



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJECTO DE CURSO

Tema:

Projecto de uma Estufa Solar para Secagem de Frutas



Autor:

Licumba, Firmino Jossefa

Supervisor:

Prof. Dr. Eng.º Jorge Nhambiu

Maputo, Agosto de 2009

ÍNDICE	PÁG.
AGRADECIMENTOS.....	4
RESUMO.....	5
1. INTRODUÇÃO.....	6
2. OBJECTIVOS.....	8
2.1 Objectivos Gerais.....	8
2.2 Objectivos Específicos.....	8
3. FORMAS DE APROVEITAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR DIRECTA.....	9
3.1 Aplicações Térmicas.....	9
3.1.1 Aplicações térmicas mais difundidas:.....	10
4. CONSTRUÇÃO DA ESTUFA.....	11
4.1 Materiais.....	11
4.2 Fases de construção.....	11
5. ESTUFA SOLAR.....	14
5.1 Resumo teórico.....	14
5.2 Tipos de estufas.....	16
5.3 Descrição da estufa solar.....	17
6. MISTURA AR-VAPOR DE ÁGUA.....	21
6.1 Humidade absoluta e humidade relativa.....	21
6.2 Ponto de orvalho (<i>dew point</i>) do ar.....	22
7. PROJECCÃO DA ESTUFA.....	25
7.1 Cálculo da declinação da terra em relação ao equador.....	25
7.2 Cálculo de número de horas de sol numa localidade.....	25
7.3 Ângulo da hora do nascer do sol.....	26
7.4 Ângulo de Zénite.....	26
7.5 Inclinação do vidro (λ).....	26
7.6 Ângulo de incidência do sol no vidro da estufa.....	26
8. TESTE DA ESTUFA.....	27
8.1 Resultados obtidos.....	27

9. ANÁLISE ECONÓMICA DO PROJECTO	34
9.1 Custo do material	34
10. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	35
10.1 Conclusões.....	35
10.2 Recomendações.....	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38
ANEXOS.....	39

Lista de símbolos

D_h — dimensão característica ou diâmetro hidráulico;

h — coeficiente de transferência de calor por convecção;

K — condutibilidade térmica;

N_u — número de Nusselt;

P_r — número de Prandl;

ν — viscosidade cinemática;

σ — Constante de Stefan-Boltzman; $\sigma = 5,675 \cdot 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ K}^4$;

δ — declinação solar;

ϕ — latitude;

λ — inclinação do colector;

Lista de Figuras

Figura 1. Caixa da estufa.....	12
Figura 2. Bandeja.....	13
Figura 3. Estufa para secagem de frutas.	13
Figura 4. Estufa Solar.	18
Figura 5. Câmara de secagem.....	19
Figura 6. Psicrómetro giratório.....	23
Figura 7. Temperatura de ponto de orvalho e bolbo húmido.	24

Lista de Tabelas

Tabela 1: Tipos de secadores mais adequados à desidratação.	17
Tabela 2. Custo do material.....	34

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Eng.º Fabião Cumbe pela proposta do tema e também ao Prof. Dr. Eng.º Jorge Nhambiu pelo acompanhamento durante a realização do projecto.

À Dr.^a Eng.^a Maida Khan por ter disponibilizado os materiais usados na construção da estufa, e a Sr.^a Regina do laboratório de Engenharia Química.

Agradeço ao Sr. João da carpintaria da Faculdade de Engenharia e toda a sua equipa de trabalho por terem ajudado na construção da estufa.

Agradeço também aos meus colegas pelo apoio moral durante a realização do projecto, ao corpo de docentes do Departamento de Engenharia Mecânica e a todos que directa ou indirectamente contribuíram para a minha formação académica.

RESUMO

A desidratação é uma das técnicas mais antigas de preservação de alimentos utilizadas pelo homem. O processo é simples e consiste na eliminação de água de um produto por evaporação, com transferência de calor e massa.

Tradicionalmente os alimentos eram colocados no solo, nos tectos das habitações ou em tabuleiros, os quais recebiam radiação directa do sol. Os alimentos ficavam expostos às intempéries, às poeiras e aos insectos, o que não favorece a qualidade do produto. Para resolver esse problema foram desenvolvidas técnicas para secagem dos produtos, de modo a preservar a sua qualidade.

O processo de secagem pode envolver três meios de transferência de calor: convecção, condução e radiação. A transferência de calor por convecção é o meio mais utilizado na secagem comercial, em que um fluxo de ar aquecido passa através da camada do produto. Durante o processo de secagem, a humidade migra do interior para a superfície do produto, de onde se evapora para o ambiente. O ar também serve como veículo para transportar a humidade removida para o ambiente.

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho encontra-se dividido em dez capítulos. O primeiro capítulo consiste nos objectivos gerais e específicos do trabalho. O segundo aborda as formas de aproveitamento da radiação solar directa. O terceiro trata da construção da estufa. O seguinte, faz uma revisão bibliográfica sobre estufas solares no geral e uma descrição da estufa projecta. O quinto discorre sobre as propriedades da mistura ar-vapor de água. O sexto trata da projecção da estufa e no sétimo capítulo é ilustrado o teste realizado à estufa e apresentada a análise dos resultados obtidos. E no último capítulo apresentam-se as conclusões e recomendações para melhoria do projecto.

No presente projecto é realizado o dimensionamento e construção de uma estufa solar de convecção natural para secagem de frutas, onde as frutas são expostas directamente à insolação dentro de uma caixa com uma certa inclinação em relação ao sol, com um vidro transparente e aberturas para entrada de ar seco e remoção de ar húmido. Nestes modelos de estufas de exposição directa, os alimentos ficam expostos numa caixa de efeito estufa com fundo preto.

O ar aquecido é movido por convecção natural na câmara de secagem, onde as frutas se encontram expostas à radiação solar. Na câmara de secagem a passagem da corrente de ar faz-se no sentido vertical (debaixo para cima) através das camadas de frutas dispostas em bandejas.

Para alimentos que não devam ser expostos directamente a radiação solar, foram desenvolvidos os modelos de exposição indirecta onde colectores planos aquecem o ar que circula em circuito aberto através da caixa onde os alimentos são inseridos. A circulação de ar tanto pode ser forçada como natural, no entanto quando for necessário fazer o controle de humidade e temperatura o uso da circulação forçada é imperativo.

No projecto procurou-se utilizar materiais de construção que estejam disponíveis e que sejam de baixo custo.

2. OBJECTIVOS

2.1 Objectivos Gerais

- Os objectivos gerais do presente trabalho são o uso de energia solar como fonte de energia para secagem de frutas.

2.2 Objectivos Específicos

- O presente trabalho consiste em projectar e construir uma estufa solar (secador solar) que funciona na base da convecção natural para secagem de frutas.

3. FORMAS DE APROVEITAMENTO DA RADIAÇÃO SOLAR DIRECTA

A energia solar ainda não tem seu uso muito difundido. Além da concorrência do petróleo, os maiores empecilhos para o seu emprego passam por: investimento inicial elevado, produção dependente das condições climáticas e necessidade de apoio de outra fonte de energia em situações de baixa produção. O interesse pela energia solar como um todo varia sempre com situações de ordem económicas e contextos da produção energética, se sobressaindo em momentos de crises. Mas, algumas aplicações entretanto, têm-se mantido mesmo em tempos de estabilidade. A radiação solar directa pode ser aproveitada de diversas formas, ainda que a aplicação final seja a mesma. Para efeitos de apresentação pode-se dividir o aproveitamento da energia solar conforme sua aplicação:

- Aplicações térmicas em geral;
- Obtenção de força motriz;
- Obtenção de electricidade;
- Obtenção de energia química.

3.1 Aplicações Térmicas

Aplicações térmicas são aquelas onde a forma de energia necessária ao processo final é o calor. A conversão térmica da radiação solar é a que apresenta maior rendimento, além de ser a mais directa, simples e barata. Nela a radiação solar é transformada em calor pelo efeito térmico da absorção de superfícies escuras ou selectivas. Em aplicações de baixa temperatura, até 150 °C, geralmente são utilizados colectores planos ou caixas de efeito estufa sem concentradores. Para aplicações que exijam temperaturas de trabalho mais elevadas, acima de 150° C, o uso de concentradores é imperativo. Os concentradores são dispositivos focais tais como: lentes, reflectores cónicos,

cilíndricos, parabólicos ou conjuntos de espelhos que, através da concentração dos raios solares num foco definido, permitem a obtenção de temperaturas da ordem de até 3.000° C. Nessa configuração, devido a selectividade do ângulo de incidência imposta pelos concentradores, apenas a radiação directa é aproveitada, sendo bastante sensível ao alinhamento com a posição do sol, exigindo a adopção de mecanismo de seguimento. O céu nublado também é um factor de acentuada redução no seu rendimento, limitando o seu uso a locais de bom índice de insolação e condições climáticas. Já nos sistemas de colectores planos e caixas de efeito estufa todos os tipos de radiação incidentes - directa, difusa e reflectida - são aproveitados. A produção para estas configurações, varia quase que proporcionalmente ao índice de radiação total, garantindo uma operação satisfatória mesmo em dias nublados e de baixa insolação e tornando seu uso bem mais abrangente. Também dispensam dispositivos de seguimento do sol, bastando para sua operação, uma correcta orientação geográfica e valores de ângulo de inclinação em relação ao plano horizontal compatíveis com a latitude.

