm para as laterais e 50 cm para as partes superior e inferior, com a finalidade de construir uma caixa que servirá de base para os painéis. Cada tabua, em sua extensão, possui um corte de 1 cm de profundidade no centro para o encaixe da chapa galvanizada que compõe o corpo negro, e um desgaste superior de 1,5 x 1 cm para colocação do vidro, e inferior de 1x1cm para acoplamento do forro de pinos que servirá de fundo, conforme a figura 3.1, os orifícios de entrada e saída, com um diâmetro de 2,5 cm, foram realizados nesta etapa também.

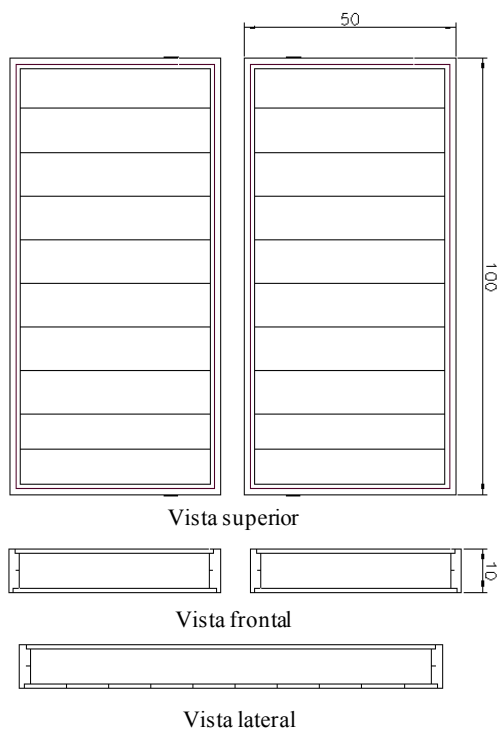


Figura 3.1: esquema (dimensões em cm) de construção da base em madeira para as placas

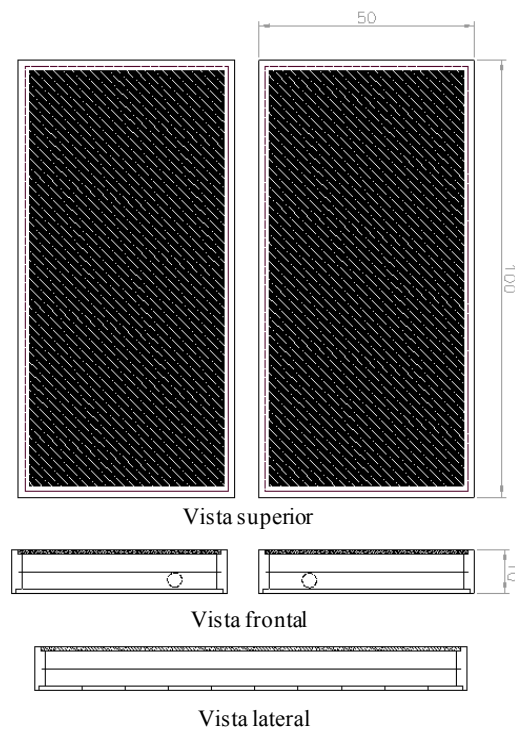


Figura 3.2: esquema (dimensões em cm) de construção dos painéis, com o revestimento isolante e a cobertura de vidro

Após a construção da base, cada caixa foi revestida internamente com uma manta isolante térmica de 0,2 cm de espessura, fixada através de grampos para madeira. Feito o revestimento interno foi encaixado no centro de cada painel a chapa de aço galvanizado responsável pelo aquecimento do ar através da radiação solar. Completada esta etapa, os painéis foram revestidos externamente com chapa de aço galvanizado, presas com pregos, para ajudar na impermeabilidade das placas. Todo conjunto foi pintado com tinta esmalte sintético preto fosco formando um corpo negro. Posteriormente, foi encaixado o vidro de superfície, vedado com cola de silicone para altas temperaturas e fixado através de parafusos e uma moldura de ferro/cantoneira de 3,8 cm, conforme a figura 3.2.

Por fim, foram colocados os dutos, com 2,5 cm de diâmetro, de entrada e saída de ar, vedados com silicone para altas temperaturas totalizando 100 cm² de área. A

distância entre as duas placas foi determinada levando em conta a entrada de ar no silo. A colocação dos cavaletes de sustentação foi realizada através de parafusos, levando em consideração a possibilidade de articular os mesmos para ajuste da inclinação das placas para ajustá-las em relação à inclinação solar da cidade, conforme a figura 3.3.

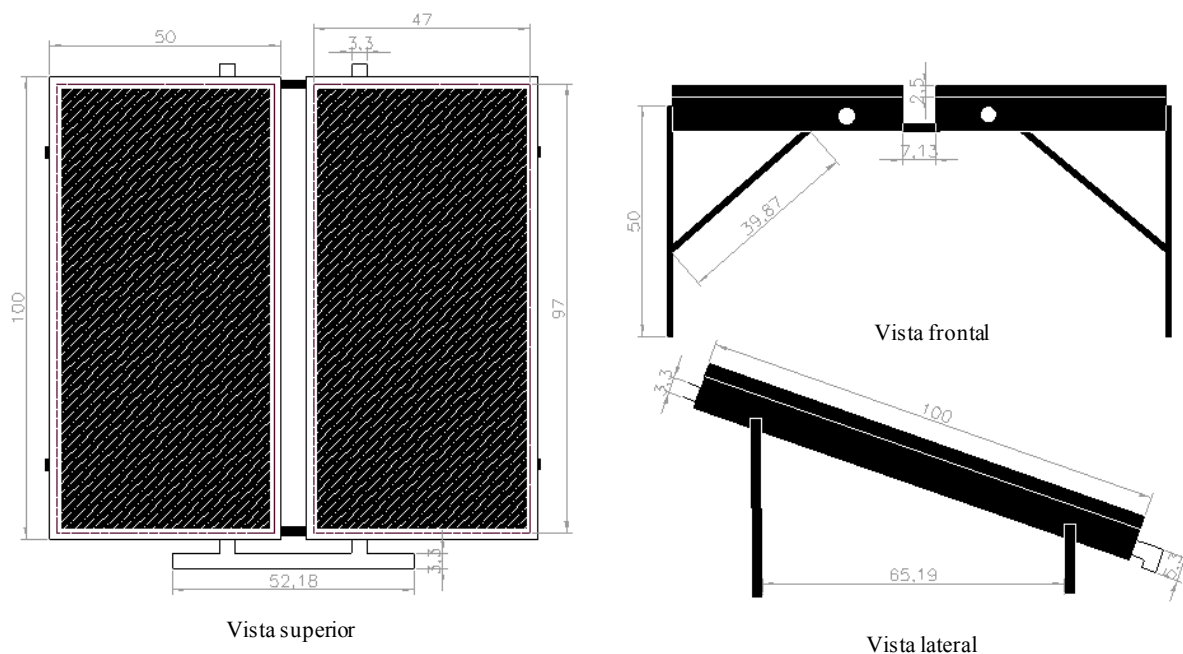


Figura 3.3: placas solares coletoras finalizadas, vistas superior, frontal e lateral (dimensões em cm).

O primeiro passo, para a construção do silo foi a elaboração da parte inferior, a qual possui o formato cônico e servirá de base para restante dos elementos. Esta peça teve com origem uma chapa de aço galvanizado no formato de um círculo com o raio de 50 cm, que após ter sido moldada apresentou as seguintes dimensões, conforme a figura 3.4:

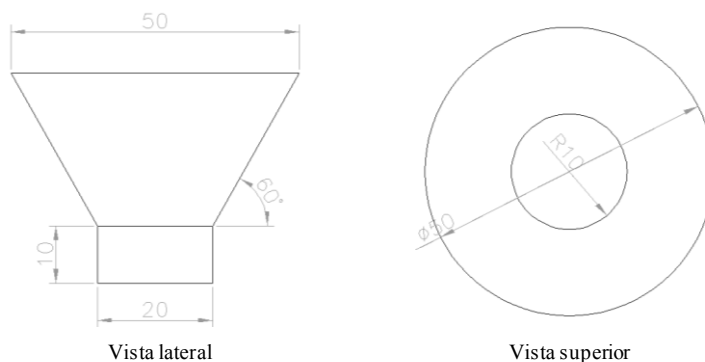


Figura 3.4: parte cônica inferior do silo que servirá de base (dimensões em cm)

Realizada a construção da base, foi confeccionada outra peça cônica com características de tamanho e inclinação diferentes, ela é composta por oito conjuntos de furos com 0,1 cm de diâmetro cada, e um ângulo de inclinação igual a 53 graus, a qual sobreposta a base cônica forma uma câmara de distribuição de ar, onde será localizado o leito de secagem., como pode ser visto na figura 3.5:

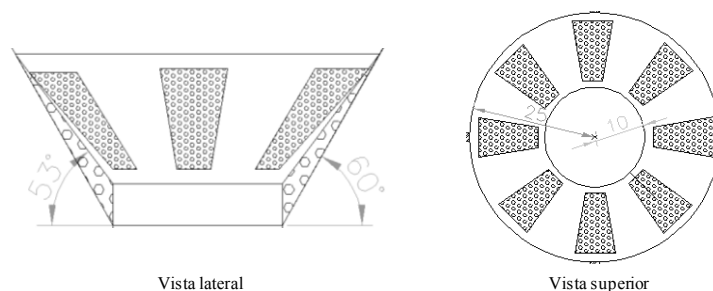


Figura 3.5: conjunto base cônica que forma a câmara de ar e o leito de secagem (dimensões em cm)

O próximo passo, foi a colocação do pedestal, composto por cantoneiras de 1,8 cm de largura, fixados a base por 3 rebites em cada haste, em um total de quatro. Cada haste foi unida a outra na parte inferior por um ferro cilíndrico 0,42 cm, figura 7 mostra a parte base completa que forma a plataforma do silo, vista lateralmente e vista superior do conjunto total peça.

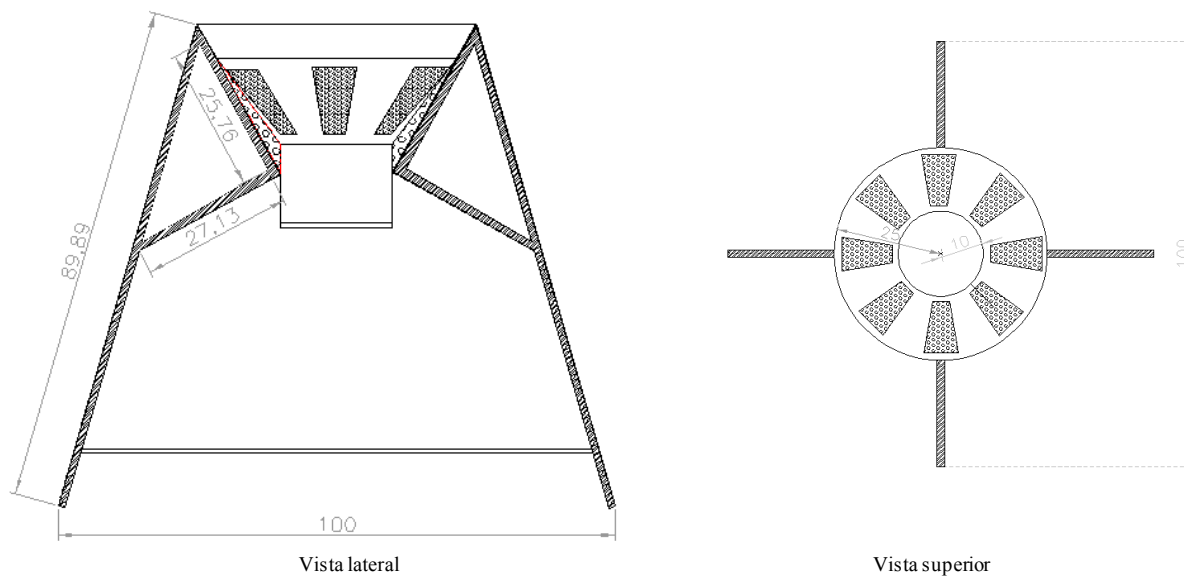


Figura 3.6: plataforma do silo, vista lateral de um corte vertical da peça e uma vista superior completa

Após a construção da plataforma, foi construída câmara da rosca sem fim, esta peça foi confeccionada por uma chapa de aço galvanizado, moldada na forma de um cilindro, conforme a figura 3.7. Esta câmara foi fixada na parte central da base do silo e possui duas aberturas laterais com 10 x 15 cm para entrada de biomassa na rosca nua, figura 3.8.

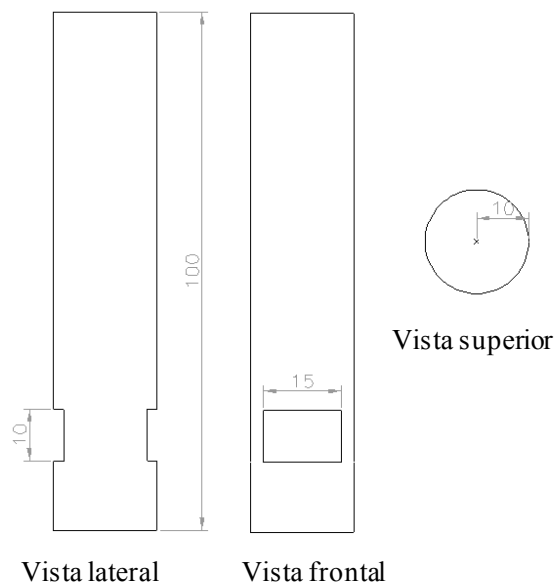


Figura 3.7: dimensões (em cm), vistas lateral, frontal e superior da câmara da rosca sem fim

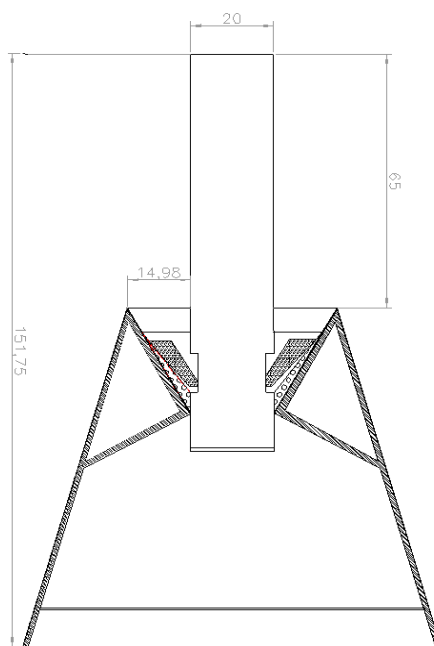


Figura 3.8: vista de um corte vertical da plataforma do silo com a câmara da rosca sem fim fixa (dimensões em cm)

Através de um retângulo com dimensões 70 x 160 cm de uma chapa de aço galvanizado enrolado e colocado no interior de 3 anéis de ferro chato 1,8 cm de largura com raio de 25 cm, formando a parte cilíndrica do silo. Os anéis foram distribuídos nas extremidades do cilindro e um no centro. A chapa de aço galvanizado foi fixada por rebites aos anéis. A figura 3.9 mostra as dimensões do cilindro que compõe o corpo do silo.

