

RESUMO

A secagem é a operação unitária mais onerosa na produção de raspas de mandioca para rações. Dada a necessidade de evaporar 1.600 kg de água para produzir 1.000 kg de raspas com 13% de umidade, o único processo econômico de obter as raspas é utilizando a energia natural do ar (entalpia) e a radiação solar

Indica-se, no presente trabalho, os resultados experimentais e de simulação matemática correspondentes à secagem de raspas em camadas espessas com ar forçado por um ventilador e aquecido por um coletor solar feito de materiais rústicos. O secador, uma barcaça de 3 x 5 m² de seção, foi construído em alvenaria com piso metálico perfurado especialmente para uniformizar o ar. Os resultados indicam que a secagem solar com ar forçado é um sistema eficiente e econômico para secar as raspas de mandioca. O modelo matemático de secagem adaptado para mandioca, é uma ferramenta muito útil para otimizar o sistema para diferentes regiões produtoras. Apresenta-se, finalmente, uma máquina cortadora de barras de mandioca produzidas para otimizar o processo da secagem.

SUMMARY

Drying is the most expensive unit operation for producing cassava chips, used in the animal feed industry. Because it is necessary to evaporate 1600 kilograms of water to produce one ton of 13% moisture chips, the only economical way of obtaining those chips is by using solar energy.

In the present research work experimental and simulated results of cassava chips drying with forced air, heated by solar collectors are presented. The results show that the use of forced convection and solar collector may be an efficient and economical way of producing cassava chips. The computer model, adapted for predicting the drying process, is a useful tool for designing a system under specific conditions.

SIMBOLOGIA

Cp	=	Calor específico, kcal/kg - °C
L	=	Calor latente de vaporização, kcal/kg
M	=	Teor de umidade, decimal, base seca
Me	=	Teor de umidade de equilíbrio, decimal, base seca
M	=	Teor de umidade, decimal, base úmida
Ps	=	Pressão de vapor de saturação, kg/m ²
Pv	=	Pressão de vapor, kg/m ²
RH	=	Umidade relativa, decimal
T	=	Temperatura, °C
t	=	Tempo horas

- (*) Professores do Departamento de Engenharia Agrícola da UNICAMP, CAMPINAS - SP
(**) Assessor de Pesquisas, CENTREINAR, VIÇOSA - MG.

1. INTRODUÇÃO

A mandioca é utilizada, na maioria dos países tropicais, para alimentação de suínos, gado, ovelhas e aves. Muitas pesquisas de alimentação têm demonstrado que a mandioca possui carboidratos de boa qualidade e que pode ser um bom substituto do milho em rações para suínos, gado de carne e aves (ROSENTHAL e LIMA, 1973).

O Mercado Comum Europeu importa grandes quantidades de farelo, raspas e peletizado de mandioca para as suas indústrias de rações. O Brasil, maior produtor mundial de mandioca, sendo responsável por cerca de 30% da produção total, não tem participação significativa deste mercado, o qual é compartilhado num 85% sobre Indonésia e Tailândia, GRACE (1977).

Nesses dois países as raspas são produzidas pelo corte manual ou mecânico dos tubérculos e posterior secagem ao sol em pátios onde o produto é colocado em camadas finas e movimentado continuamente. Este sistema de secagem é simples mas se precisa de áreas grandes e mão-de-obra, além dos riscos de deterioração em condições ambientais desfavoráveis. Por outra parte, considerando que é necessário evaporar 1600 kilogramas de água para produzir uma tonelada de raspas de 13% de umidade, o uso do sol como fonte de energia é a única alternativa econômica na secagem.

Como o mercado mundial de raspas está em expansão, é importante que em países produtores como o Brasil, se estudem métodos mais eficientes no uso da energia solar para se poder, desta forma, competir no mercado exportador.

No seguinte trabalho apresentam-se resultados de experimentação e simulação matemática de um sistema eficiente e econômico para a fabricação e secagem das raspas de mandioca.

2. A SECAGEM DAS RASPAS DE MANDIOCA - NATUREZA DO PROBLEMA

O teor de umidade médio das raízes frescas de mandioca é de 62 a 66% (base úmida). Nestas condições, a deterioração do produto é muito rápida: pode acontecer entre 2 a 6 dias.

A dimensão característica da raiz é bastante grande (de 3 a 10cm). Em consequência, a velocidade da secagem de raízes é lenta demais, às temperaturas de secagem usadas normalmente.