3.1.1 Aplicações térmicas mais difundidas

As aplicações térmicas mais difundidas são:

- O aquecimento de água;
- Destiladores – Os destiladores solares por efeito térmico são usados para obtenção de água potável a partir de água com alto teor salino;
- A secagem de frutas e grãos – Para garantir a conservação dos alimentos;
- Cozinha – Uma aplicação térmica mais simples é o fogão solar;
- O aquecimento passivo – Para o aquecimento do ambiente de residências.

4. CONSTRUÇÃO DA ESTUFA

4.1 Materiais

Os materiais utilizados para a construção da estufa foram:

- Madeira;
- Vidro;
- Lona plástica de cor preta;
- Cola de madeira;
- Cola de silicone;
- Taxas de ferro;
- Rede mosquiteira;
- Dobradiças.

4.2 Fases de construção

A construção da estufa foi realizada em cinco fases a saber:

1. Na primeira fase fez-se o corte a madeira com as dimensões de 80 x 80 cm para fazer a base. Corte três tábuas de madeira com dimensões de 100 x 80 cm, sendo uma para a parte traseira e as outras para as partes laterais. Nestas últimas duas tábuas fez-se corte num ângulo de 26° na parte superior. E por fim o corte de uma tábua de madeira com dimensão de 80 x 60 cm para parte frontal.

2. Na segunda fase fez-se a colagem das partes, formando assim a caixa para secagem de frutas.

3. Na terceira fase cortaram-se cinco (5) aberturas com dimensão de 10 x 10 cm na parte de baixo do lado frontal da caixa, e também fizeram-se cinco aberturas com a dimensão de 8 x 8 cm na parte de cima do lado de trás da caixa. As aberturas distam 10 cm tanto de baixo para cima como de cima para baixo. As aberturas servem para entrada e saída de ar. Teve de se tomar cuidado para que a posição da abertura não coincida com a posição da bandeja. O ideal é que as aberturas da parte inferior (os de entrada de ar) fiquem posicionadas abaixo

das bandejas e as aberturas da parte superior (as de saída de ar) fiquem posicionadas acima das bandejas.

4. Cortaram-se pedaços de madeira e pregaram-se na parte interna da caixa. Esses pedaços de madeira serviram de suporte para as bandejas.



Figura 1. Caixa da estufa.

5. De seguida fez-se as bandejas onde serão colocados os produtos. As bandejas foram feitas de rede mosquiteira. A rede é fixada em quatro pedaços de madeira com auxílio de taxas de ferro. Esses pedaços de madeira têm dimensões próximas a largura da caixa.

Depois de feita a bandeja, usou-se a rede mosquiteira para tapar as aberturas feitas, tanto em cima como em baixo. Assim protege-se a estufa contra entrada de insectos.



Figura 2. Bandeja.

6. De seguida colocou-se o vidro na parte superior da estufa. Usou-se cola de silicone para colar e vedar o vidro.

7. Por fim colocou-se lona plástica de cor preta. O plástico é colado com cola de contacto nas paredes internas da estufa.



Figura 3. Estufa para secagem de frutas.

5. ESTUFA SOLAR

5.1 Resumo teórico

Existem diversos métodos para secagem de alimentos. O método de escolha depende do tipo de alimento a ser secado, do nível de qualidade que se deseja obter e de um custo que possa ser justificado.

Entre os métodos mais comuns de secagem pode se listar a secagem em cilindros rotativos (“drum drying”), por atomização (“spray drying”), secagem a vácuo, liofilização ou secagem pelo frio (“freeze drying”), cabines e túneis com circulação forçada de ar quente, leito fluidizado entre outros.

Vários aspectos são importantes na concepção de estufas, dos quais se destacam:

- **A orientação**
Desta depende em grande medida a eficácia da captação de energia solar por parte da estufa;
- **O tipo de estrutura**
Dependendo do material que se utilize, para além do aspecto económico;
- **O material transparente empregue**
O mais importante factor é o tipo de material transparente utilizado. Deste depende a quantidade de energia transmitida e retida, em função da selectividade do seu espectro. As suas características fixam a opacidade a grandes comprimentos de onda e portanto estabelecem a intensidade do efeito de estufa.

Na escolha do tipo de material transparente empregue deve-se ter em conta vários aspectos, dos quais se destaca:

- O espectro da transmitância;
- A vida útil do material;
- O custo económico;

- A energia incorporada.

Os principais materiais transparentes utilizados em estufas são o vidro e os plásticos. Para a estufa projectada foi usado como material transparente o vidro.

Vidro

É o material que inicialmente se utilizou nas estufas, já que era o único material que dispunha das características que se exigiam para o invólucro da estufa.

Podem referir-se as seguintes características vantajosas do vidro, quando utilizado em estufas:

- Bom comportamento face ao espectro de radiação solar. Para comprimentos de onda curtos ($<0,8\mu\text{m}$) a transparência do vidro simples é da ordem dos 90%. No entanto é praticamente opaco às radiações de comprimentos de onda longos ($>5\mu\text{m}$), pelo que a radiação libertada pelas paredes se reflecte praticamente toda na face interior do vidro e não se perde para o exterior, produzindo-se assim o efeito de estufa. Outra característica é que o espectro de radiação solar praticamente não se altera ao atravessar o vidro;
- Grande durabilidade. A radiação térmica não produz nenhum efeito de degradação ao vidro, tal como a água ou mesmo os elementos químicos resultantes da poluição atmosférica, pelo que se pode utilizar por um longo período de tempo, quase indeterminado em condições normais.

O vidro possui também algumas desvantagens, tais como:

- Pouca resistência mecânica (ao impacto);
- Peso: o peso do vidro exige uma estrutura de suporte de alguma dimensão, o que limita os ganhos solares, já que esta produz sombra;
- Custo: o preço elevado do vidro advém de um processo de fabrico onde são necessárias altas temperaturas e portanto um gasto intensivo de energia, com reflexo igualmente no impacto ambiental, pela produção de CO_2 , bem como um transporte e manuseamento delicados.

A utilização de vidro simples permite a máxima entrada de radiação solar, mas não evita a rápida descida da temperatura durante o período nocturno, acompanhando a eventual descida da temperatura exterior. Uma forma de reduzir este fenómeno é pela utilização de vidro duplo, reduzindo-se assim as perdas. A colocação de três ou mais vidros não é recomendável, pois o efeito de redução das perdas térmicas não compensa a diminuição na quantidade de radiação solar que entra na estufa e, sobretudo, pela complexidade e custos acrescidos.

Estrutura da estufa

Para a realização das estruturas podem empregar-se diversos materiais: madeira, metal (ferro, aço inox e alumínio), plásticos (usualmente PVC), betão ou tijolo.

O material que foi utilizado para estrutura da estufa é a madeira. A escolha deste material deve-se ao facto de ser o material mais acessível. A madeira é mais económica, apesar de ter uma durabilidade menor que as outras soluções, se não for prévia e periodicamente tratada.

A sua grande vantagem é a baixa condutibilidade térmica, além do factor ambiental, já que se trata de um material renovável e com pouca energia incorporada.

5.2 Tipos de estufas

Na Tabela 1 estão apresentados tipos de estufas solares mais adequados para secagem de alimentos na forma líquida, pastosa e sólida ou em pedaços.

Tabela 1: Tipos de estufas solares mais adequados à desidratação.

Tipo de estufas solares	Tipo de alimento
Estufas por convecção de ar	
Cabine	Pedaços
Esteira contínua	Pedaços
Leito fluidizado	Pedaços pequenos e granulados
Atomização ou pulverização	Líquidos, purés
Estufas de cilindro rotativo	
Atmosférico	Purés, líquidos
Vácuo	Purés, líquidos
Estufas a vácuo	
Vácuo	Pedaços, purés, líquidos
Vácuo contínuo	Purés, líquidos
Liofilização	Pedaços, líquidos

As estufas solares do tipo cabine apresentam duas variações a saber:

- Com bandejas fixas;
- Com bandejas apoiadas sobre uma base móvel;

A estufa que é projectada no presente relatório enquadra-se no grupo de estufas solares do tipo cabine com bandejas fixas.

5.3 Descrição da estufa solar

Em geral as estufas devem ser projectadas de forma que não permitam acúmulo prolongado de humidade e resíduos.

A estrutura da estufa é de madeira. A superfície de cobertura é um vidro transparente de 4 mm de espessura. A estufa está equipada de apenas um vidro, como pode ser visto na Figura 4. O vidro tem a vantagem de deixar passar (entrar) a radiação proveniente do sol e ao mesmo tempo apresenta alta

resistência à saída da mesma em função do comprimento de onda emitido. A resistência a saída da radiação, deve-se ao facto de ocorrer uma mudança na qualidade espectral (aumento do comprimento de onda), consequência da temperatura no interior da estufa ser muito menor que a do sol.

Os vidros são fixados nas extremidades com cola de silicone garantindo também a vedação.