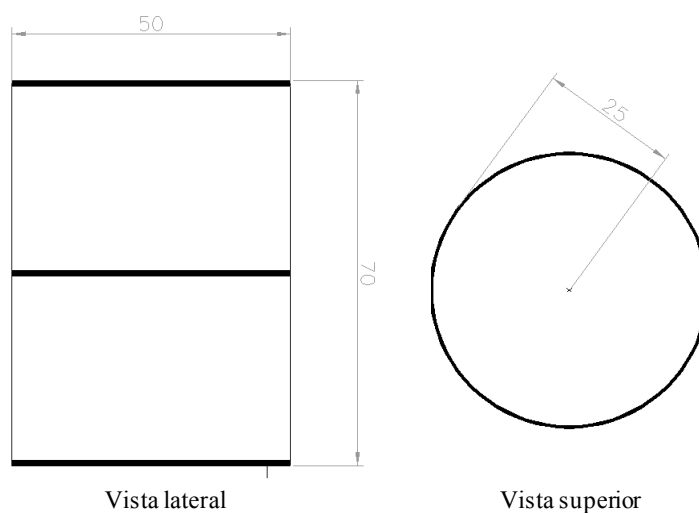


Figura 3.9: dimensões (em cm) do cilindro que compõe o corpo do silo, vista lateral e superior

A figura 3.10 apresenta a peça já encaixada na plataforma e, posteriormente, revestida na sua totalidade com manta isolante térmica com espessura de 0,2 cm, para a troca de temperatura do secador com o ambiente ocorra apenas na parte superior do silo, finalizando assim a construção do silo para armazenagem de biomassa com capacidade de 0,3 m³.

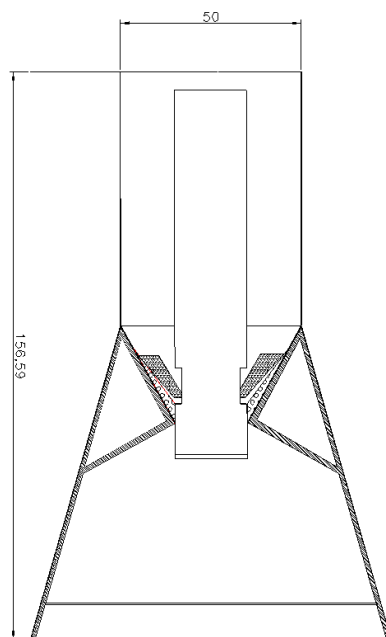


Figura 3.10: vista de um corte vertical da plataforma do silo com o cilindro que compõe o corpo do silo

A construção do equipamento responsável pelo revolvimento da biomassa no interior do silo tem como base os dois aros de bicicleta com 58 cm de diâmetro. Um dos aros tem sua estrutura completa, possuindo raios e cubo central com rolamentos, e será utilizado na parte superior da peça e o outro composto apenas pelo aro para o encaixe das pás. Os canos em PVC 7,5 cm foram cortados em 10 partes com 70 cm, e posteriormente, cortados pela metade, formando 20 pás que compõem o sistema eólico. As pás foram fixadas nos aros utilizando parafusos, dando origem a figura 3.11.

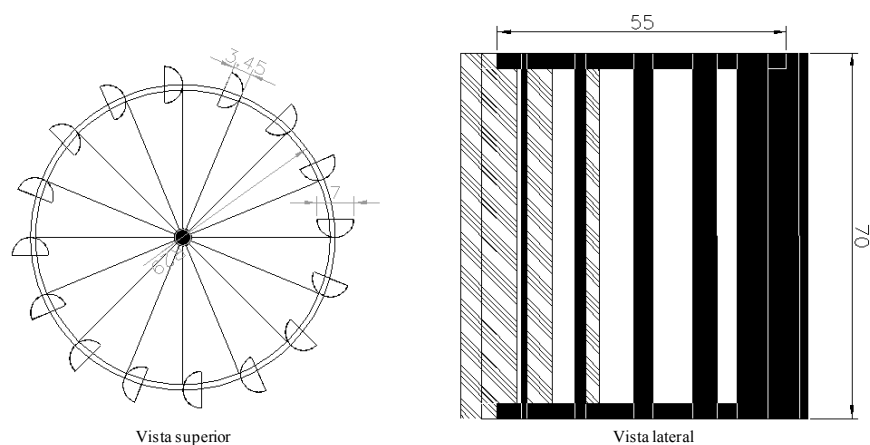


Figura 3.11: esquema (dimensões em cm) do sistema eólico que compõe o equipamento de revolvimento

Para construção da rosca sem fim foi utilizado um duto em aço galvanizado com 4 cm de diâmetro eixo e 19 discos com 20 cm de diâmetro em chapa de aço galvanizado, os quais foram ligados um ao outro através de rebites, formando a rosca sem fim, como mostra a figura 3.12:

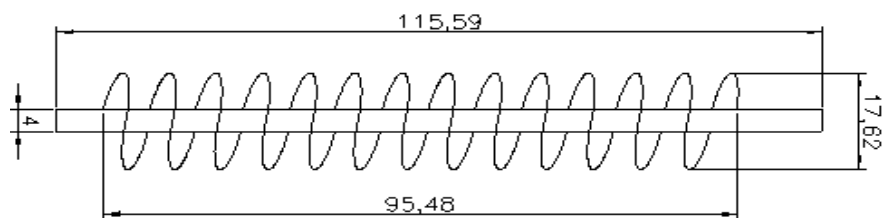


Figura 3.12: dimensões (em cm) da montagem da rosca sem fim

Após esta etapa, foi unida a rosca sem fim ao sistema de pás através de parafusos, ligando o eixo da rosca ao cubo da roda, configurando a figura 3.13.

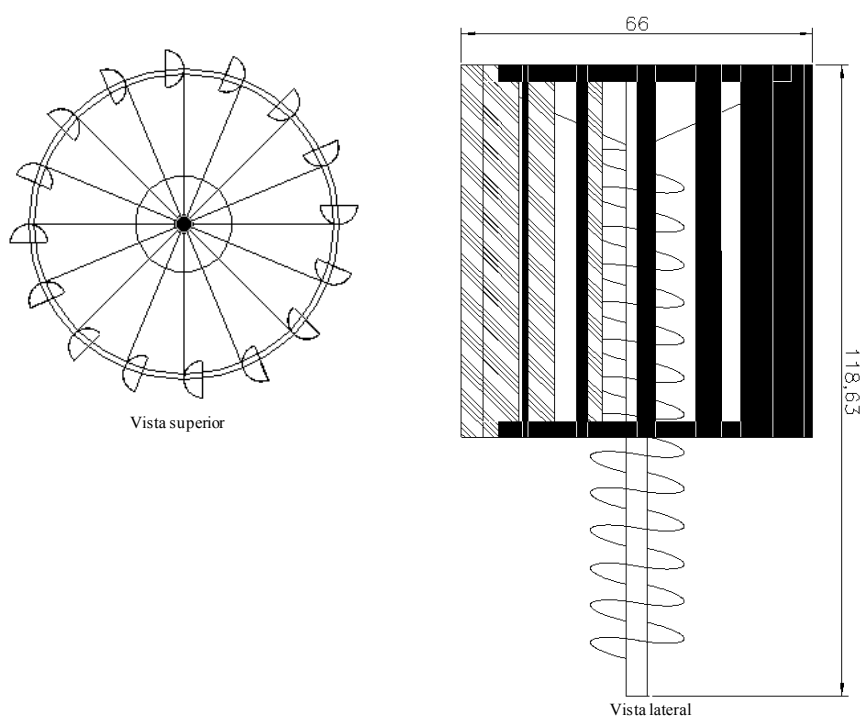


Figura 3.13: acoplamento da rosca sem fim ao sistema eólico (dimensões em cm)

Para fixação do sistema de revolvimento eólico no silo foi necessário articular uma estrutura metálica utilizando cantoneiras 1,8 cm de largura para manter as pás

livres. O sistema metálico pode ser visto na figura 3.14 e foi preso ao silo através de parafusos, esta estrutura também servirá de base para colocação da tampa do silo.

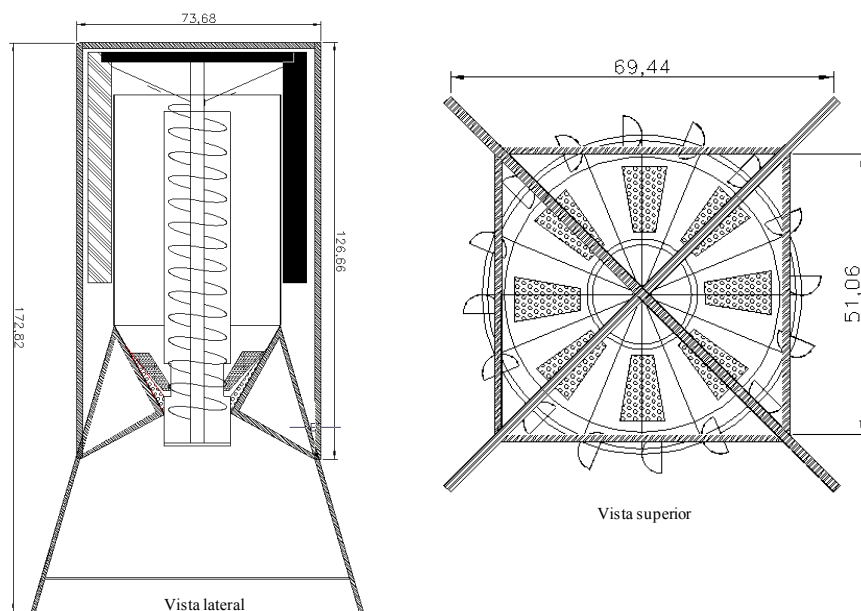


Figura 3.14: acoplamento do sistema de revolvimento ao silo utilizando uma estrutura metálica (dimensões em cm)

Por fim, foi construída a tampa do silo, constituída por uma chapa de aço galvanizado em formato cônico de raio 40 cm, possui uma pequena entrada circular em um dos lados com raio de 5 cm. A função desta peça é proteger a biomassa contra intempérie, mas permitindo a saída do ar do silo junto com a umidade. A figura 3.15 apresenta o modelo construído:

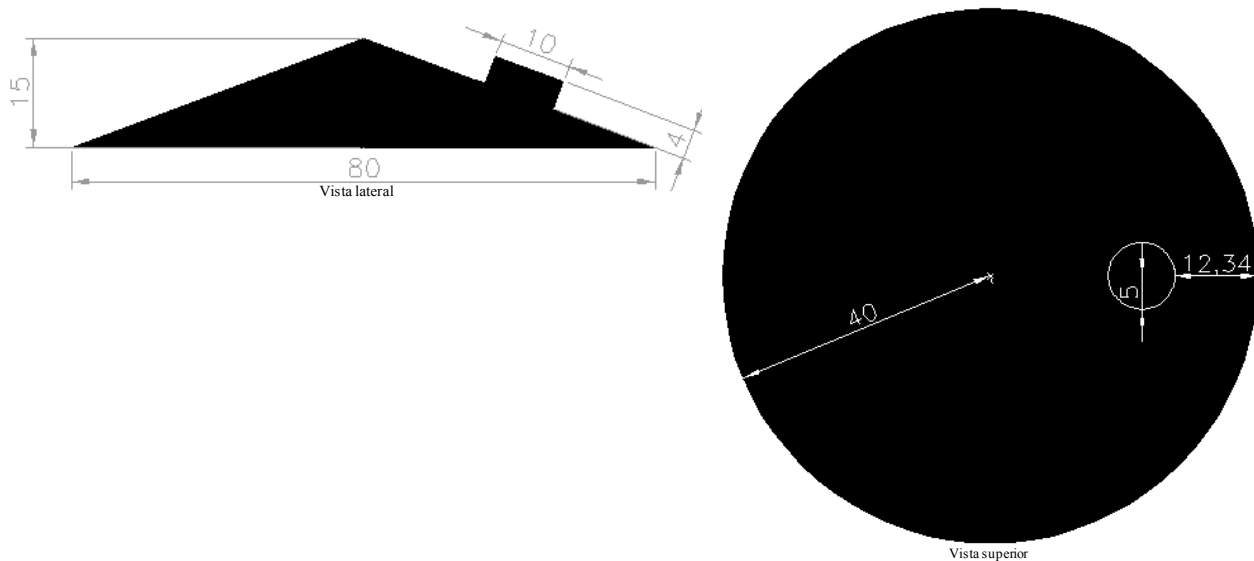


Figura 3.15: esquema (dimensões em cm) de construção da tampa do silo

3.2 Medidas de temperaturas e radiação

Para as medições das temperaturas no secador foi utilizado um termopar acoplado a um multíteste ICEL MD-6490 que possui um intervalo de medição entre $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm (1\%+3^{\circ}\text{C})$. Foram determinados seis principais pontos no equipamento para tomada de dados térmicos, sendo eles: em torno do secador, no topo do silo, na câmara de ar quente, no duto de condução, na parte inferior da placa (passagem do ar) e na parte superior da placa (efeito estufa).