Além disso, a desuniformidade das raízes dá origem a problemas adicionais na secagem. Estes dois fatos estabelecem a necessidade de cortá-las em pedaços de tamanho apropriado e uniformes para permitir a secagem (raspas).

Após as raízes serem cortadas, a deterioração é ainda mais acelerada, podendo acontecer em horas se não derem início à secagem. ROA et alii (1974) encontraram que se as raspas não se secam até 50% de umidade no primeiro dia de secagem, o produto estraga. As raspas com 12 a 13% podem armazenar-se por períodos longos.

Durante o processo de secagem precisa-se evaporar quantidades consideráveis de água para levar o produto a condições seguras de armazenamento. É assim que, para produzir 1000 quilos de produto com 13% de umidade, precisa-se evaporar 1600 quilos de água. Se este processo se faz pelo uso de um secador mecânico convencional, são necessários 270 litros de óleo Diesel, representando o combustível ou 50% do preço atual das raspas no Brasil. Em consequência, o uso da entalpia do ar ambiente e a radiação solar são quase necessários por motivos econômicos.

3. SISTEMA DE SECAGEM

O sistema de secagem estudado no presente trabalho consiste, fundamentalmente, de três elementos: 1. Um elevador-descascador; 2. Máquina para fabricar as raspas (cortadora); e 3. Unidade de secagem propriamente dita. Detalhes de

cada elemento são apresentados seguidamente.

3.1. Lavador-Descascador

É recomendável lavar e descascar a mandioca para retirar os restos de terra e fibras lenhosas da superfície, visando proteger as facas da máquina cortadora. A operação de descasque pode ser dispensada quando o uso das raspas é para alimentação animal. Para fabricar farinha para consumo humano é necessário descascar o material.

O cilindro ranurado ilustrado na Figura 1, tem dado resultados satisfatórios, realizando as operações de lavado e descascado simultaneamente. O lavado é feito pela água que ingressa em forma de chuva através de furações no eixo do cilindro; no entanto, que o descascamento acontece como resultado do efeito de cisalhamento (atrito) entre raízes, assim como entre as raízes e a superfície interna do cilindro.

Um cilindro de 1.0 metro de diâmetro, virando a 40 rpm, com um tempo de residência de 60 a 90 segundos, retira mais de 90% da casca sem atingir perdas excessivas. O tempo de residência deve controlar-se para evitar perdas após a casca removida.