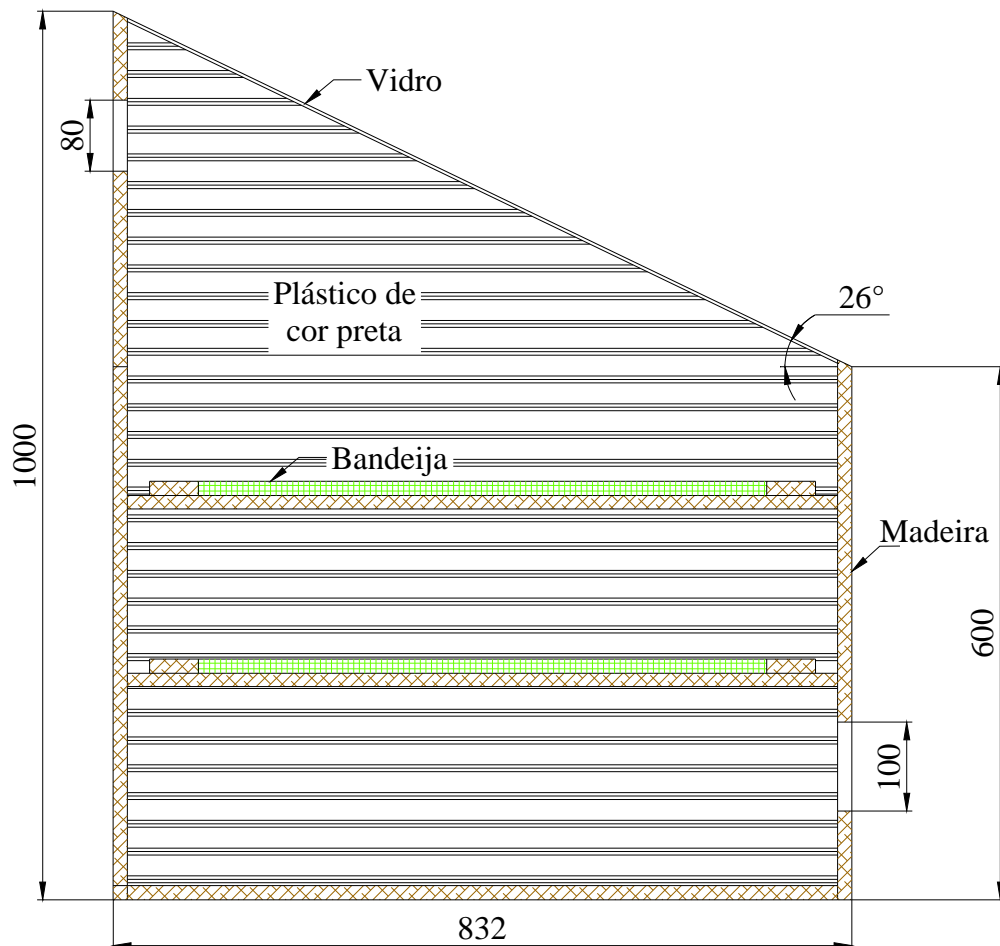


Figura 4. Estufa Solar.

No interior da estufa foi colocada uma lona plástica preta visando maior absorção de calor.

O material das bandejas visto que entra em contacto com o produto não deve ser tóxico ou reagir com os alimentos. As bandejas foram feitas de rede mosquiteira. Quanto menor a malha, melhor para secar alimentos pequenos, pois estes quando perdem humidade diminuem de tamanho e podem eventualmente passar pelos orifícios da rede.

Na Figura 5, pode-se verificar que as bandejas estão apoiadas em pedaços de madeira que foram fixados com pregos na caixa. A rede mosquiteira foi presa a pedaços de madeira para ter maior firmeza.

A estufa tem duas bandejas. A distância entre as bandejas é de 20 cm. A dimensão de cada bandeja é de 80 cm x 75 cm.

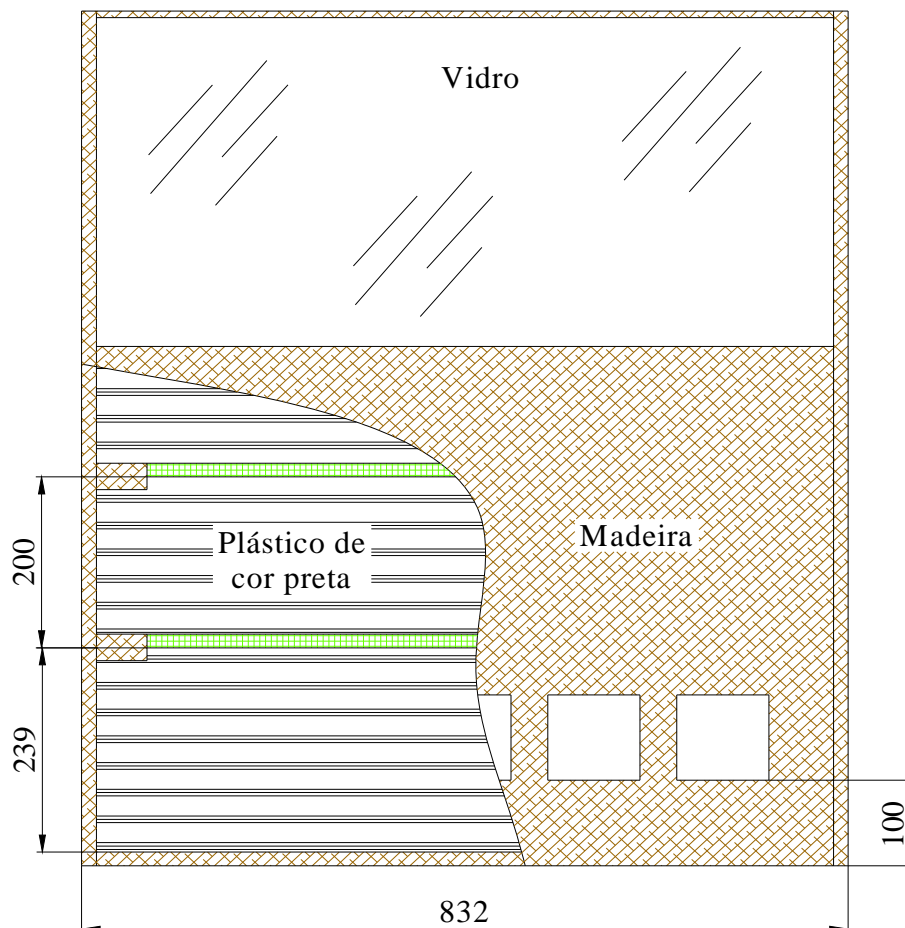


Figura 5. Câmara de secagem.

Na parte inferior e superior da câmara de secagem são abertos furos para entrada e saída do ar. Foram abertos 5 orifícios de forma quadrada. O ar entra, é aquecido dentro da estufa e retira a humidade dos produtos. Os furos abertos são protegidos com rede de malha bem fina (rede mosquiteira). A rede protege a estufa contra a entrada de insectos como moscas e abelhas. Para fixação da rede usa-se taxas de ferro.

6. MISTURA AR-VAPOR DE ÁGUA

O ar atmosférico é composto de oxigénio, nitrogénio, dióxido de carbono, vapor de água, argón e outros gases raros, na proporção de 21% de oxigénio e 79% dos outros elementos.

O ar seco inclui todos os constituintes acima excepto vapor de água. Nos problemas comuns de mistura de ar e vapor de água, a pressão considerada é a pressão atmosférica e no caso de fluxo ar-vapor ser estacionário, a pressão absoluta pode ser considerada como constante.

À excepção somente para temperaturas superiores a 65 °C, a pressão de vapor de água na mistura ar-vapor é suficientemente baixa para permitir o seu tratamento como gás perfeito, nas aplicações comuns.

Em geral, o vapor de água no ar é superaquecido, ou seja, está a uma temperatura acima da temperatura de saturação para uma determinada pressão. Isto significa que, se no espaço ocupado pelo vapor houver água, haverá uma tendência à vaporização se o vapor não for saturado.

6.1 Humidade absoluta e humidade relativa

Humidade absoluta é a quantidade de vapor presente na mistura ar-vapor. A humidade absoluta é expressa em kg de vapor de água por m³ de ar.

A humidade relativa é a relação entre a humidade absoluta existente e a máxima humidade absoluta a uma dada temperatura, ou seja, quando o ar estiver saturado de vapor.

Ou seja:
$$HR = \left(\frac{m_v}{m_{vs}} \right)_{T,V} \quad (1)$$

Onde:

HR — humidade relativa;

m_v — massa de vapor de água em 1 m³ de ar (humidade absoluta);

m_{vs} — massa de vapor de água que teria se o m^3 de ar estivesse saturado a uma dada temperatura.

Como considera-se o vapor como gás perfeito, tem-se:

$$m_v = \frac{p \times V}{R \times T}, \text{ ou seja,}$$

$$HR = \frac{p(\text{existente})}{p(\text{saturação})} \quad (2)$$

A relação entre a massa de vapor de água e a massa do ar seco é denominada de humidade específica ω :

$$\omega = \frac{\text{massa de vapor de água}}{\text{massa de ar seco}}$$

Como supomos o vapor a obedecer às leis do gás perfeito, a expressão acima pode ser escrita da seguinte maneira, sabendo-se que:

$$R = \frac{R_o}{m} \text{ (onde } \bar{m} \text{ é a massa por mole), então:}$$

$$\omega = \frac{18016 \times p \times V}{28,97 \times p_{as}} \text{ ou } \omega = 0,622 \times \frac{p \times V}{p_t - p \times V} \quad (3)$$

Onde:

28,97 – nº de gramas/mole de ar;

p_t - pressão total do ar e vapor;

p_{as} - pressão do ar seco = $p_t - p \times V$.