Figura 3.16: multíteste ICEL MD-6490 utilizado com termopar para medição de temperaturas

A radiação recebida pelas placas solares foi verificada através de um luxímetro digital Politem, modelo LX1010B com capacidade de medição entre o intervalo 0.1 a 50,000 Lux.



Figura 3.17: luxímetro digital Politem, modelo LX1010B utilizado para medir a radiação recebida pelas placas

3.3 Posicionamento da Placa Solar

Os testes do presente trabalho foram desenvolvidos durante o período do verão e outono, portanto, indo do período que há mais insolação para um de menor, utilizando uma inclinação média na placa solar para todas as estações do ano. O secador solar foi instalado utilizando uma bússola para obter a orientação geográfica, o norte, e o programa de computador Radiasol¹ para determinar a melhor inclinação para as coordenadas da cidade de Bagé-RS, o qual indicou uma inclinação média de 39° para o ângulo das placas.

3.4 Movimentação das pás

A velocidade de movimentação das pás responsável pelo revolvimento da biomassa foi verificada através de um odômetro digital (figura 3.18) instalado na estrutura do secador.



Figura 3.18: odômetro digital utilizado para verificar a movimentação das pás.

¹ Disponível em: <http://www.solar.ufrgs.br>

3.5 Umidade

A determinação da umidade foi desenvolvida através do método direto por infravermelho utilizando uma balança de umidade marca Radwag Modelo MAC210 com capacidade 0,001g a 210g de peso.

Pelo método direto a água é retirada do produto (Antonio (2006, p 5), geralmente por processo de aquecimento, e o teor de umidade é calculado pela diferença de peso das amostras no início e no final do processo. Devido a sua maior confiabilidade, os métodos diretos são empregados como padrão para a aferição de outros procedimentos. No método direto por infravermelho é utilizado um aparelho portátil que permite a obtenção de resultados rápidos de porcentagem de umidade, sendo todo o processo controlado por um gerador de funções e balança digital.



Figura 3.19: balança de medição de umidade Radwag Modelo MAC210 utilizada na determinação da umidade da biomassa

A amostra é colocada em um prato de alumínio dentro de uma câmara que protege a balança do calor por meio de um colchão de ar, que garante que haja circulação de ar interna para que os vapores de água saiam da amostra sem que seja perturbada a leitura da balança. No manual do aparelho existem informações sobre as

condições recomendadas de análise para cada tipo de produto (tempo, temperatura e massa inicial de produto). A umidade ambiente e demais dados meteorológicos foram adquiridos no Instituto Nacional de Meteorologia – INMET².

A granulometria da biomassa utilizada, figura 3.20 (a) referente a casca de arroz, para o estudo teve como parâmetro o conceito biomassa ideal para compactação, a qual deve ser composta por uma mistura de partículas de vários tamanhos, sendo que a média máxima relacionada com a matriz da briquetadeira. Um tamanho genérico aceitável esta entre as dimensões de 8 a 10 mm. O tamanho inicial das partículas influencia também a densidade final dos briquetes. Granulometria pequena resulta em briquetes mais densos, entretanto, requerendo pressões e temperaturas mais elevadas.

Outras biomassas testadas foram uma amostra de cavaco, figura 3.20 (b), bastante irregular e o arroz com casca, figura 3.20 (c).



Figura 3.20: granulometria das biomassas testas no secador solar: (a) casca de arroz, (b) cavaco e (c) arroz com casca

² Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>

4 CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

A construção do protótipo seguiu basicamente o modelo apresentado anteriormente, apenas com algumas adaptações necessária devido à aquisição e um melhor aproveitamento dos materiais. A montagem foi dividida em três partes: placa solar, silo e recirculador eólico, no anexo 1 deste trabalho encontra-se a planilha dos custos envolvidos na construção.

✓ Placas

Para as placas solares foram montadas duas caixas de madeira (fig. 4.1 (a)) com parâmetros de 0,5 m de largura x 1m de comprimento por 0,1m de espessura, com dois furos de 1 polegada para entrada e saída do ar.



Figura 4.1: montagem das placas solares – (a) base em madeira das placas, (b) isolamento interno das placas, (c) colocação da chapa em aço galvanizado e (d) conjunto final das placas.

Diferentemente do projeto, onde era apenas uma placa de 1m^2 , foram construídas duas placas com área de meio metro quadrado cada uma, totalizando 1m^2 , para facilitar a montagem do equipamento, auxiliar no transporte dos vidros de cobertura e na busca de distribuição mais uniforme do ar no interior do silo.

As caixas de madeira foram forradas interiormente com uma manta térmica (fig. 4 (b)), com a finalidade de isolar o máximo possível o ar aquecido do ambiente externo. Posteriormente, foi colocada a chapa de aço galvanizado a uma distância de $0,05\text{m}$ do fundo da caixa (fig. 4.1 (c)). As caixas foram ainda revestidas externamente com chapa de aço galvanizado aumentando a impermeabilidade e sua vida útil. Após esta etapa, todo o aparato por fora foi pintado de preto fosco com o objetivo de constituir um corpo negro. Por fim, foram colocados os vidros na parte superior, para que ocorra um efeito estufa. Os vidros foram selados com silicone de altas temperaturas antes de serem emoldurados por uma cantoneira de aço $\frac{3}{4}$ de polegada (fig 4.1 (d)). Um mecanismo foi acoplado no canto inferior do conjunto de placas (fig. 4.2) para facilitar a colocação da inclinação desejada das mesmas.



Figura 4.2: mecanismo para determinar a inclinação das placas

✓ Silo

O silo teve início com a confecção da parte cônica em chapa galvanizada (fig. 4.3 (a)), a qual serviu de base para o acoplamento do restante dos elementos. Feito o cone, foram fixados os suportes em cantoneira $\frac{1}{2}$ de polegada. A construção das câmaras para a rosca nua (fig. 4.3 (c)) e de ar aquecido que compõem a frente de secagem foi o próximo passo (fig. 4.3 (d)).



Figura 4.3: (a) montagem da parte cônica do equipamento, (b) montagem da base com a fixação dos suportes da base, (c) montagem da câmara da rosca nua e (d) base final do silo com a câmara de ar aquecido

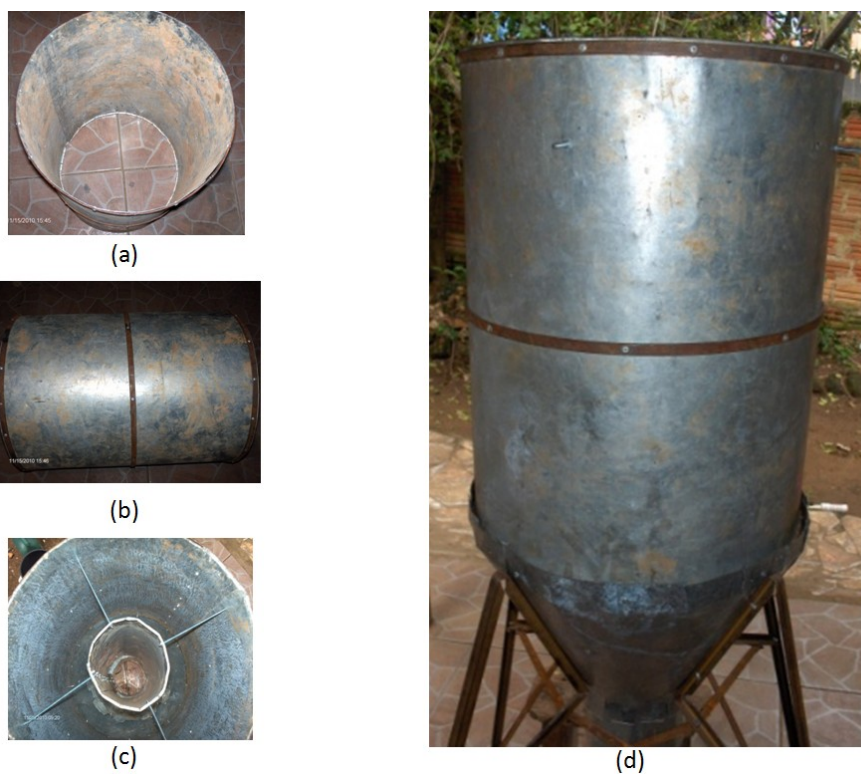


Figura 4.4: montagem do silo. (a) e (b) construção do cilindro, (c) fixação da parte interna do equipamento e (d) encaixe na base cônica já montada.

Em um segundo momento, foi construído o cilindro em chapa de aço galvanizada (fig. 4.4 (a) (b)) e fixado nas partes superior da base e câmara da rosca nua (fig 4.4 (c) (d)). O conjunto obedeceu praticamente às dimensões de projeto, tendo a capacidade total de $0,3 \text{ m}^3$ de armazenamento de biomassa.

Duas entradas de ar quente no equipamento foram feitas, cada uma com diâmetro de 1 polegada (fig. 4.5 (a)) para o encaixe dos dutos de transporte do ar (fig. 4.5 (b)). Posteriormente, foi colocada uma manta térmica em toda extensão do silo para (fig. 4.5 (d)) manter o máximo possível a temperatura interna, fazendo que a troca ocorra apenas na parte superior do compartimento.

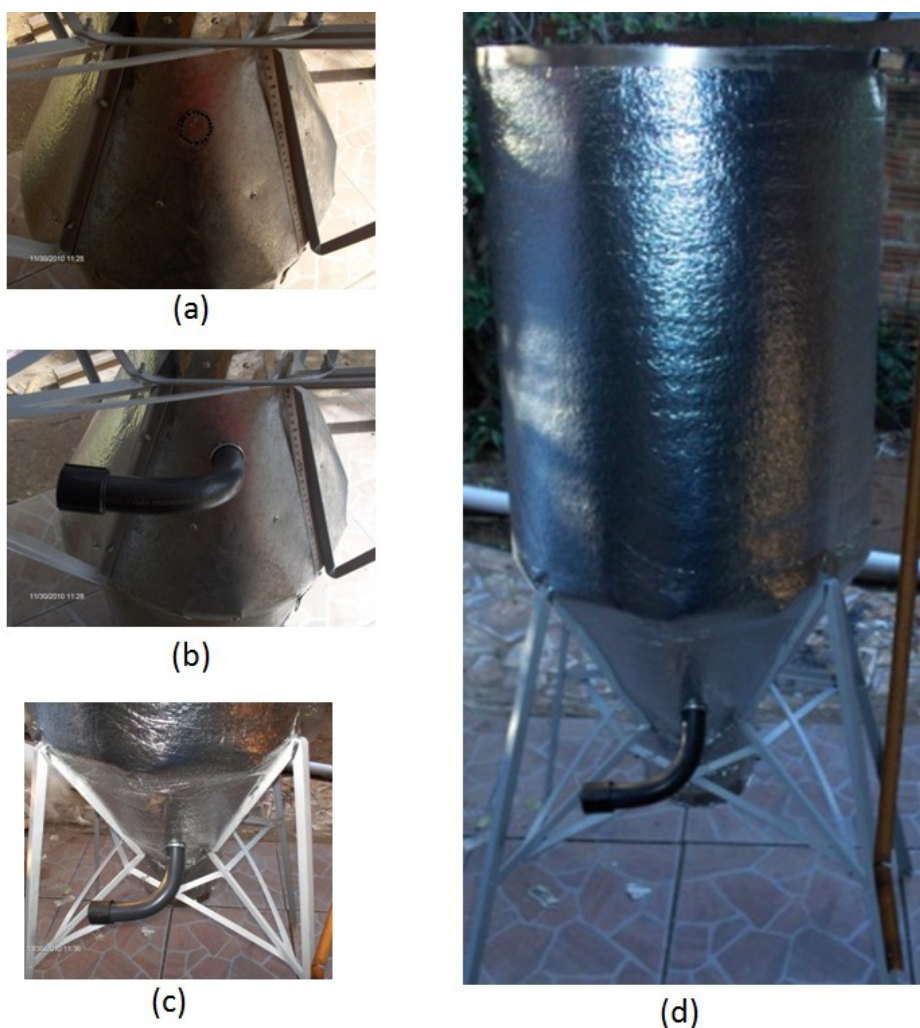


Figura 4.5: colocação do duto e revestimento térmico. (a) e (b) demarcação do encaixe e colocação do duto, (c) e (d) revestimento térmico no silo

✓ Recirculador eólico

Esta última parte do aparato foi construída a partir da rosca nua, em um eixo de 1 polegada e 19 discos com 0,15m de diâmetro em aço galvanizado, os quais foram ligados um ao outro, formando a rosca (fig. 4.6). Para a estruturas das pás foram utilizados 20 pedaços de cano de 0,6m de comprimento e 0,075m diâmetro, compondo a metade do tubo e dois aros em aço de 0,54m de diâmetro.



Figura 4.6: montagem da rosca nua que compõe o centro do equipamento de revolvimento

Por fim, a colocação da tampa em aço galvanizado, com diâmetro de 0,8m, em forma de chapéu para proteção contra intempérie e que permite a saída do ar do silo junto com a umidade da biomassa. O secador necessitou ainda, da construção de uma base em madeira para que os dutos de saída dos painéis de aquecimento mantivessem a mesma inclinação das placas.



Figura 4.7: secador solar finalizado e instalado na UNIPAMPA- Campus Bagé

5 ANÁLISE E DISCUSSÕES

5.1 Dados de temperatura, radiação incidente e velocidades do Secador Vazio

A temperatura do secador solar foi medida em seis pontos diversos do equipamento mencionado anteriormente, conforme a figura 5.1, com a intenção de mapear o fluxo de calor durante o processo de funcionamento. Em um primeiro momento essa medição foi feita com o secador em vazio nos dias 30 e 31 de janeiro e 27 e 28 de fevereiro, juntamente com radiação em cada hora dos respectivos dias. Os dados obtidos com as temperaturas permitiram a elaboração dos gráficos, figura 5.2 e 5.3, e as radiações medidas correspondem a figura 5.4 e 5.6.