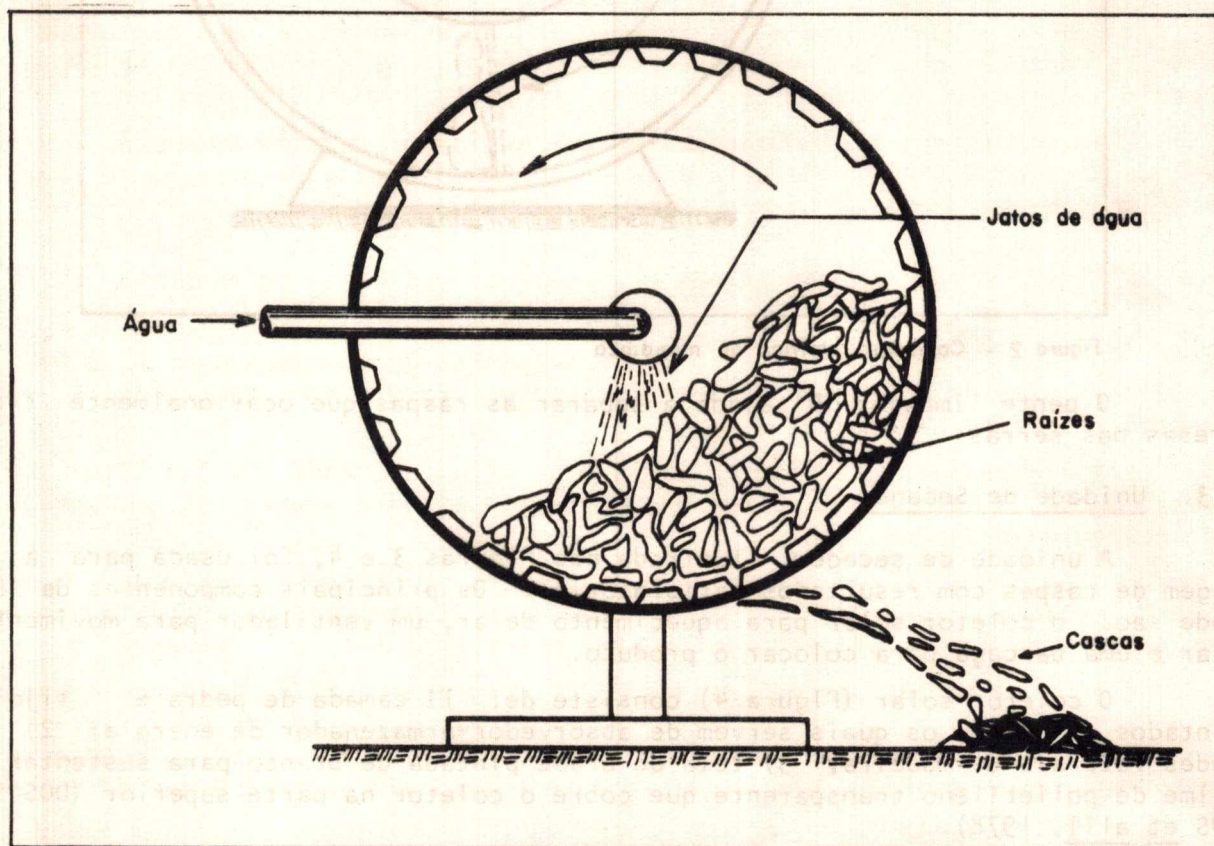


Figura 1 - Lavador - Descascador de mandioca

3.2. Cortadora

O cortador rotativo apresentado na Figura 2 foi projetado e construído para fazer as raspas. É um cortador contínuo com capacidade para 700 quilos / hora.

As raízes são alimentadas através da janela de alimentação (A) no rotor centrífugo onde as pás forçam as raízes contra a faca estacionária (C). As rodas cortadas pela faca estacionária são empurradas contra um conjunto de 13 serras circulares co-axiais, que fazem o corte longitudinal. As raspas são então ejetadas pelas serras circulares por efeito da força centrífuga.