6.2 Ponto de orvalho (*dew point*) do ar

Chama-se ponto de orvalho à temperatura abaixo da qual inicia-se a condensação, à pressão constante, do vapor de água contido no ar.

A determinação do ponto de orvalho do ar não é muito precisa. Um dos métodos para determinação do ponto de orvalho baseia-se na determinação da temperatura do bolbo húmido (*wet-bulb*). Esta temperatura é obtida cobrindo-se

o termómetro com algodão molhado; a temperatura de equilíbrio é a do bolbo húmido. Esta temperatura é obtida, juntamente com a do termómetro de bolbo seco, em um instrumento que se chama psicrómetro, visto na Figura 6, constituído por dois termómetros, um deles coberto por algodão humedecido e um manípulo onde se pode girar o aparelho, para melhorar o contacto com o ar. Quando o ar, em contacto com o bolbo húmido, não está saturado, há vaporização da água contida no algodão e esta vaporização faz baixar a temperatura do bolbo húmido até o ponto de equilíbrio.

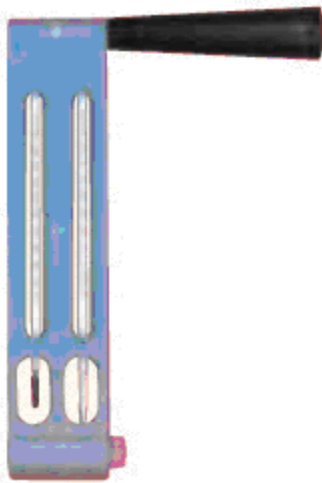


Figura 6. Psicrómetro giratório.

A diferença entre as temperaturas do bolbo seco e do bolbo húmido é denominada depressão do bolbo húmido. A temperatura do bolbo húmido assim como a temperatura do ponto de orvalho são temperaturas de saturação, embora a de bolbo húmido seja ligeiramente mais alta, como pode ser visto na figura seguinte:

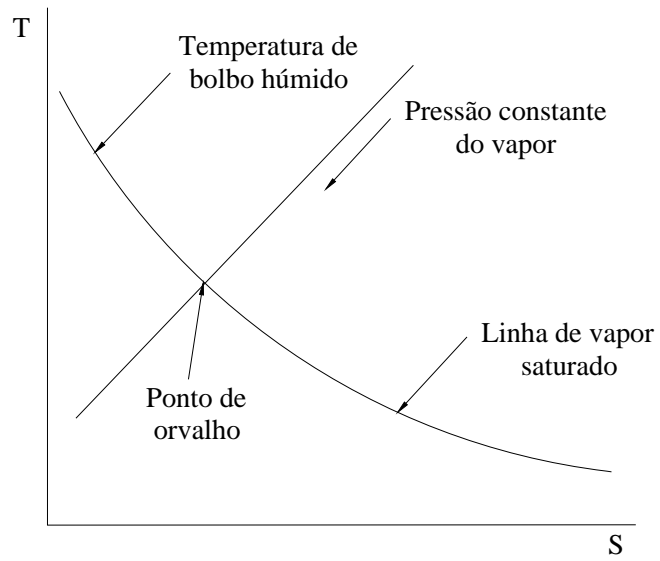


Figura 7. Temperatura de ponto de orvalho e bolbo húmido.

7. PROJECCÃO DA ESTUFA

7.1 Cálculo da declinação da terra em relação ao equador

Para calcular a declinação δ , segundo [2], utiliza-se a seguinte equação:

$$\delta = 23,45 \times \text{sen} \left[360 \times \left(\frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (4)$$

Onde: δ — é a declinação solar;

n — é o número de dias, onde por exemplo: $n = 1$ representa o dia 1 de Janeiro ou $n = 33$ representa o dia 2 de Fevereiro;

Por exemplo:

1. Para o dia 20 de Maio, correspondente a $n = 140$:

$$\delta = 23,45 \times \text{sen} \left[360 \times \left(\frac{284 + 140}{365} \right) \right] = 20^\circ$$

2. Para o dia 2 de Fevereiro, correspondente a $n = 33$:

$$\delta = 23,45 \times \text{sen} \left[360 \times \left(\frac{284 + 33}{365} \right) \right] = -17,2^\circ$$

Nota: Sendo a declinação solar variável, então para efeito de cálculos será usado o valor de ângulo de declinação de 20° .

7.2 Cálculo de número de horas de sol numa localidade

Segundo [2], o número de horas de sol para qualquer localidade é dado pela equação:

$$N = \frac{2}{15} \times \text{arc cos} [-\text{tg}(\delta) \times \text{tg}(\phi)] \quad (5)$$

Coordenadas geográficas da província de Maputo: $\phi = 25^\circ 58'$. No hemisfério sul as latitudes são sempre consideradas negativas. Então $\phi = -25^\circ 58' \approx -26^\circ$.

1. Para $\delta = 20^\circ$, $N = \frac{2}{15} \times \text{arc cos} [-\text{tg}(20^\circ) \times \text{tg}(-26^\circ)] = 10,6 \text{ horas}$ durante o dia. Isso equivale a dizer que o número de horas de sol é de 10 horas e 36 minutos. A noite durará $= 24 \text{ h} - 10,6 \text{ h} = 13,4 \text{ h}$, isto é, 13 horas e 24 minutos.

$$2. \text{ Para } \delta = -17,2^\circ, \quad N = \frac{2}{15} \times \arccos[-\operatorname{tg}(-17,2^\circ) \times \operatorname{tg}(-26^\circ)] = 13,2 \text{ horas}$$

durante o dia. Isso equivale a dizer que o número de horas de sol é de 13 horas e 12 minutos. A noite durará = 24 h – 13,2 h = 10,8 h, isto é, 10 horas e 48 minutos.

7.3 Ângulo da hora do nascer do sol

É o ângulo entre a posição do sol no meio dia solar e a posição ao nascer do sol. Segundo [3], é dado pela seguinte fórmula:

$$\omega_s = \operatorname{arctg}(-\operatorname{tg}\phi \times \operatorname{tg}\delta) \quad (6)$$

$$\text{Então: } \omega_s = \operatorname{arctg}(-\operatorname{tg}(-26^\circ) \times \operatorname{tg}20^\circ) = 10^\circ$$

7.4 Ângulo de Zénite

É o ângulo entre o ponto mais alto acima do observador (Zénite) e o ponto mais alto da esfera celestial. Segundo [3], é dado pela seguinte fórmula:

$$\cos\theta_z = \operatorname{sen}\delta \times \operatorname{sen}\phi + \cos\delta \times \cos\phi \times \cos\omega \quad (7)$$

$$\cos\theta_z = \operatorname{sen}20 \times \operatorname{sen}-26 + \cos20 \times \cos-26 \times \cos10 = 0,68,$$

$$\text{logo: } \theta_z = \arccos 0,68 = 47^\circ$$

7.5 Inclinação do vidro (λ)

A inclinação do vidro da estufa para melhor captar a radiação solar é igual a latitude do local. Neste caso a inclinação do vidro será de 26°.

7.6 Ângulo de incidência do sol no vidro da estufa

O ângulo de incidência solar no vidro da estufa depende do ângulo de incidência solar (θ_z) e do ângulo de inclinação do vidro (λ). Segundo [3], é dado pela fórmula seguinte:

$$\theta = \theta_z + \lambda \quad (8)$$

$$\text{O ângulo será: } \theta = 47 + 26 = 73^\circ$$

8. TESTE DA ESTUFA

O procedimento consistiu em fazer testes de secagem de Massanica. Mediram-se durante o processo valores da humidade absoluta do ar na entrada e saída da estufa, em intervalos de tempo constantes.

Durante o ensaio foram usados instrumentos como: Anemómetro (para medir a velocidade do ar a entrada e saída da estufa) e Psicrómetro.

Os dados que se apresentam nas Tabelas (de 1 a 29) em anexo foram tirados da carta psicrométrica, tendo como dados de entrada a temperatura do bolbo seco e a temperatura do bolbo húmido medidos por um psicrómetro.

8.1 Resultados obtidos

Os dados foram tomados durante três dias (de 27 a 29 de Julho do presente ano) de ensaio sem carga e três dias (de 04 a 07 de Agosto do presente ano) de ensaio com carga (Massanica). Donde se obtiveram os seguintes resultados:

- Segundo os Gráficos 1, 2 e 3 em anexo verifica-se apenas o processo de aquecimento simples do ar sem variação da sua humidade absoluta, visto que a estufa não está carregada. Isto é, a quantidade de vapor de água no ar permanece constante durante o processo de aquecimento, pois não é adicionada nem removido o vapor de água do ar.

Nas tabelas (de 1 a 12) em anexo verifica-se uma redução da humidade relativa do ar durante o processo de aquecimento do mesmo, mantendo-se constante a humidade absoluta. Isso porque a humidade relativa é a relação entre vapor de água existente no ar e a máxima capacidade de vapor de água do ar a mesma temperatura, e a máxima capacidade de vapor de água no ar aumenta com o aumento da temperatura.