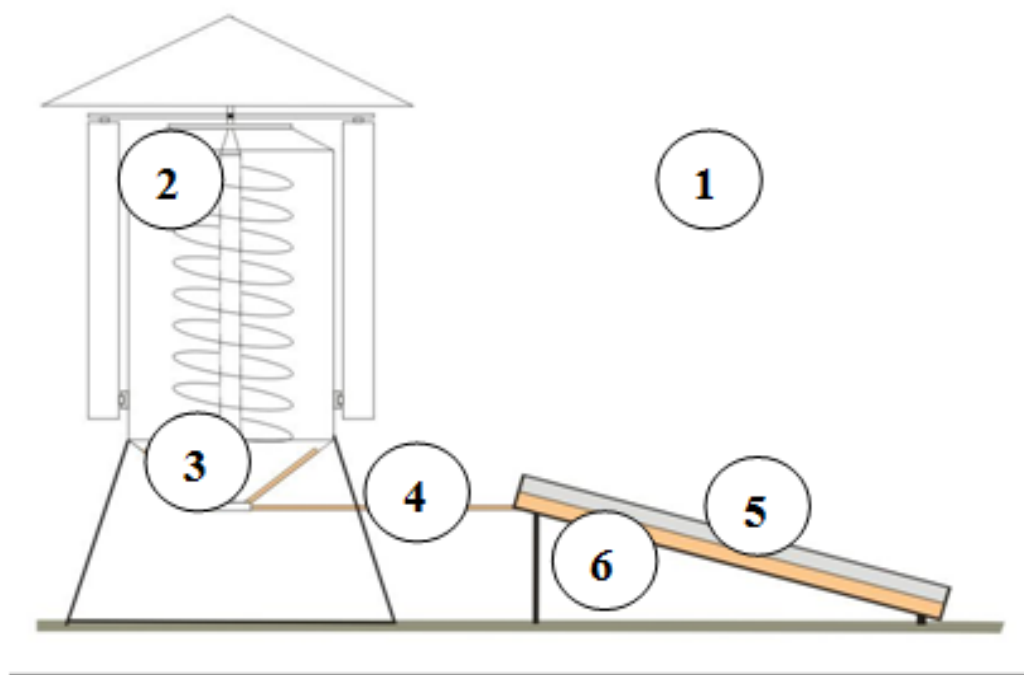


Figura 5.1: Pontos nos quais foram medidas as temperaturas

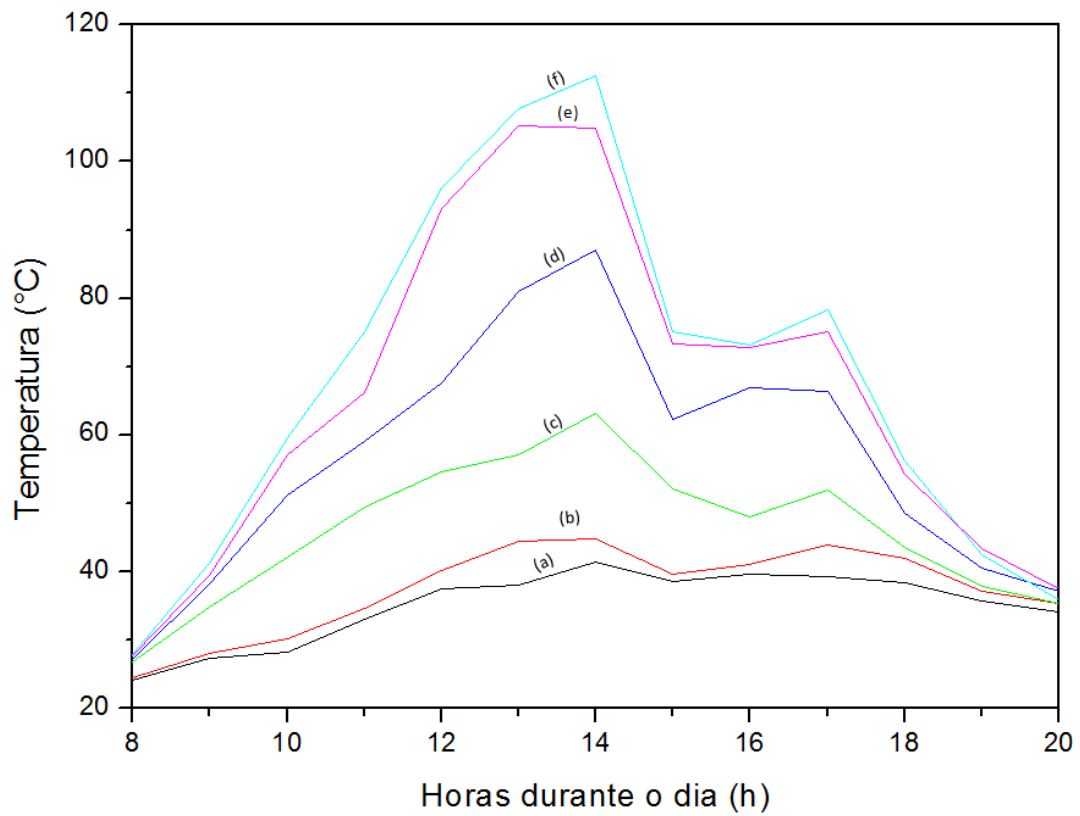


Figura 5.2: gráfico da temperatura em vazio no mês de janeiro. Os pontos no gráfico referem-se a figura 5.1: (a) ponto 1, (b) ponto 2, (c) ponto 3, (d) ponto 4, (e) ponto 5 e (f) ponto 6.

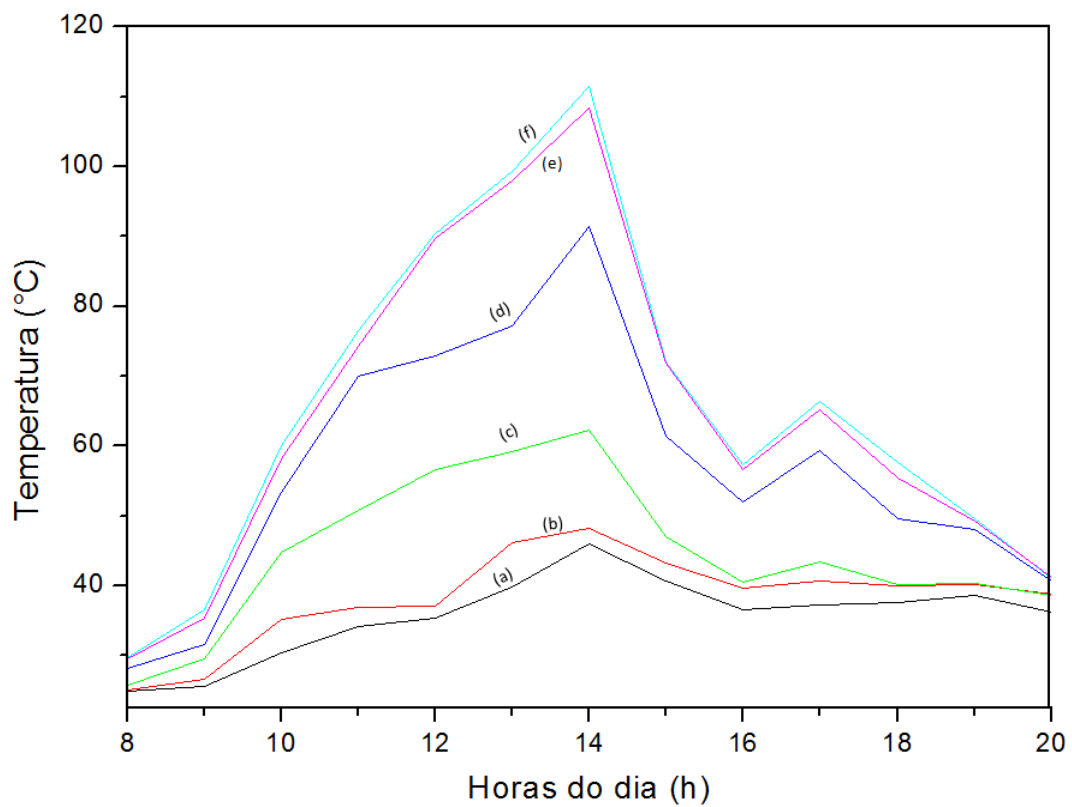


Figura 5.3: gráfico da temperatura em vazio no mês de fevereiro. Os pontos no gráfico referem-se à figura 5.1, (a) ponto 1, (b) ponto 2, (c) ponto 3, (d) ponto 4, (e) ponto 5 e (f) ponto 6.

As medidas da radiação incidente nas placas foram realizadas no mesmo período com o luxímetro.

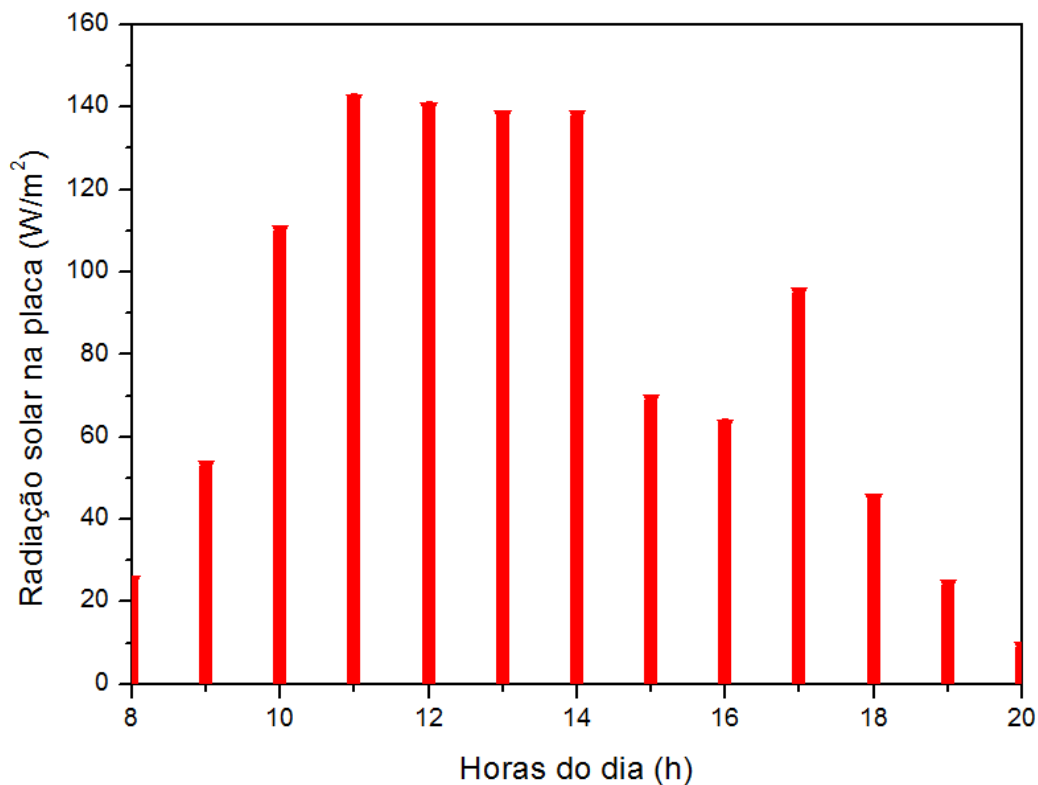


Figura 5.4: gráfico da radiação solar recebida na placa em um dia do mês de janeiro.

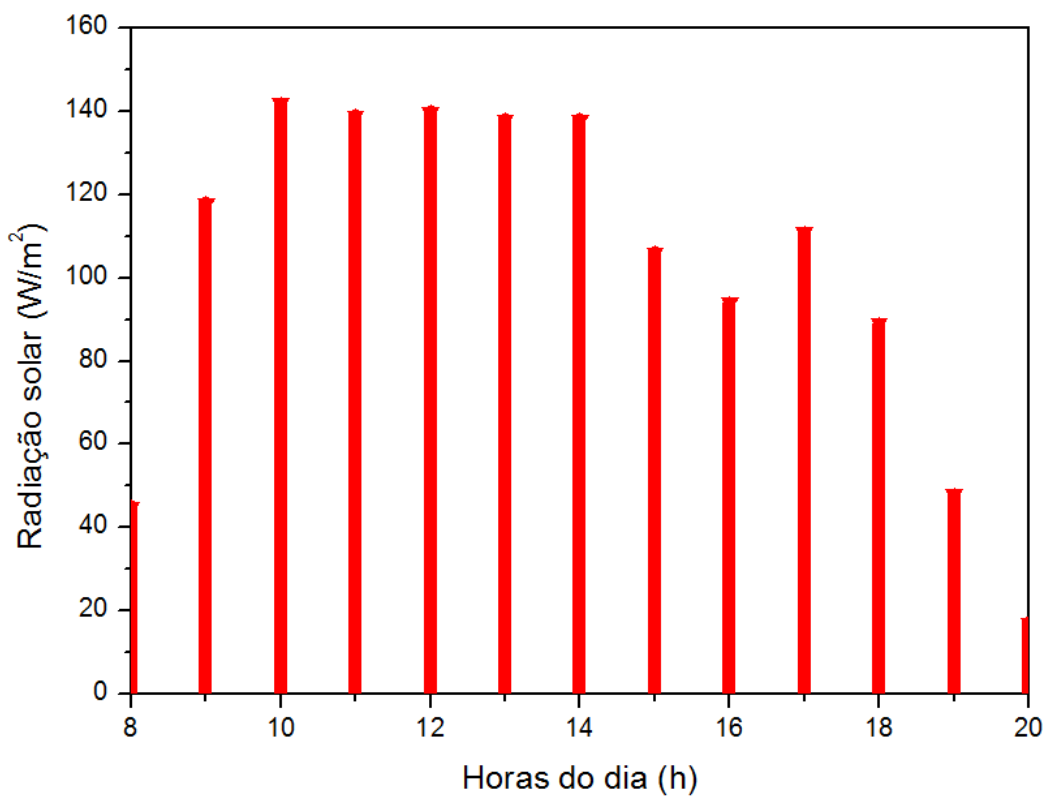


Figura 5.5: gráfico da radiação solar recebida na placa para um dia do mês de fevereiro.

A velocidade de giro das pás do revolvedor vazio neste período foi de, em média, 8 Km/h durante um período de 3 horas, tendo um pico de 11,6 Km/h. Esses dados foram observados em janeiro e fevereiro.