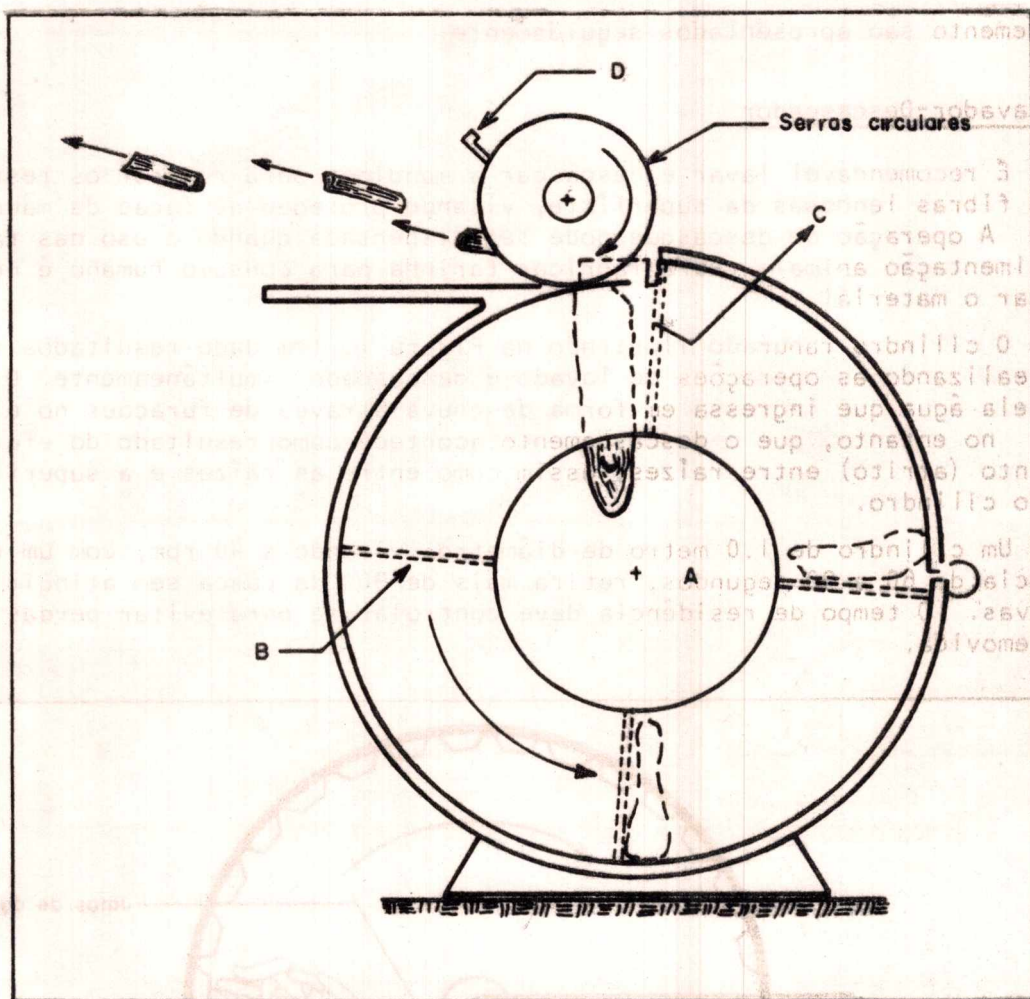


Figura 2 - Cortadora elétrica de mandioca

O pente limpador (D) ajuda a separar as raspas que ocasionalmente ficam presas nas serras.

3.3. Unidade de Secagem

A unidade de secagem, ilustrada nas Figuras 3 e 4, foi usada para a secagem de raspas com resultados satisfatórios. Os principais componentes da unidade são: o coletor solar para aquecimento de ar, um ventilador para movimentar o ar e uma barcaça para colocar o produto.

O coletor solar (Figura 4) consiste de: 1) camada de pedra e tijolos pintados de preto, os quais servem de absorvedor-armazenador de energia; 2) paredes laterais de madeira; 3) tela de arame pintada de branco para sustentar um filme de polietileno transparente que cobre o coletor na parte superior (DOS SANTOS et alii, 1978).

O ventilador de ar deve movimentar quantidades adequadas de ar para que a secagem aconteça antes de apresentar-se deterioração. A vazão de ar é uma função de temperatura e umidade relativa do ar de secagem, sendo que quantidades entre 60 e 100 m³/min-ton são necessárias para condições de secagem nas faixas de 45-20°C e umidades relativas de 20-60%, respectivamente.

A barcaça consiste de uma estrutura de alvenaria de seção transversal retangular, com uma câmara comunicada ao ducto de saída do ventilador e um chão de chapa metálica, furado, sobre o qual as raspas são colocadas para a secagem (Figura 3).

Uma vez colocadas as raspas na barcaça, o ventilador deve-se ligar imediatamente, para iniciar o processo de secagem. Durante os dois primeiros dias é conveniente manter ligado o ventilador durante a noite com o qual se consegue alguma secagem além de manter o produto frio.