- Os Gráficos 4 e 5 mostram o ganho de humidade absoluta do ar na saída da estufa, porque a carga durante a secagem vai libertando a humidade nela contida. O aumento da massa de vapor de água no ar a saída da

estufa é proporcional a quantidade da carga no interior da estufa. Quanto maior a carga no interior da estufa, maior será a humidade absoluta a saída até que o produto fique desumidificado. A 1ª amostra tinha uma massa inicial de 311,5 gramas e a 2ª amostra tinha 362,5 gramas.

- No Gráfico 6 pode-se apreciar o comportamento da diminuição da massa da massanica durante o tempo em que se encontra operando o secador.

Dia 27/07/09.

NOTA: Durante o ensaio verificou variação da velocidade do vento na entrada e saída da estufa, em função da corrente de ar que se fazia sentir. A velocidade máxima atingida foi de 0,7 m/s.

Dos valores obtidos a moda é de 0,2 m/s na entrada e 0,4 m/s na saída da estufa.

Vazão de ar necessário na entrada da estufa

A vazão de ar é que, faz a temperatura e a humidade permanecerem dentro das condições desejadas.

Sabe-se que o ar seco, nas condições normais de pressão e temperatura, tem o volume específico $\nu = 0,833 \text{ m}^3 / \text{kg}$, então:

$$m = \frac{1}{0,833} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \times Q \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \quad (9)$$

Onde:

Q - vazão de ar em m^3/h .

Tomando-se em conta as pequenas variações do volume específico do ar, usa-se a seguinte expressão para o cálculo do fluxo de ar:

$$m = \frac{1}{\nu} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \times Q \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right] \quad (10)$$

Onde:

ν - volume específico em m^3/kg ar seco.

Para a velocidade do ar a entrada de 0,2 m/s, a vazão de ar é:

$$Q = A \times V$$

Onde:

A - área dos orifícios de entrada de ar. A área de cada orifício é de $0,01 m^2$. a estufa tem cinco (5) orifícios de entrada de ar. A área total é de $0,05 m^2$.

V - velocidade do ar a entrada da estufa. $V = 0,2 m/s$

Então: $Q = 0,05 \times 0,2 = 0,01 m^3 / s$.

Determinação do fluxo de ar em kg/s:

Para os dados da Tabela 1: $m = \frac{1}{\nu} \times Q = \frac{1}{0,86} \times 0,01 = 0,012 kg / s = 43,2 kg / h$

Para os dados da Tabela 2: $m = \frac{1}{0,87} \times 0,01 = 0,012 kg / s = 43,2 kg / h$

Para os dados da Tabela 3: $m = \frac{1}{0,885} \times 0,01 = 0,011 kg / s = 40 kg / h$

Balanço energético na estufa

O balanço energético tem em vista avaliar o calor ganho no interior da estufa. O calor ganho no interior da estufa depende fundamentalmente da orientação da estufa em relação ao sol, da insolação e também dos elementos usados na absorção de calor.

O calor absorvido é função do calor que atravessa o vidro. Do calor irradiado, uma certa quantidade é transmitida pelo vidro e a outra é reflectida.

A quantidade de calor adicionada ao ar, por kg de ar fluente, segundo [4] é determinada pela seguinte expressão:

$$Q = \text{entalpia do ar saindo } (h_2) - \text{entalpia do ar entrando } (h_1)$$

Para os dados da Tabela 1: $Q = h_2 - h_1 = 53,5 - 50,5 = 3 \text{ kJ / kg ar sec o ;}$

Ou então, $Q = (h_2 - h_1) \times m = 3 \times 43,2 = 129,6 \text{ kJ / h} = 0,036 \text{ kJ / s} = 36 \text{ W}$

Para os dados da Tabela 2: $Q = h_2 - h_1 = 67,5 - 57 = 10,5 \text{ kJ / kg ar sec o ;}$

Ou então, $Q = (h_2 - h_1) \times m = 10,5 \times 43,2 = 453,6 \text{ kJ / h} = 0,126 \text{ kJ / s} = 126 \text{ W}$

Para os dados da Tabela 3: $Q = h_2 - h_1 = 67,5 - 64 = 3,5 \text{ kJ / kg ar sec o}$

Ou então, $Q = (h_2 - h_1) \times m = 3,5 \times 40 = 140 \text{ kJ / h} = 0,039 \text{ kJ / s} = 39 \text{ W} .$

Dia 28/07/09

NOTA: Durante o ensaio verificou variação da velocidade do vento na entrada e saída da estufa, em função da corrente de ar que se fazia sentir. A velocidade máxima atingida foi de 1,5 m/s.

Dos valores obtidos a moda é de 0,4 m/s na entrada e 0,6 m/s na saída.

Vazão de ar necessário na entrada da estufa

$$m = \frac{1}{v} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \times Q \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$$

Para a velocidade do ar a entrada de 0,4 m/s, a vazão de ar é:

$$Q = A \times V , \text{ então } Q = 0,05 \times 0,4 = 0,02 \text{ m}^3 / \text{s} .$$

Determinação do fluxo de ar em kg/s:

Para os dados da Tabela 1:

$$m = \frac{1}{0,877} \times Q = \frac{1}{0,877} \times 0,02 = 0,023 \text{ kg / s} = 83 \text{ kg / h ;}$$

O fluxo de ar pode ser considerado igual para os restantes casos com um erro de 0,2%, visto que a variação do volume específico é muito pequena.

Balço energético na estufa

$$Q = \text{entalpia do ar saindo } (h_2) - \text{entalpia do ar entrando } (h_1)$$

Para os dados da Tabela 1: $Q = h_2 - h_1 = 67,5 - 60,5 = 7 \text{ kJ / kg ar sec o ;}$

Ou então, $Q = (h_2 - h_1) \times m = 7 \times 83 = 581 \text{ kJ / h} = 0,161 \text{ kJ / s} = 161 \text{ W}$

Para os dados da Tabela 2: $Q = h_2 - h_1 = 71 - 60,5 = 10,5 \text{ kJ / kg ar sec o}$

Ou então, $Q = 10,5 \times 83 = 871,5 \text{ kJ / h} = 0,242 \text{ kJ / s} = 242 \text{ W} .$

Para os dados da Tabela 3: $Q = h_2 - h_1 = 71 - 60,5 = 10,5 \text{ kJ / kg ar sec o}$

Ou então, $Q = 10,5 \times 83 = 871,5 \text{ kJ / h} = 0,242 \text{ kJ / s} = 242 \text{ W} .$

Dia 29/07/09.

NOTA: Durante o ensaio verificou variação da velocidade do vento na entrada e saída da estufa, em função da corrente de ar que se fazia sentir. A velocidade máxima atingida foi de 2,0 m/s.

Dos valores obtidos a moda é de 0,8 m/s na entrada e 1,1 m/s na saída.

Vazão de ar necessário na entrada da estufa

$$m = \frac{1}{v} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \times Q \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$$

Para a velocidade do ar a entrada de 0,8 m/s, a vazão de ar é:

$$Q = A \times V , \text{ então } Q = 0,05 \times 0,8 = 0,04 \text{ m}^3 / \text{s} .$$

Determinação do fluxo de ar em kg/s:

Para os dados da tabela 1:

$$m = \frac{1}{0,872} \times Q = \frac{1}{0,872} \times 0,04 = 0,046 \text{ kg / s} = 166 \text{ kg / h};$$

O fluxo de ar pode ser considerado igual para os restantes casos com um erro de 0,7%, visto que a variação do volume específico é muito pequena.

Balanço energético na estufa

$$Q = \text{entalpia do ar saindo } (h_2) - \text{entalpia do ar entrando } (h_1)$$

Para os dados da Tabela 1:

$$Q = h_2 - h_1 = 63 - 56,5 = 6,5 \text{ kJ / kg ar sec o};$$

$$\text{Ou então, } Q = (h_2 - h_1) \times m = 6,5 \times 166 = 1079 \text{ kJ / h} = 0,30 \text{ kJ / s} = 300 \text{ W}$$

Para os dados da Tabela 2:

$$Q = h_2 - h_1 = 63 - 56,5 = 6,5 \text{ kJ / kg ar sec o}$$

$$\text{Ou então, } Q = (h_2 - h_1) \times m = 6,5 \times 166 = 1079 \text{ kJ / h} = 0,30 \text{ kJ / s} = 300 \text{ W} .$$

Para os dados da Tabela 3:

$$Q = h_2 - h_1 = 59 - 56,5 = 2,5 \text{ kJ / kg ar sec o}$$

$$\text{Ou então, } Q = 2,5 \times 166 = 415 \text{ kJ / h} = 0,115 \text{ kJ / s} = 115 \text{ W} .$$

Para os dados da Tabela 4:

$$Q = h_2 - h_1 = 63 - 56,5 = 6,5 \text{ kJ / kg ar sec o}$$

$$\text{Ou então, } Q = 6,5 \times 166 = 1079 \text{ kJ / h} = 0,30 \text{ kJ / s} = 300 \text{ W} .$$

Para os dados da Tabela 5:

$$Q = h_2 - h_1 = 70,5 - 56,5 = 14 \text{ kJ / kg ar sec o}$$

$$\text{Ou então, } Q = 14 \times 166 = 2324 \text{ kJ / h} = 0,646 \text{ kJ / s} = 646 \text{ W} .$$

Para os dados da Tabela 6:

$$Q = h_2 - h_1 = 70,5 - 56,5 = 14 \text{ kJ / kg ar seco}$$

$$\text{Ou então, } Q = 14 \times 166 = 2324 \text{ kJ / h} = 0,646 \text{ kJ / s} = 646 \text{ W} .$$

9. ANÁLISE ECONÓMICA DO PROJECTO

9.1 Custo do material

Tabela 2. Custo do material.