5. 2 Dados de temperatura, radiação incidente e velocidades do Secador Com Biomassa

5.2.1 Secagem de Casca de Arroz

A primeira biomassa a ser testada foi a casca de arroz, essa por sua vez tem sua origem como base seca, entretanto, estava armazenada ao ar livre exposta as intempéries. Esta particularidade fez com que a biomassa possuísse inicialmente 44% de umidade, também chamada nestes casos de água livre.

A verificação da secagem foi iniciada utilizando casca de arroz com a coleta em três pontos distintos do secador, uma na saída e duas através da parte superior do silo utilizando o instrumento mostrado na figura 3.12. A umidade de cada amostra foi verificada separadamente e o resultado das três formou uma média final para cada dia de coleta. O tempo de secagem para essa biomassa foram cerca de 20 dias, período transcorrido durante o mês de março, chegando à umidade final na casca de arroz a 12%, valor que permite a mesma ser briquetada.

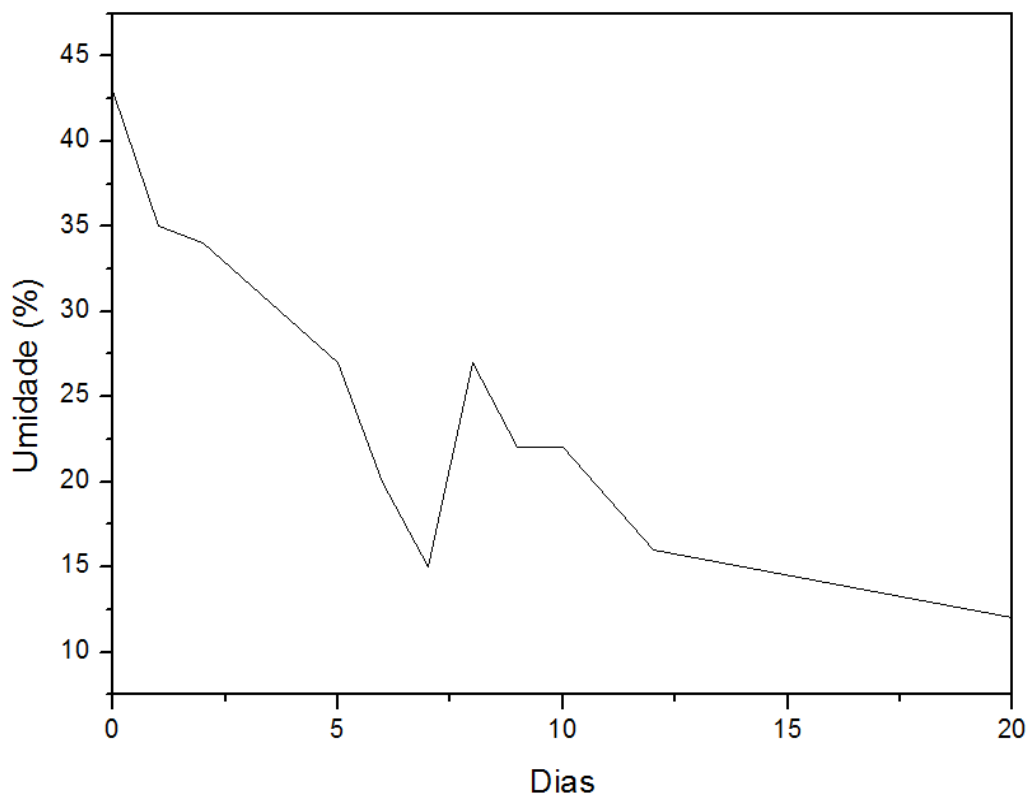


Figura 5.6: gráfico que mostra a perda de umidade da casca de arroz no secador durante o tempo secagem

Através dos dados fornecidos pelo INMET, para localização de Bagé, foi possível fazer uma comparação durante o processo de secagem da umidade da casca de arroz com a umidade ambiente média e umidade ambiente hora, conforme a figura 5.7. A umidade média do ambiente é uma média das umidades durante cada dia de secagem e a umidade hora é o valor obtido no momento da coleta da amostra no secador.

A figura 5.7 mostra a umidade da biomassa no secador com um comportamento inferior as umidades ambiente hora e média, entretanto, a variação da umidade da casca de arroz é mais semelhante ao movimento da umidade ambiente média. Essa característica permite constatar em um primeiro momento, a relação da umidade ambiente com o processo de secagem do material depositado dentro do secador além da temperatura do ar aquecido.

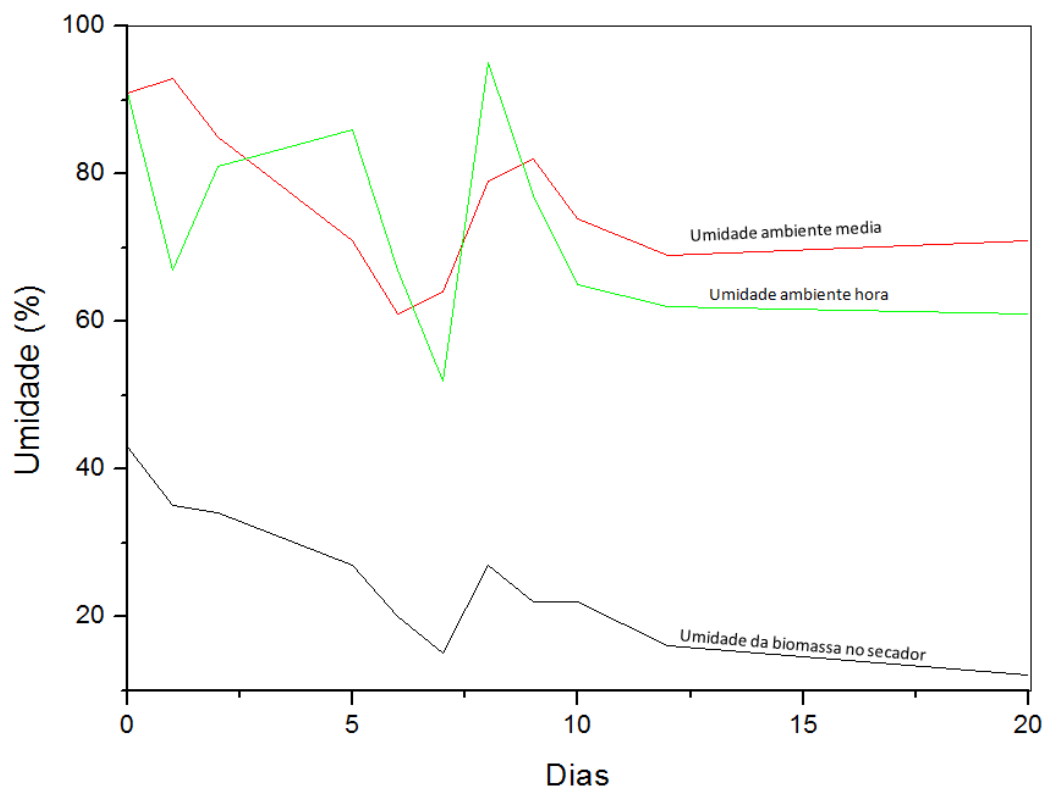


Figura 5.7: gráfico das umidades do secador durante a secagem da casca de arroz e da umidade ambiente média e umidade ambiente hora

A movimentação das pás durante a secagem da casca de arroz ocorreu apenas nos primeiros dias, durante a acomodação do material dentro do silo. As temperaturas apresentadas durante um dia de secagem da casca de arroz no mês de abril são mostradas na figura 5.8 nos pontos definidos anteriormente e foram realizadas com o sistema de revolvimento parado.

O gráfico 5.8 demonstra que a temperatura no ponto 3 (c), câmara de distribuição do ar no silo, é superior a temperatura do ponto 1 (a), temperatura ambiente, pode-se observar que a diferença entre ambas permanece entre 10°C durante o crescimento da temperatura na placa, ponto 5 (e) e ponto 6 (f), entretanto, esse comportamento não reflete nos entre o ponto 2 (b) e o ponto 3(c). A temperatura máxima no equipamento ocorreu no ponto 5 (f), chegando a 83°C no momento que a

temperatura ambiente, ponto 1 (a), estava a 30°C, um aquecimento de 53°C obtidos na placa frente à temperatura externa.

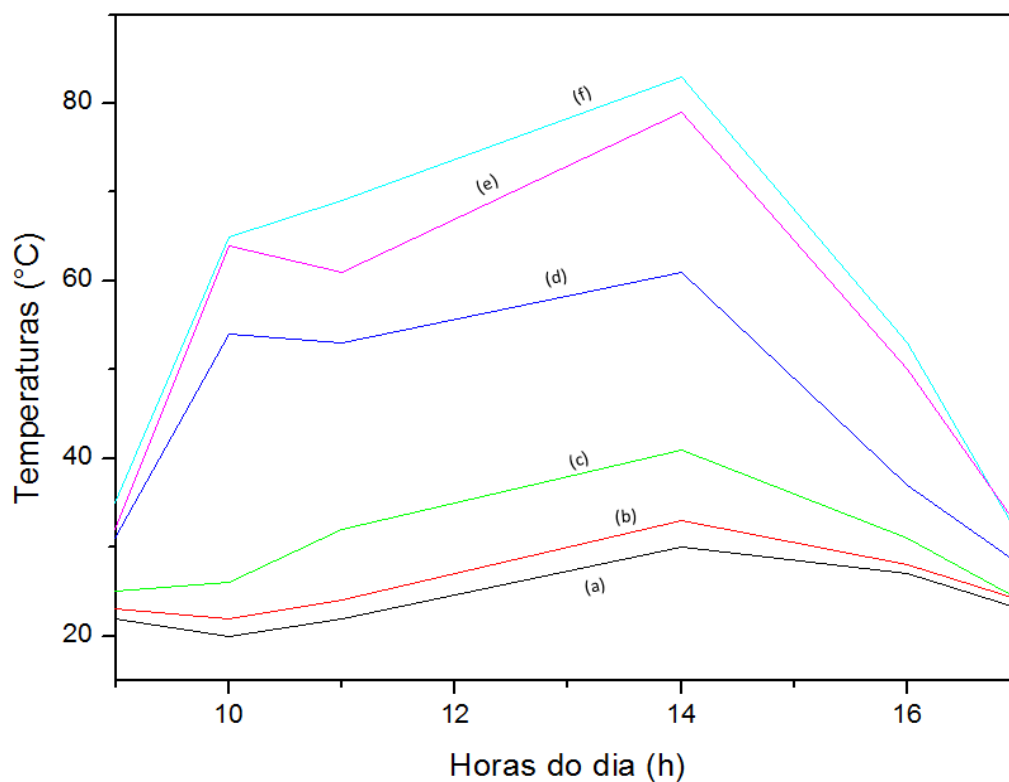


Figura 5.8: gráfico da temperatura do secador com casca de arroz. Os pontos no gráfico referem-se à figura 5.1, (a) ponto 1, (b) ponto 2, (c) ponto 3, (d) ponto 4, (e) ponto 5 e (f) ponto 6.

Após os 20 dias de secagem, todos transcorridos durante o mês de maio, foi retirada a casca de arroz do silo e constatou-se que no interior havia regiões próximas ao centro do equipamento com alto teor de umidade na biomassa, vinculada possivelmente a falha do sistema de movimentação do secador.

A radiação solar recebidas pelas placas durante um dia de secagem da casca de arroz pode ser observada na figura 5.9. Essa radiação solar corresponde a energia que originou, nas respectivas horas do dia, as temperaturas da figura 5.8. As variações do comportamento da radiação solar foram ocasionadas normalmente pelo surgimento de

nuvens, fazendo com que o máximo de radiação ocorra em horários onde o Sol possua uma inclinação maior com relação às placas de aquecimento do ar.

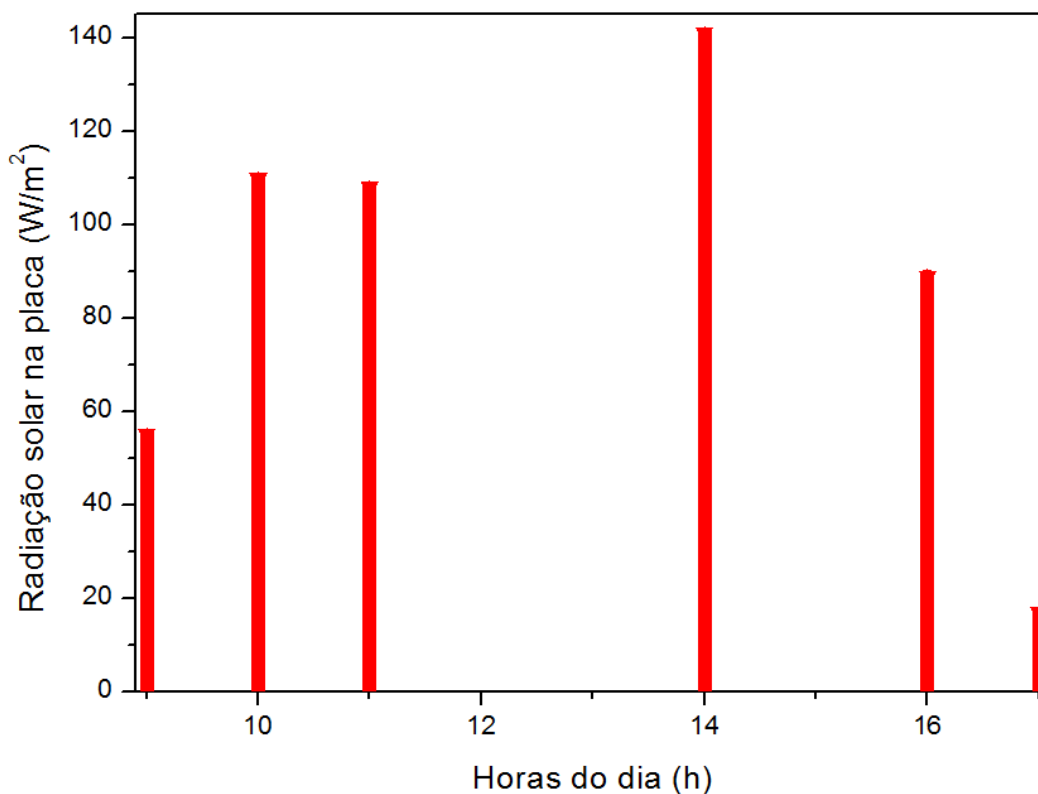


Figura 5.9: gráfico da radiação solar recebida na placa em algumas horas do dia durante a secagem da casca de arroz.