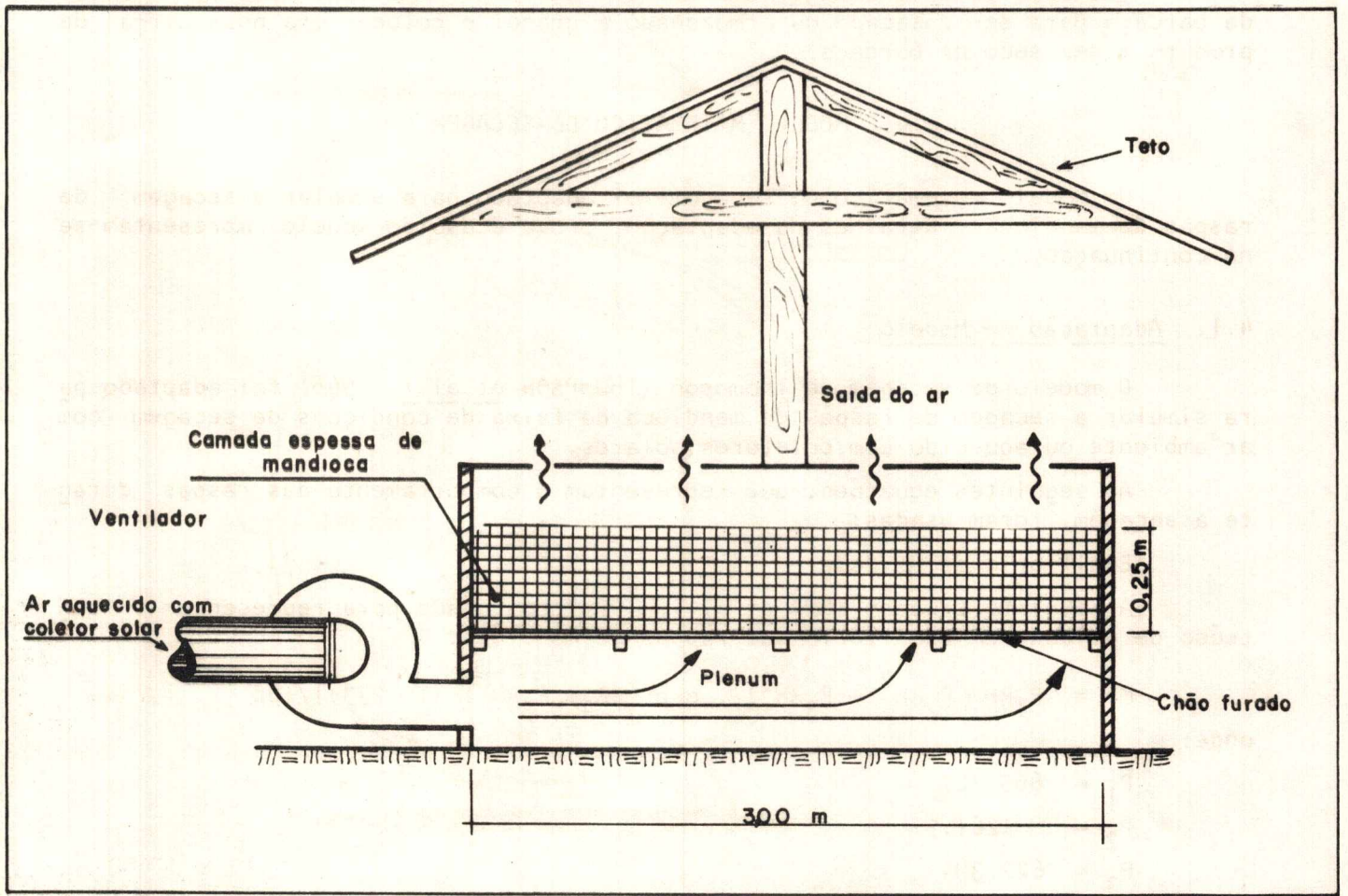


Figura 3 - Esquema da barcaça secadora

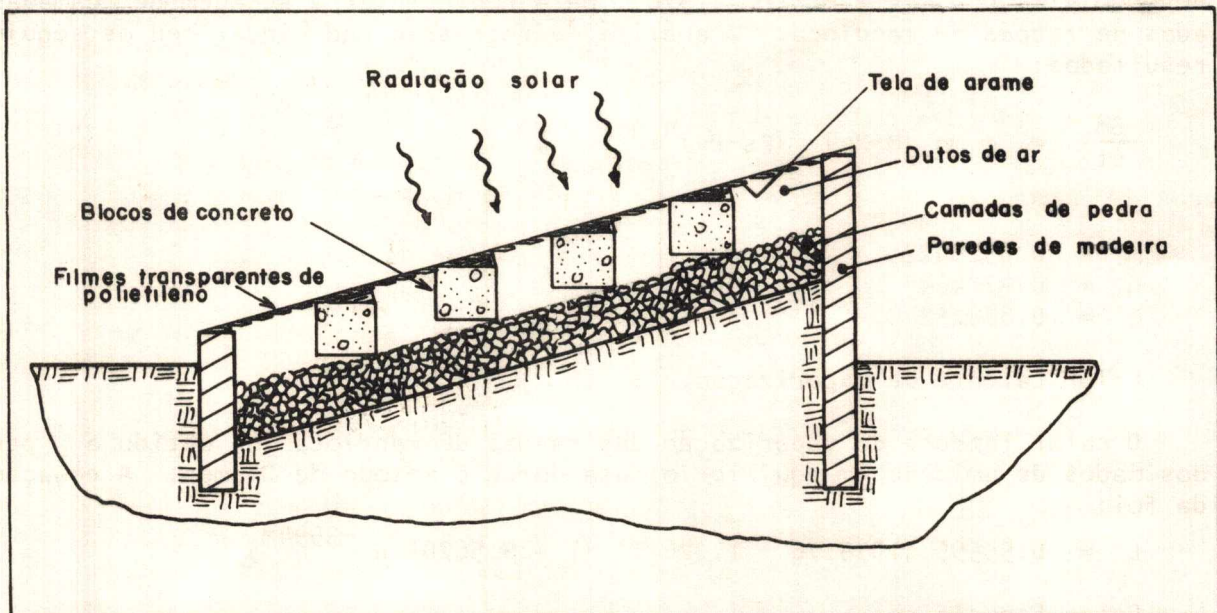


Figura 4 - Coletor solar

Quando o produto atingir uma umidade média de 12 a 13%, pode-se retirar da barça para ser ensacado ou armazenado a granel e colocar uma nova carga de produto a ser seco na barça.