Material	Dimensão	Quantidade	Preço (Mt)
Madeira	3660x1830x16mm	1	1550,00
Vidro	840x795x4 mm	1	146,00
Lona plástica de cor preta	250x2x250	2	90,00
Cola de Madeira	—	1 kg	100,00
Rede mosquiteira plástica	1,0x1,20 m	2	85,5
Taxas de ferro	—	1/4 Kg	35,00
Dobradiça		2	25,00
Cola de Silicone	—	1	50,00
Total			2081,50

10. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

10.1 Conclusões

O calor armazenado no interior da câmara de secagem depende dos materiais com os quais se constrói a estufa, principalmente do isolamento térmico, o qual evita as perdas de calor pelas paredes e a parte inferior da estufa. Para um bom funcionamento da estufa solar, é fundamental uma instalação adequada dos seus componentes. A localização, orientação e a inclinação devem seguir as regras para que a captação de energia solar seja máxima.

Dos resultados obtido durante o ensaio verificou-se um pequeno aumento na humidade absoluta do ar na saída, pois a massa da carga usada para o ensaio era pequena (311,5 gramas e 362,5 gramas), adicionando assim pequenas quantidades de vapor de água ao ar. Isso traduz-se num baixo rendimento se for comparada a humidade absoluta do ar a entrada e saída da estufa.

Notou-se uma certa dificuldade em ter uma conclusão final sobre o real rendimento da estufa pois, os ensaios foram realizados num período do ano em que se verificam baixas temperaturas, e em dias de céu nublado em que o rendimento é bastante reduzido.

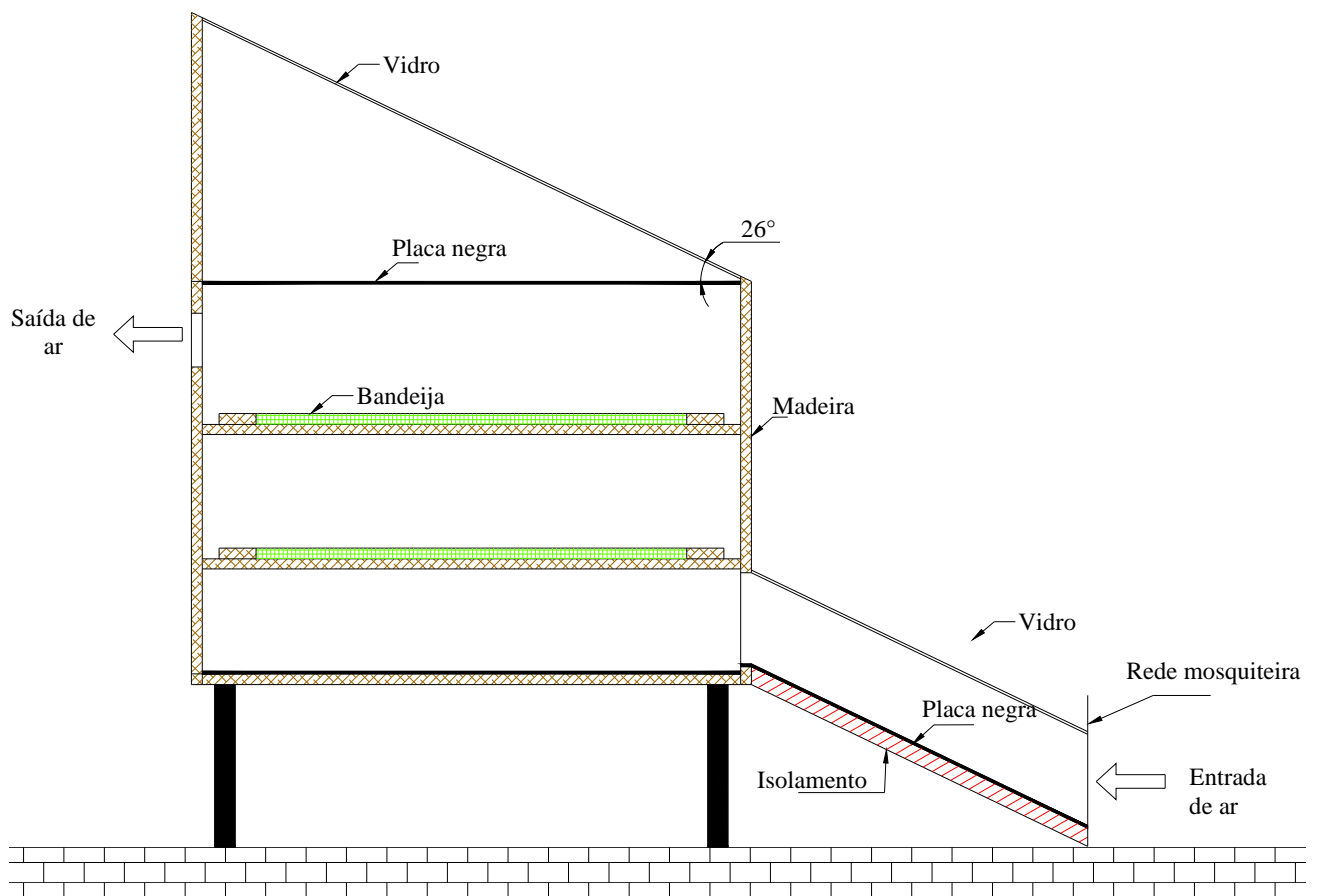
A dimensão dos orifícios de saída da estufa afecta significativamente os valores da humidade do ar. Há uma necessidade de aumentar as dimensões dos orifícios para melhorar a substituição do ar húmido interno pelo ar externo. Esta substituição é lenta em dias de vento calmo, sendo mais rápida quanto maior for a velocidade do vento e área de abertura para ventilação.

10.2 Recomendações

Para otimizar a estufa verificou-se a necessidade de instalar um colector solar para um pré-aquecimento de ar, garantindo assim também uma melhor distribuição das temperaturas no interior da estufa.

Para evitar a perda de qualidade dos produtos devido a exposição directa aos raios solares, recomenda-se colocar uma placa negra entre a bandeja superior e vidro. A placa negra será feita de chapa metálica de preferência ondulada para aumentar a área de transferência de calor.

Assim a nova estufa ficaria constituída por três partes: dois colectores solares (superior e inferior) que servem para converter a energia solar em calor e uma câmara de secagem onde os produtos serão colocados sem exposição directa à radiação solar. O modelo proposto tem a seguinte estrutura:



Nos secadores de maiores dimensões, para um bom armazenamento do calor no interior da câmara de secagem, pode-se introduzir pedras pintadas de preto. A medida que a luz solar vai desaparecendo (ao anoitecer) as pedras libertam o calor absorvido durante o dia, tornando assim o secador funcional durante um certo tempo mesmo sem a luz solar.

O uso de outras fontes de energia em substituição da energia solar nos períodos longos de chuva é imprescindível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] – Fundamentos de transferência de calor e massa, Frank P. Incropera e David P. DeWitt – 4º edição;
- [2] – FUNDAMENTOS DA ENERGIA SOLAR – RADIAÇÃO SOLAR E COLECTOR SOLAR PLANO; Marcelo Bezerra Grilo, Editora Universitária – Universidade Federal de Campina Grande, 2007;
- [3] – Apontamentos da disciplina de Energias Renováveis, da autoria de Professora Fátima Arthur, Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Eduardo Mondlane, 2007;
- [4] –INSTALAÇÕES DE AR CONDICIONADO, Hélio Creder, Editora: Livros técnicos e Científicos – 5ª Edição, 1996;
- [5] – DESIDRATAÇÃO DE FRUTAS E HORTALIÇAS, Eng.º Pedro Luís Santos Meloni, Fortaleza: Instituto Frutal, 2003;

ANEXOS

Dia 27/07/09.

Tabela 1. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 12:30	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	26	29
Temperatura do bolbo húmido (°C)	18	19
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	13,5	13,5
Humidade relativa (%)	45	37
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	9,4	9,4
Entalpia (kJ/kg ar seco)	50,5	53,5
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,86	0,869

Tabela 2.

Hora: 13:00	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	29	38
Temperatura do bolbo húmido (°C)	20	23
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	15,5	16
Humidade relativa (%)	43	26
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	10,8	11
Entalpia (kJ/kg ar seco)	57	67,5
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,87	0,897

Tabela 3.