5.2.2 Secagem do Cavaco

O cavaco apresentou inicialmente 48% de umidade, embora sendo uma biomassa de base seca, seu armazenamento era sem cobertura, vulnerável a chuvas e intempéries. A secagem do cavaco foi igualmente realizada a da casca de arroz e suas amostras coletadas da mesma forma em três pontos. As amostras foram verificadas quanto as suas umidades separadamente seguidas de uma média final para o dado da referida coleta. O tempo de secagem para essa biomassa foram cerca de 15 dias chegando à umidade final no cavaco a 12%, porcentagem necessária para briquetagem.

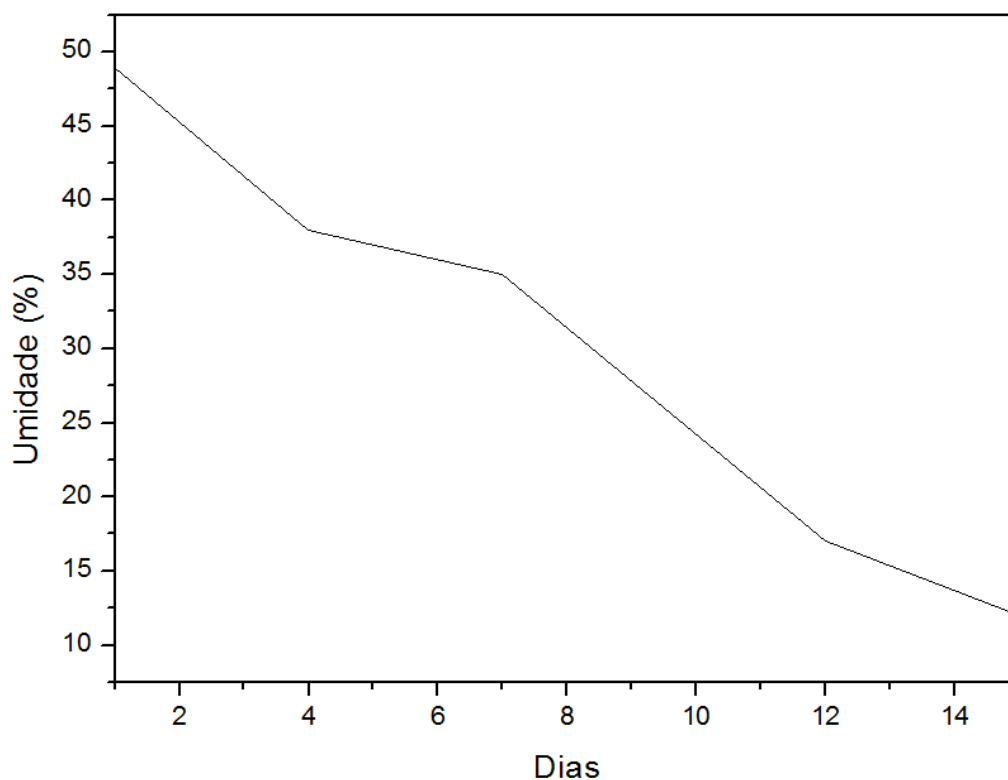


Figura 5.10: gráfico que mostra a variação de umidade do cavaco no secador durante o tempo secagem

Da mesma forma que a casca de arroz a variação da umidade do cavaco no interior do secador pode ser visualizada, figura 5.11, juntamente com as alterações que a umidade ambiente, tanto média quanto hora, manifestaram durante os dias de secagem. O comportamento da umidade do cavaco acompanha em quase todo o período de secagem a variação que a umidade ambiente média apresenta. Situação muito semelhante à secagem da casca de arroz, embora a umidade do cavaco seja mais simétrica com a umidade ambiente média do que a biomassa anterior, a casca de arroz.

O cavaco possui uma granulometria muito irregular, conforme visto na figura 3.10, indo de ínfimos pedaços até tamanhos de 5 cm de comprimento. Essa característica fez com que o sistema de movimentação não funcionasse novamente,

trancando a rosca central na parte inferior do silo próximo a saída de biomassa. No entanto, essa peculiaridade pode ajudar a circulação de ar entre a biomassa, o que pode ter colaborado com um processo de secagem mais curto que a casca de arroz, amenizando a falha no revolvimento do cavaco.

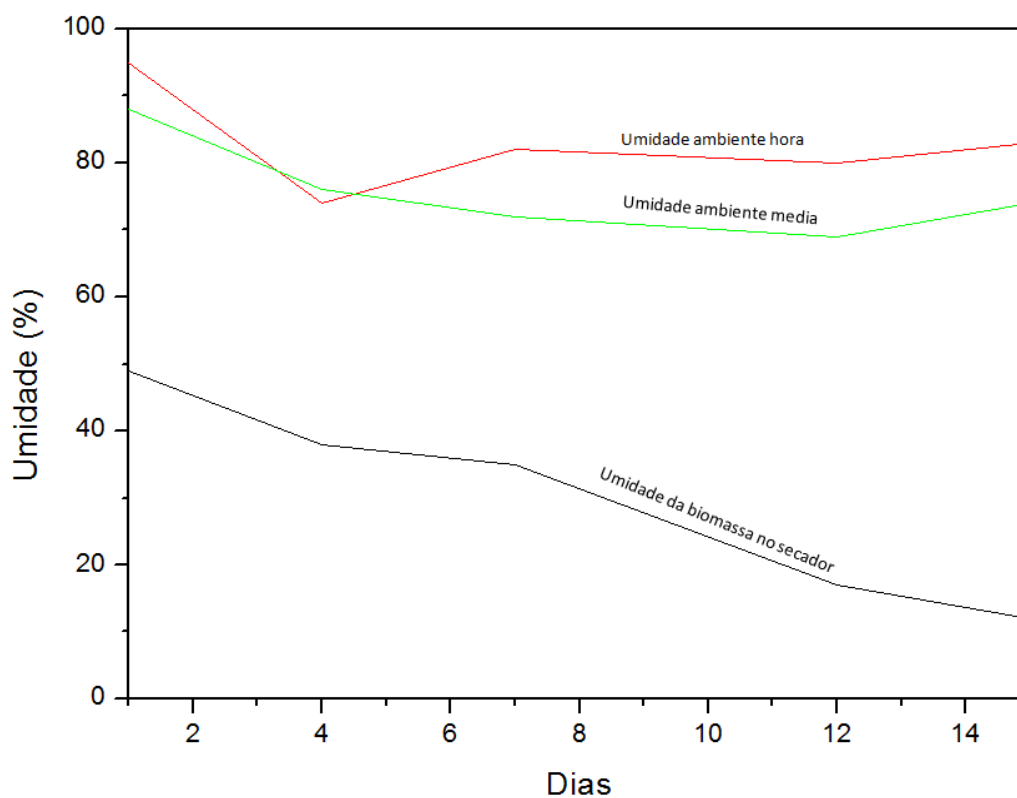


Figura 5.11: gráfico das umidades do secador durante a secagem do cavaco e da umidade ambiente média e umidade ambiente hora

A figura 5.12 mostra as temperaturas coletadas em um dia de secagem do cavaco no mês de abril, os pontos de medida são os definidos na figura 5.1 e foram realizados com o equipamento de movimentação parado.

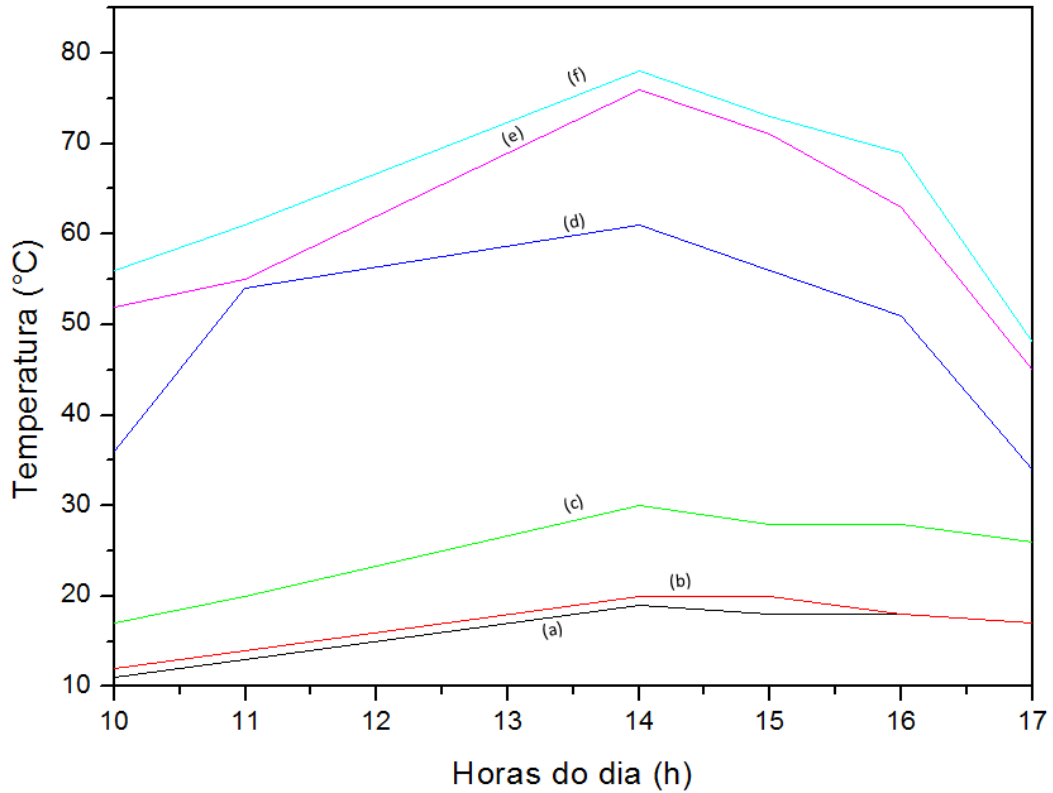


Figura 5.12: gráfico das temperaturas do secador com cavaco. Os pontos no gráfico referem-se à figura 5.1, (a) ponto 1, (b) ponto 2, (c) ponto 3, (d) ponto 4, (e) ponto 5 e (f) ponto 6.

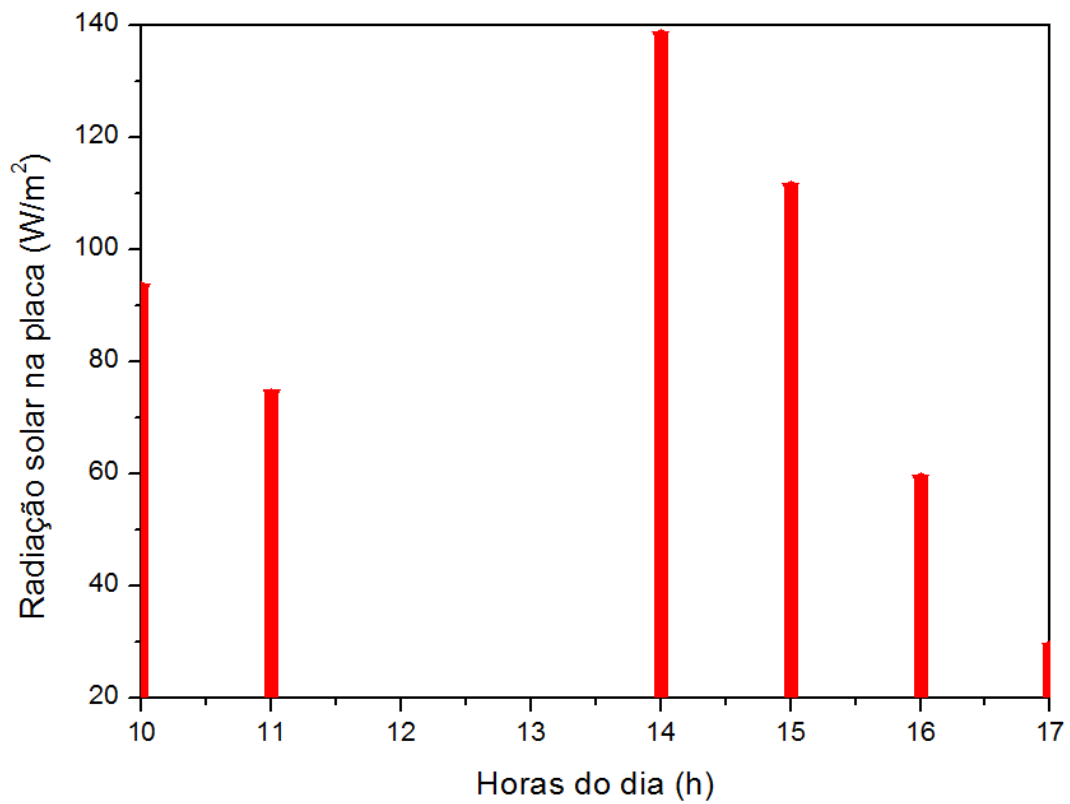


Figura 5.13: gráfico da radiação solar recebida na placa para algumas horas do dia durante a secagem do cavaco.

As temperaturas dos pontos 1 (a) e 3 (c) tiveram uma diferença de aproximadamente de 9°C durante o tempo medido, comportamento análogo ao da casca de arroz, já a temperatura no topo (b) do silo ficou próxima a temperatura ambiente, mantendo praticamente a mesma diferença entre (a) e (b). Com relação às radiações medidas durante a coleta das temperaturas, as mesmas constituíram o gráfico da figura 5.13. Com o término da secagem sinalizada através dos 12% de umidade necessária para briquetagem, o cavaco foi retirado do equipamento apresentando, novamente, região na parte central do cilindro com índice alto de umidade na biomassa, possivelmente oriunda da ausência de movimentação do aparato responsável pelo revolvimento.