Hora: 13:30	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	33	37
Temperatura do bolbo húmido (°C)	22	23
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	17	16,5
Humidade relativa (%)	37	28
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	11,8	11,8
Entalpia (kJ/kg ar seco)	64	67,5
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,885	0,895

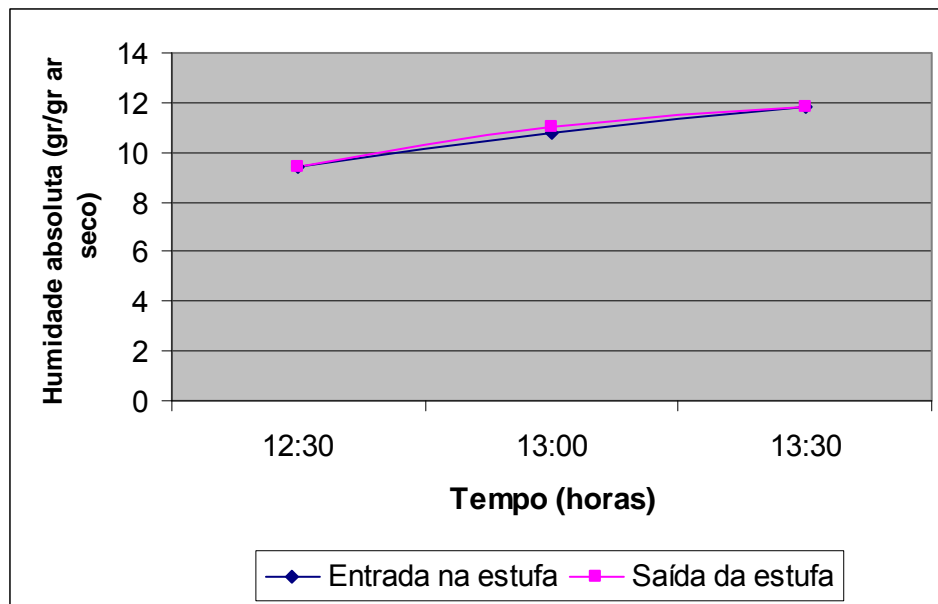


Gráfico 1. Gráfico da variação da humidade absoluta do ar na estufa.

Dia 28/07/09

Tabela 4. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 11:30	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	31	37
Temperatura do bolbo húmido (°C)	21	22
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	16	16
Humidade relativa (%)	39	26
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	11,4	11,4
Entalpia (kJ/kg ar seco)	60,5	67,5
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,872	0,897

Tabela 5.

Hora: 12:30	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	30	40
Temperatura do bolbo húmido (°C)	21	24
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	16,5	16,5
Humidade relativa (%)	43	25
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	11,8	11,8
Entalpia (kJ/kg ar seco)	60,5	71
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,875	0,905

Tabela 6.

Hora: 13:30	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	30	40
Temperatura do bolbo húmido (°C)	21	24
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	16,5	16,5
Humidade relativa (%)	43	25
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	11,8	11,8
Entalpia (kJ/kg ar seco)	60,5	71
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,875	0,905

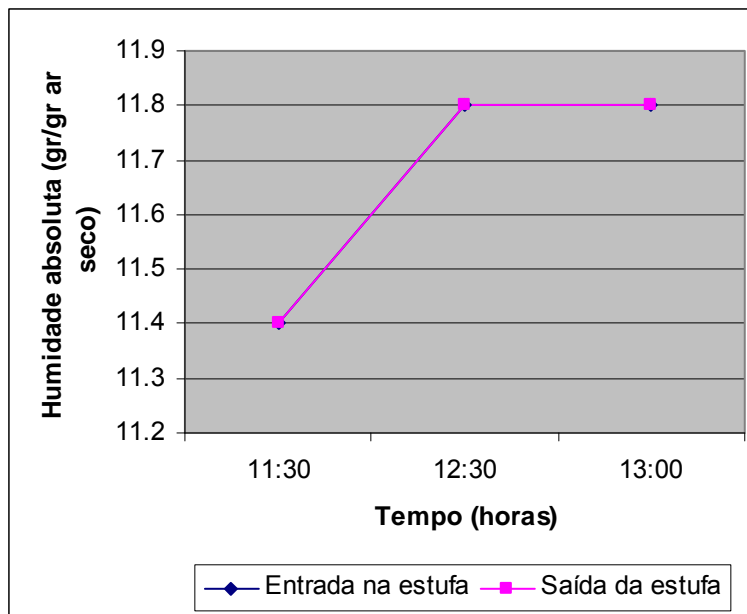


Gráfico 2. Gráfico da variação da humidade absoluta do ar na estufa.

Dia 29/07/09.

Tabela 7. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 11:30	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	30	37
Temperatura do bolbo húmido (°C)	20	22
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	14,8	14
Humidade relativa (%)	39	23
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	10,4	10,3
Entalpia (kJ/kg ar seco)	56,5	63
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,877	0,895

Tabela 8. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 12:00	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	31	40
Temperatura do bolbo húmido (°C)	20	22
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	14	12,5
Humidade relativa (%)	35	18
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	10	9
Entalpia (kJ/kg ar seco)	56,5	63
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,875	0,90

Tabela 9. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 12:30	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	32	38
Temperatura do bolbo húmido (°C)	20	21
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	13,5	12
Humidade relativa (%)	31	19

Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	9,6	8,6
Entalpia (kJ/kg ar seco)	56,5	59,5
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,878	0,893

Tabela 10. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 13:00	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	32	40
Temperatura do bolbo húmido (°C)	20	22
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	13,5	13
Humidade relativa (%)	31	18
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	9,6	9,2
Entalpia (kJ/kg ar seco)	56,5	63
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,878	0,90

Tabela 11. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 13:30	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	32	45
Temperatura do bolbo húmido (°C)	20	24
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	13,5	13,8
Humidade relativa (%)	31	15,5
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	9,6	9,8
Entalpia (kJ/kg ar seco)	56,5	70,5
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,878	0,915

Tabela 12. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 14:00	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	32	43
Temperatura do bolbo húmido (°C)	20	24
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	13,5	15
Humidade relativa (%)	31	18
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	9,6	10,6
Entalpia (kJ/kg ar seco)	56,5	70,5
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,878	0,911

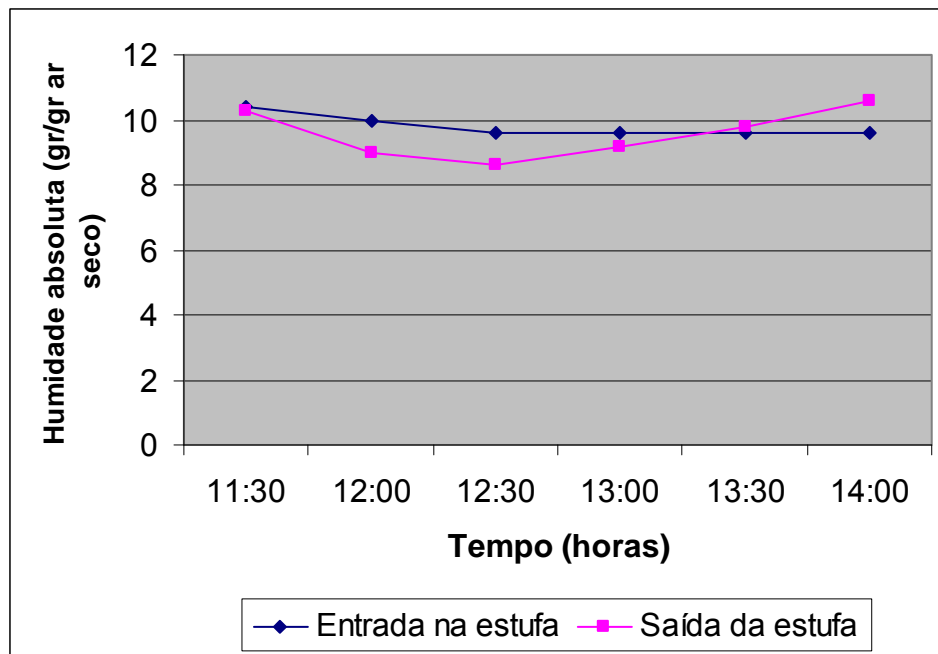


Gráfico 3. Gráfico da variação da humidade absoluta do ar na estufa.

Teste da estufa com carga**Dia 06/08/09.**

Tabela 13. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 10:30	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	25	28
Temperatura do bolbo húmido (°C)	22	23
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	20,8	21
Humidade relativa (%)	76	65
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	15,4	15,6
Entalpia (kJ/kg ar seco)	64,5	68
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,865	0,875

Tabela 14. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 11:00	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	28	32
Temperatura do bolbo húmido (°C)	22	23
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	19,3	19
Humidade relativa (%)	58	45
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	14	14,2
Entalpia (kJ/kg ar seco)	64	67,5
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,872	0,884

Tabela 15. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 12:00	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	32	37
Temperatura do bolbo húmido (°C)	24	26
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	20,8	22
Humidade relativa (%)	50	40
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	15,4	16,6
Entalpia (kJ/kg ar seco)	71	80
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,885	0,902

Tabela 16. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 12:30	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	30	35
Temperatura do bolbo húmido (°C)	23	25
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	20	21,3
Humidade relativa (%)	54	43
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	14,8	15,8
Entalpia (kJ/kg ar seco)	67,5	75
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,879	0,895

Tabela 17. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 13:00	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	29	35
Temperatura do bolbo húmido (°C)	22	24
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	18,8	19,5
Humidade relativa (%)	54	38
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	13,6	14,2

Entalpia (kJ/kg ar seco)	63,5	71
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,875	0,893

Tabela 18. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 13:30	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	27	30
Temperatura do bolbo húmido (°C)	22	23
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	20	20
Humidade relativa (%)	64	54
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	14,6	14,8
Entalpia (kJ/kg ar seco)	64	67,5
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,87	0,879

Tabela 19. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 14:00	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	31	36
Temperatura do bolbo húmido (°C)	24	25
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	21,3	20,8
Humidade relativa (%)	55	39
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	15,8	15,8
Entalpia (kJ/kg ar seco)	71,5	75
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,883	0,897

Tabela 20. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 14:30	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	30	32
Temperatura do bolbo húmido (°C)	23	24
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	20	20,8
Humidade relativa (%)	54	50
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	14,8	15,4
Entalpia (kJ/kg ar seco)	67,5	71
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,879	0,885

Tabela 21. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 15:00	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	28	32
Temperatura do bolbo húmido (°C)	22	24
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	19,3	20,8
Humidade relativa (%)	58	50
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	14	15,4
Entalpia (kJ/kg ar seco)	64	71
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,872	0,885

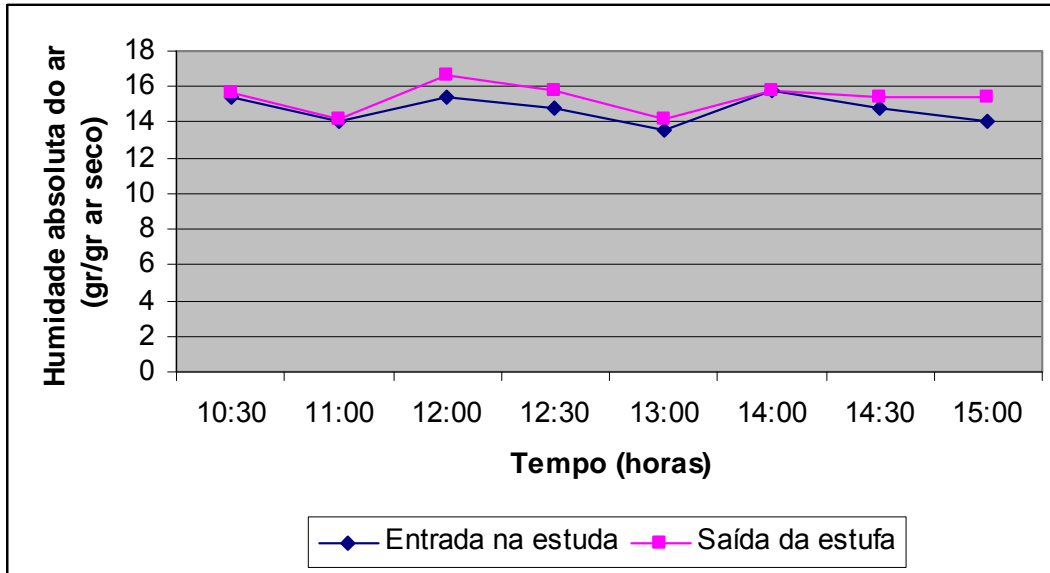


Gráfico 4. Gráfico da variação da humidade absoluta do ar na estufa.

Dia 07/08/09.

Tabela 22. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 10:00	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	30	33
Temperatura do bolbo húmido (°C)	21,5	23
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	17,8	18,5
Humidade relativa (%)	47	41
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	12,6	13,4
Entalpia (kJ/kg ar seco)	62	67,5
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,877	0,885

Tabela 23. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 10:30	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	30	36
Temperatura do bolbo húmido (°C)	22	24
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	18,5	18,8
Humidade relativa (%)	48	35
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	13,2	13,6
Entalpia (kJ/kg ar seco)	64	71
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,877	0,895

Tabela 24. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 11:00	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	31	39
Temperatura do bolbo húmido (°C)	23	26
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	19,8	21,2
Humidade relativa (%)	50	34

Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	14,4	15,8
Entalpia (kJ/kg ar seco)	68	79,5
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,881	0,907

Tabela 25. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 11:30	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	32	39
Temperatura do bolbo húmido (°C)	23	25
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	19	19,3
Humidade relativa (%)	45	30
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	13,8	14
Entalpia (kJ/kg ar seco)	67,5	75
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,884	0,905

Tabela 26. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 12:00	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	34	39
Temperatura do bolbo húmido (°C)	24	25
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	20	19,3
Humidade relativa (%)	42	30
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	14,6	14
Entalpia (kJ/kg ar seco)	71	75
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,89	0,905

Tabela 27. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 13:00	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	28	33
Temperatura do bolbo húmido (°C)	21	23
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	17,5	18,5
Humidade relativa (%)	52	41
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	12,6	13,4
Entalpia (kJ/kg ar seco)	60	67,5
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,87	0,885

Tabela 28. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 13:30	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	29	34
Temperatura do bolbo húmido (°C)	21	24
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	17,3	20
Humidade relativa (%)	48	42
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	12,2	14,6
Entalpia (kJ/kg ar seco)	60	71
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,873	0,89

Tabela 29. Propriedades termodinâmicas da mistura ar-vapor de água.

Hora: 14:00	Ar a entrada da estufa	Ar na saída da estufa
Temperatura do bolbo seco (°C)	31	38
Temperatura do bolbo húmido (°C)	22	25
Temperatura do ponto de orvalho (°C)	17,8	19,8
Humidade relativa (%)	45	33
Humidade absoluta (gr/gr ar seco)	12,8	14,6

Entalpia (kJ/kg ar seco)	64	75
Volume específico (m ³ /kg ar seco)	0,879	0,902

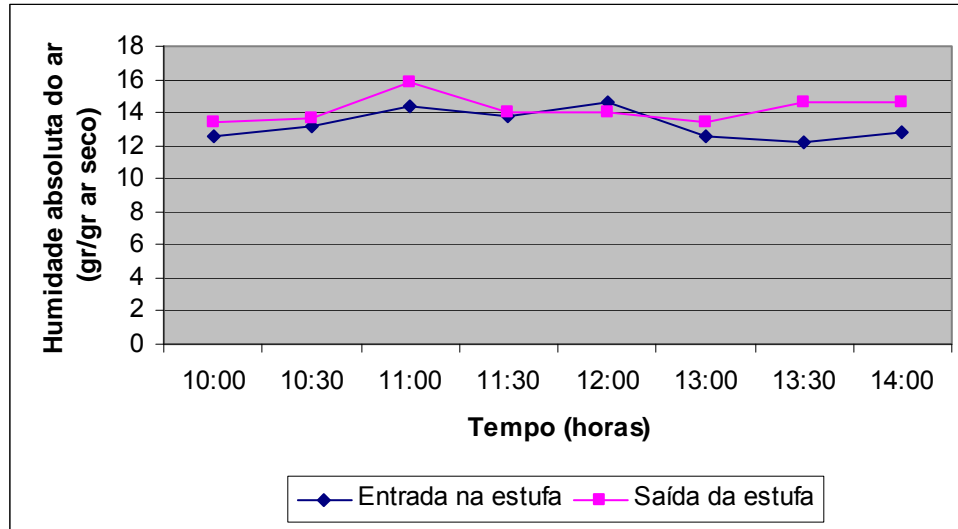


Gráfico 5. Gráfico da variação da humidade absoluta do ar na estufa.

Tabela 30. Variação da massa da Massanica em função do tempo de operação da estufa.

Tempo (horas)	Massa (gramas)	
	Dias: 04/08 - 05/08	Dias: 06/08 - 07/08
0 (Início)	311.5	362.5
5	243.5	320
10	200	267

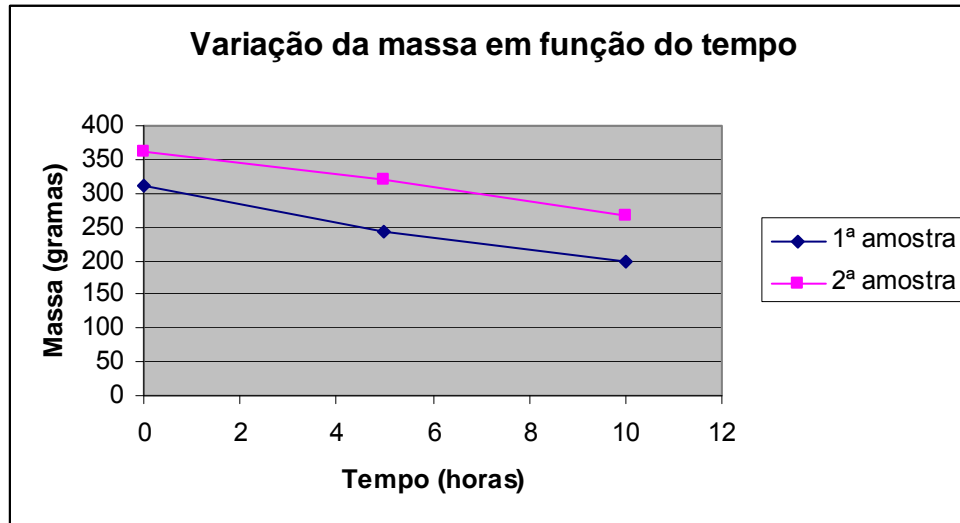


Gráfico 6. Varição da perda de peso da Massanica durante a secagem.