Fenômenos de diferenças de temperatura como os mencionado anteriormente juntamente com o fato da temperatura no ponto 6 (f) e no ponto 5 (e) serem relativamente altas para o restante dos pontos, indicam uma perda de energia em algum local do equipamento, mesmo considerando a volatilidade térmica do ar durante o percurso interno do secador solar. Na busca de uma melhorar análise térmica do equipamento para determinar possíveis perdas de calor foi estipulado mais dois pontos de coleta para outra medição (figura 5.14), ponto * no centro do silo e o ponto ** na entrada do ar nas placas de aquecimento.

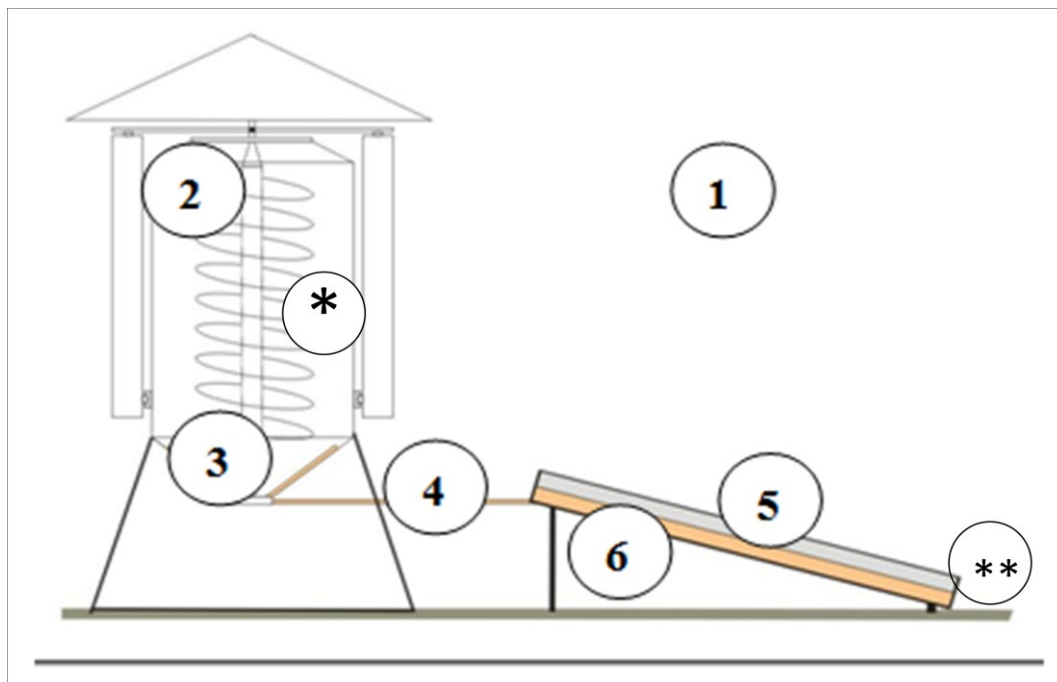


Figura 5.14: definição dos pontos para obtenção da temperatura com adição de dois novos pontos: ponto* no meio do cilindro e ponto** na entrada do ar nas placas de aquecimento

5.2.3 Secagem de Arroz com casca

O arroz com casca é a terceira biomassa colocada para secar no equipamento. Esta por sua vez não possui a finalidade de briquetagem por se tratar de um grão destinado para alimentação. A escolha do arroz para secagem foi determinada por três fatores, o primeiro, a necessidade de testar o secador com uma biomassa que possui água ligada na sua estrutura, normalmente chamada de biomassa verde, tendo em vista uma granulometria uniforme e de fácil escoamento. O segundo foi a grande disponibilidade do material na região, proporcionando seu acesso com maior facilidade. E por fim, a possibilidade de utilizar o secador solar na área de secagem de grãos.

A biomassa depositada no silo tinha inicialmente 14% de umidade na sua estrutura, tendo em vista que depois de colhida na lavoura foi depositada em sacos

plásticos e armazenada em local seco, sem exposição a intempéries. A secagem foi verificada da mesma forma que os dois outros testes com coleta em três pontos para uma média final. O tempo de secagem para o arroz com casca foi de 27 dias alcançando um valor de umidade em torno de 10%. O comportamento da umidade durante a secagem do arroz com casca e a relação com a umidade ambiente podem ser visualizados na figura 5.15.

A variação da umidade que o arroz com casca sofre durante o período de secagem frente à umidade ambiente, conforme figura 5.16, foi mais estável que as biomassas testadas anteriormente. Enquanto a umidade ambiente oscilou percentuais consideráveis, ficando entre 70 a 95%, o arroz se manteve em declínio, ignorando uma possível relação entre ambos.

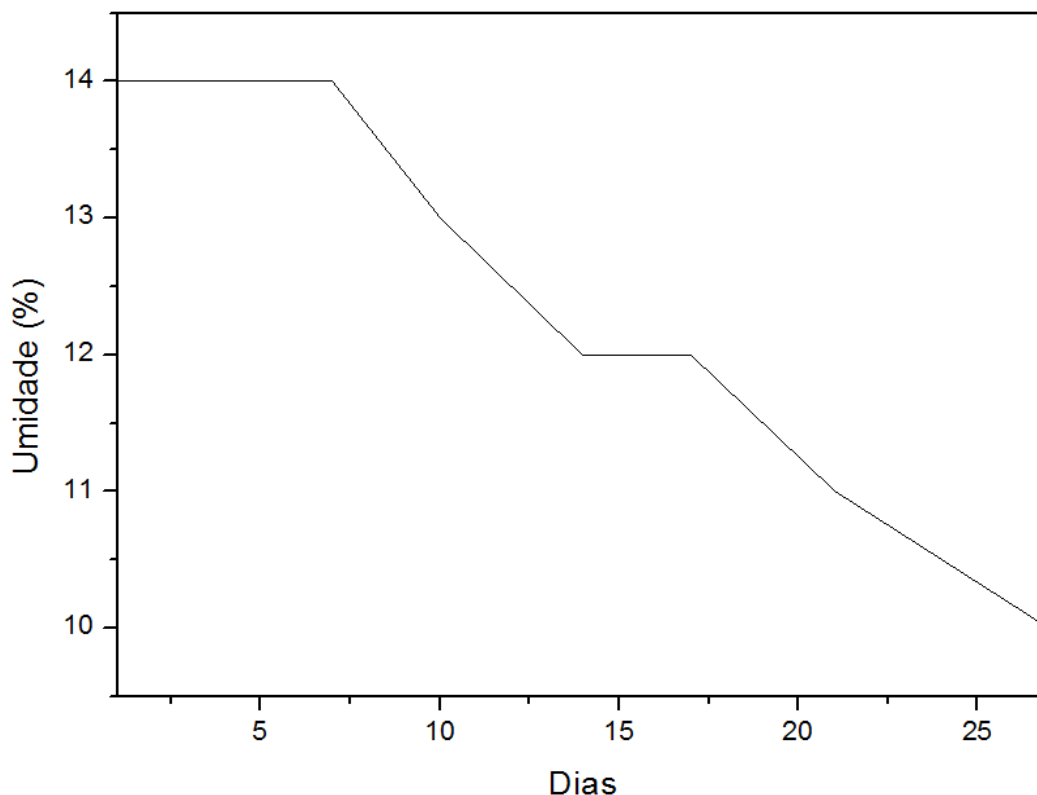


Figura 5.15: gráfico que mostra a variação de umidade do arroz com casca no secador durante o tempo de secagem

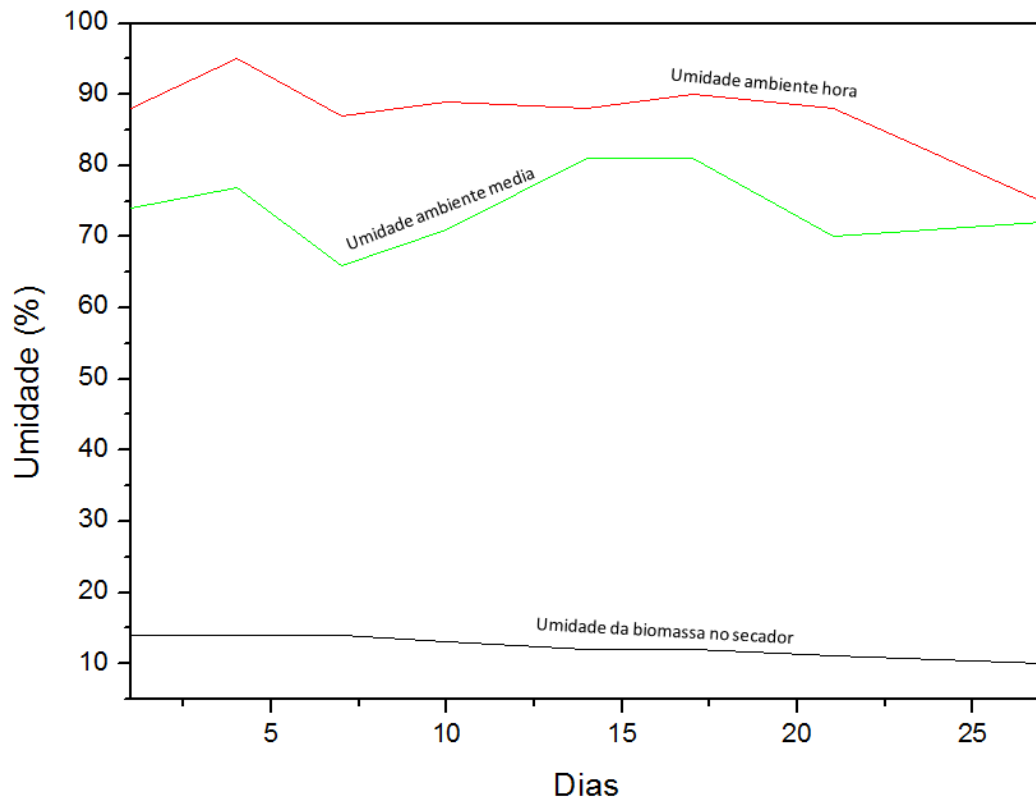


Figura 5.16: gráfico das umidades do secador durante a secagem do arroz com casca e da umidade ambiente média e umidade ambiente hora

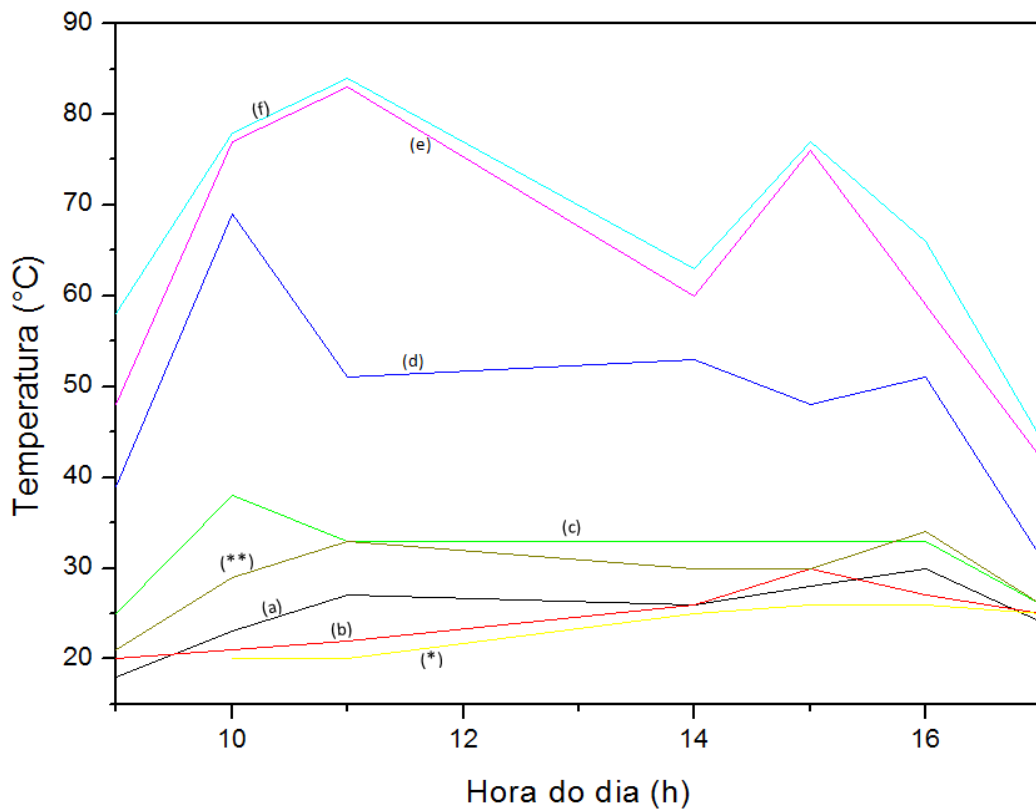


Figura 5.17: gráfico das temperaturas do secador com arroz com casca. Os pontos no gráfico referem-se à figura 5.1, (a) ponto 1, (b) ponto 2, (c) ponto 3, (d) ponto 4, (e) ponto 5 e (f) ponto 6, com adição de dois novos pontos, ponto* no meio do cilindro e ponto** na entrada do ar nas placas de aquecimento

Conforme mencionado anteriormente, foram adicionados dois novos pontos para obtenção de temperatura no secador solar. A princípio, os pontos tradicionais apresentaram uma oscilação da temperatura entre si semelhante aos comportamentos anteriores relativos às biomassas testadas anteriormente, como por exemplo, a diferença da temperatura ambiente (a) e a temperatura na câmara de ar aquecido no silo (c).

A única temperatura que divergiu foi no ponto 2 (b), que ficou abaixo da ambiente (a) na maior parte do período de teste. Os pontos adicionais, no entanto, evidenciaram comportamentos excêntricos, no ponto (*) localizado no centro do silo, a temperatura não ultrapassou a ambiente (a) em nenhum momento do dia. O ponto (**) na entrada de ar das placas teve temperaturas bem acima das esperadas e sua oscilação foi aproximadamente igual à temperatura ambiente.

A temperatura máxima que as placas atingiram durante o dia de medição foi 84°C no ponto 5 (f), tendo uma temperatura ambiente de 27°C no ponto 1 (a), uma diferença de 57°C entre ambas.

A radiação recebida pelas placas durante um dia de secagem do arroz pode ser visualizada para algumas horas do dia através da figura 5.18, que mostra um comportamento oscilatório devido a ocorrência de nuvens durante a medição da temperatura das placas.

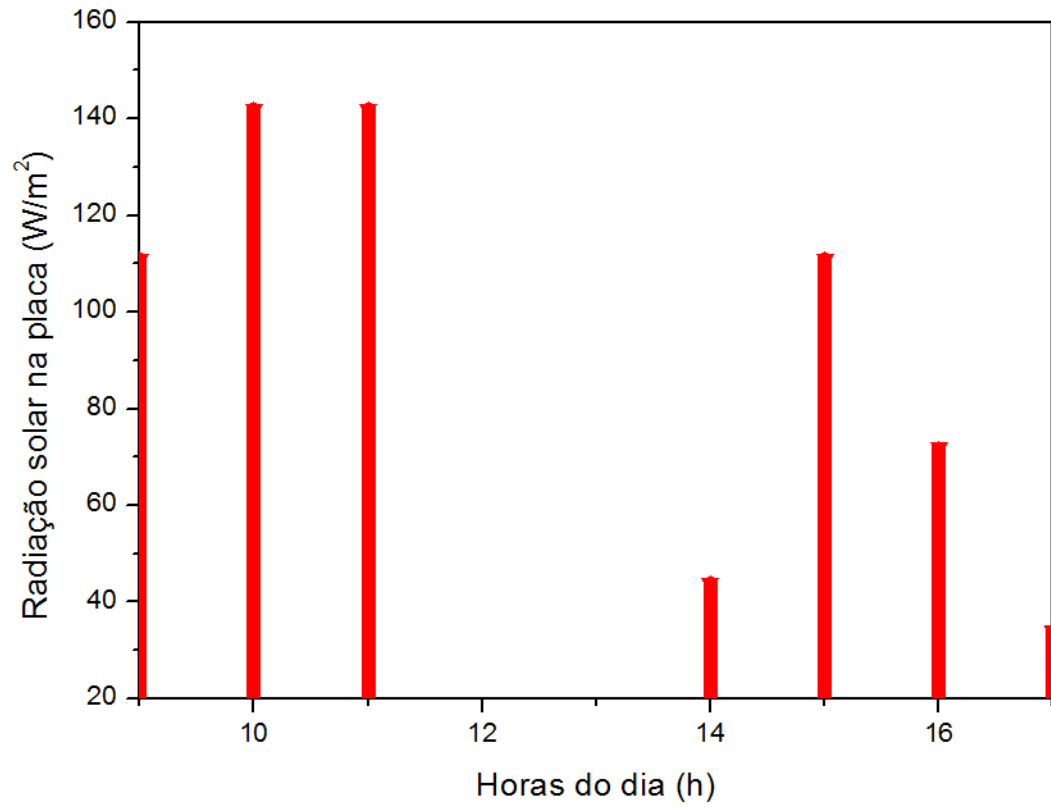


Figura 5.18: gráfico da radiação solar recebida na placa para algumas horas do dia durante a secagem do arroz com casca.

6 DISCUSSÃO

Confrontando as temperaturas do secador solar vazio com as obtidas carregado das três biomassas é possível perceber que o gradiente de temperatura entre os pontos medidos no equipamento é bem maior quando o mesmo está sem carga. Entretanto, essas temperaturas em vazio são mais instáveis durante as horas do dia, possivelmente, por não ter nenhum obstáculo para o ar aquecido, permitindo que o fluido quente ultrapasse o secador rapidamente. Outra possibilidade de temperaturas mais altas é o fato das medidas em vazio terem ocorridas no período mais quente do ano, nos meses de janeiro e fevereiro, onde também existe maior incidência e mais horas de Sol. O comportamento das temperaturas e a radiação recebida em vazio permite visualizar o potencial energético do painel, mesmo possuindo um fluido instável e barreiras no seu trajeto, atingindo na câmara de aquecimento, ponto 6, valores de temperatura acima de 100°C em determinados momentos.

O comportamento das temperaturas do secador solar carregado mostrou que o aquecimento das placas é maior que a capacidade de passagem do ar aquecido na biomassa, o que promoveu um maior tempo de contato do fluido aquecido com as paredes metálicas da câmara de distribuição de ar no silo. Este fenômeno ocasiona uma troca de calor com a estrutura, que por sua vez troca calor com o ambiente, em outras palavras, os pés do silo que são acoplados a câmara de distribuição de ar funcionaram como aletas em um dissipador de calor, pois permitiam a passagem do ar ambiente ao mesmo tempo em que mantinham um contato com as paredes aquecidas do secador devido capacidade de circulação do ar entre a biomassa ser pequena.

A baixa circulação do ar entre a biomassa, mencionada anteriormente, também proporcionou o aumento da temperatura na entrada de ar das placas, como pode ser visto na figura 5.16 no ponto (**), fazendo com que acontecesse um movimento contrário do ar aquecido dentro dos painéis, ao invés de somente subir, o ar aquecido também saia por uma das entradas das placas.

Quanto à movimentação do sistema de revolvimento do secador, na condição de vazio, foi possível constatar um bom desempenho do equipamento, obtendo velocidades consideráveis e por diversos períodos de tempo ao longo dos meses que o silo ficou descarregado. Este comportamento é de fácil compreensão, devido à ausência de atrito entre a rosca nua e a biomassa, o que deixa o eixo mais leve, permitindo que aconteça o movimento das pás até mesmo com ventos não muito fortes.

A movimentação do mecanismo de revolvimento com o secador carregado de biomassa não apresentou um funcionamento satisfatório, ficando praticamente a maior parte do período de secagem, independente da biomassa, sem deslocamento algum. Comportamento esse, que provocou uma secagem não uniforme dos materiais propostos, segundo SILVA; DONZELLES; CORRÊA (2008, p 117), é denominado de processo estático, onde o produto não é movimentado durante o processo e observam-se as três regiões distintas na massa de grãos, conforme na figura 2.7(a), o que colabora para explicação das regiões encontradas no centro do silo com umidades elevadas.

A proporção destas regiões variou no secador de acordo com a biomassa, o cavaco por ser menos uniforme que as demais, permitiu que houvesse uma maior circulação de ar no interior do silo, o que contribuiu para uma menor área úmida e um período de secagem inferior, levando em conta que o mesmo possuía o percentual de

umidade superior às outras biomassas. Um comparativo entre os gráficos de umidade durante a secagem da casca de arroz e do cavaco mostra que o comportamento da casca é mais oscilatório, essa postura tem dois possíveis motivos, o primeiro seria a suscetibilidade da casca de arroz à umidade ambiente média, sendo que ambas apresentaram uma variação semelhante durante o tempo de secagem conforme a figura 5.7. O segundo seria a coleta das amostras em pontos distintos do silo e a existência de regiões de biomassa com taxas de umidade altas, conforme mencionado anteriormente.

As temperaturas obtidas com o arroz apresentaram um comportamento de isolamento térmico maior que as demais biomassas verificadas, o que acarretou um obstáculo a mais para a secagem do grão no interior do silo, segundo Park, A.; Oliveira; Park; (2007, p 11), uma camada de 1 cm de espessura de trigo tem uma capacidade equivalente a 9 cm de concreto, podendo isolar 1°C a cada 10 cm de profundidade.

O arroz com casca não demonstrou sensibilidade as variações externas da umidade ambiente, diferentes das demais biomassas, essa característica pode estar vinculada ao fato da biomassa ser da base úmida, também chamada de água ligada. Para Antonio (2006, p 4), é a água que faz parte da estrutura do material, ligada a proteínas, açúcares e adsorvida na superfície de partículas coloidais, e necessita de níveis elevados de temperatura para sua remoção. Como durante o período exposto do arroz, as temperaturas não foram altas, a perda dessa umidade foi mais lenta que as outras.

Os diferentes tamanhos, texturas e formas das biomassas também contribuíram de forma negativa no funcionamento da movimentação interna da biomassa, pois as características dos materiais testados foram bem distintas, impedindo o escoamento da

biomassa para rosca nua. Esta dificuldade esta associada ao ângulo de repouso do material que determina o volume do cone inferior do silo, por exemplo. A construção de um silo envolve muitos detalhes na elaboração de seu projeto, uma questão fundamental é o ângulo de repouso estático e o dinâmico que cada material a ser utilizado no silo possui e sua variação depende da geometria, tamanho, superfície lisa e umidade do grão, segundo Park, A.; Oliveira; Park; (2007, p 11).

CONCLUSÃO

Em termos gerais, o presente trabalho foi de fundamental importância para a formação do profissional de engenharia, possibilitando aplicar não somente os conhecimentos adquiridos nas disciplinas desenvolvidas durante o curso de Engenharia de Energias Renováveis e Ambiente, mas gerenciar um projeto desde a concepção da idéia, passando pela viabilidade e construção, finalizando com a análise dos resultados obtidos.

Os dados obtidos demonstraram viabilidade do projeto com relação à estrutura do secador, pois o arranjo painéis/silo não influenciou significativamente nos resultados de forma negativa, entretanto, em termos de funcionamento existe a necessidade de aprimorar o mecanismo de revolvimento que utiliza o vento como fonte de energia. Uma sugestão para solucionar este problema, seria a colocação de engrenagens redutoras entre as pás e o eixo principal, diminuindo a força necessária para movimento da rosca nua. Contudo, o objetivo de secagem de biomassa foi atingido pelo protótipo no final de cada teste proposto, alcançando percentuais de umidade mínimos para expor a biomassa ao processo de briquetagem.

Uma dificuldade encontrada durante os testes foi a necessidade de diferentes inclinações no fundo do silo para o escoamento do material durante o revolvimento. Esta problemática tem origem na amplitude que o termo biomassa possui, abrangendo materiais com características muito distintas, o que exigiria um estudo na busca de um padrão aceitável para todos.

O teste com arroz foi importante, pois demonstrou a possibilidade de secagem de grãos no secador solar, viabilizando uma possível aplicação em propriedades de pequenos agricultores como uma forma de agregar valor aos seus produtos, auxiliar no armazenamento de alimentos ou ração para animais, entre outros, tendo em vista apenas o custo da implantação do sistema, não necessitando de uma rede elétrica para o funcionamento, o que geraria um custo maior e um possível problema de local da instalação.

A implementação da convecção forçada seria um fato que reforçaria a idéia de híbrido e auxiliaria significativamente na secagem da biomassa, tornando o secador mais competitivo para o mercado. A implantação deste processo se dá com a inclusão de um ventilador no duto principal para que o sistema seja por convecção forçada utilizando uma placa fotovoltaica para alimentar respectivo motor, etapa esta que não foi desenvolvida até o momento, ficando para um trabalho futuro.

Outra sugestão de aplicação para tecnologia utilizada no secador, como os painéis de aquecimento de ar e o sistema de movimentação, é em biodigestores que necessitem durante períodos frios de calor para proliferação das bactérias e de agitação da matéria orgânica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTENER. **Energia Solar Térmica – Manual sobre tecnologias, projetos e instalações**. Lisboa, 2004.

CORTEZ, Luiz Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva Lopes; GOMEZ, Edgardo Olivares. **Biomassa para Energia**. Editora da UNICAMP: Campinas, 2008.

FILIPPETTO, Daniele. **Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado**. Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de PGFEM. Curso de Planejamento de Sistemas Energéticos. UNICAMP: Campinas, 2008.

HINRICHS, Roger A.; KLEINBACH, Merlin. **Energia e Meio Ambiente**. 3 ed. Tradução: Flavio VICHI; Leonardo Freire de Mello. Cengage Learning: São Paulo, 2008.

INCROPERA, Frank P. [et al]. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. Tradução e revisão técnica Eduardo Mach Queiroz, Fernando Pessoa. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

JIMÉNEZ, José Manuel. **Ingenios Solares – Manual Prático para Construcción de Aparatos Sencillos Relacionados con la Energia Solar**. 3 ed. PAMIELA, Pamplona-Iruña, 1997.

MAYO, E; HORM, M; ESPINOZA, R. **Teoria y Practica del Secado Solar**. Centro de Energias Renovables (CER-UNI), Universidad Nacional de Ingeniería: Lima, Peru, 1991.

LUS, Iñaki y Sebastián Urkia. **Energía renovable práctica**. Ed Pamiela. Pamplona, 2003.

MORENO, Gamaliel. **Manual de Costrucción y Operación de una Secadora Solar**. Seminario de Proyectos II, ing. En Energía, UAM, Iztapalapa, 2006.

OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza; SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. **Astronomia & Astrofísica**. Editora da Física. São Paulo, 2004.

PALZ, Wolfgang. **Energia Solar e Fontes Alternativas**. Editora Hemus. Curitiba, 2002.

TIWARI, G.N. **Solar Energy – Fundamentals, design, Modelling and Applications**. Alpha science international LTD. New Delhi, 2008.

SOUSA E SILVA, Juarez de; DONZELLES, Sergio Mauricio Lopes; CORRÊA, Paulo Cesar. **Secagem e Secadores**. São Paulo, 2008.

ANEXO A

A Tabela A1 a seguir mostra os principais materiais utilizados, a quantidade e o valor pago. As compras foram realizadas no mês de junho de 2011 na cidade de Bagé. Em alguns casos existiu a possibilidade do material oriundo de sucata para diminuir os custos de projeto.

Tabela A1: lista de produtos para construção do secador solar

Material	Quantidade	Valor por unidade (R\$)	Valor total (R\$)
Chapa galvanizada 1x2 m	3 chapas	75,00	75,00
Cano de PVC 75 mm	1 barras	17,00	17,00
Tabua 5,5x0,1 m	2 unid.	5,00	10,00
Eletroduto 1 polegada	4 barras	10,00	40,00
Cantoneira 3/8	2 unid.	15,60	31,20
Cantoneira 1/8	1 unid.	33,00	33,00
Tinta	4 unid.	7,65	30,60
Curva eletroduto	2 unid.	4,00	8,00
Rosca sem-fim em aço	1 unid	35,00	35,00
Aros em alumínio	2 unid.	5,00	10,00
Vidro 4mm	1 m ²	42,00	42,00
Manta isolante	4 m ²	4,75	19,00
Parafusos	----	----	24,50
Rebites	----	----	36,00
		Total aproximado	411,00