4. MODELO MATEMÁTICO DE SECAGEM

Um modelo matemático de secagem foi adaptado para simular a secagem de raspas de mandioca. Detalhes da adaptação, prova e uso do modelo apresentam-se na continuação.

4.1. Adaptação do Modelo

O modelo de secagem de Thompson (THOMPSON et alii, 1968) foi adaptado para simular a secagem de raspas de mandioca na faixa de condições de secagem com ar ambiente ou aquecido com coletores solares.

As seguintes equações, que representam o comportamento das raspas durante a secagem, foram usadas:

Equilíbrio de Umidade:

A seguinte equação (ROA et alii, 1974) foi usada para representar o conteúdo de umidade em equilíbrio das raspas de mandioca:

$$M_e = (P_1 RH + P_2 RH^2 + P_3 RH^3) \cdot \exp \{ (P_4 + P_5 RH^3) (T + 273) \} / 100$$

onde:

$$P_1 = 665.707$$

$$P_2 = - 1261.97$$

$$P_3 = 622.394$$

$$P_4 = - 0.0085$$

$$P_5 = 0.0155$$

Equações de Secagem em Camada Delgada:

Dados experimentais obtidos no Laboratório de Matérias Primas da UNICAMP na faixa de 25-40°C e umidade relativa entre 30 e 70% foram aplicados a uma equação desenvolvida por ROA e MACEDO (1976), para representar a secagem de camadas delgadas de raspas de mandioca. A análise de regressão não linear deu os seguintes resultados:

$$\frac{\delta M}{\delta t} = - m q (M - M_e) (P_s - P_v)^n t^{q-1}$$

onde:

$$m = 0.0528022$$

$$n = 0.378464$$

$$q = 0.873252$$

Calor Latente de Vaporização:

O calor latente de vaporização das raspas de mandioca foi obtido a partir dos dados de umidade em equilíbrio, usando-se o método de Othmer. A equação obtida foi:

$$L = 0.55555 (1075.76 - 1.026 T) (1 + 9.56201 e^{-3594/M})$$

Calor Específico:

A seguinte equação, representando o calor específico das raspas de mandioca como função do conteúdo de umidade, foi usada:

$$C_p = 0.4 + 0.6 M_u$$

4.2. Prova do Modelo

Para provar o modelo, três toneladas de produto fresco, com 61.61% b.u., foram lavadas e cortadas, usando-se os equipamentos descritos nas seções 3.1. e 3.2., respectivamente. Após as raspas serem produzidas, e colocadas em uma barçaça de 5 x 3 metros, similar àquela descrita anteriormente (Figura 3).

Um ventilador centrífugo foi usado para movimentar o ar através da chapa perfurada (com 2% de área de furos) da barçaça. O ventilador succionava ar que era aquecido ao passar por um coletor solar plano de 60m² (3 x 20) similar àquele ilustrado na Figura 4.

O teste começou a 28 de fevereiro de 1979. Durante a experiência foram realizadas as medições a cada hora da temperatura e umidade relativa do ar que entrava na câmara inferior (plenum) da barçaça. A perda média de umidade do produto, a três profundidades diferentes: 0-10, 10-20 e 20-30 cms, foi determinada por média de pesadas sucessivas, duas vezes por dia, de dois conjuntos de caixas de amostragem colocados em dois lugares diferentes na barçaça. Cada conjunto era formado de três caixas: (0.3 x 0.3 x 0.1 metros cada um), colocadas uma acima da outra. A base de cada caixa individual era fabricada de tela de arame permitindo a passagem do ar através das raspas nelas estocadas.

O ventilador era ligado manualmente e a secagem acontecia durante o período diurno unicamente. A experiência demorou 100 horas (44 das quais aconteceu a secagem). A temperatura e umidade relativa média do ar de secagem durante as 44 horas, foram de 35.2°C a 42.7% respectivamente. O aumento médio da temperatura e o decréscimo da umidade relativa devido ao coletor solar foram de 6.6°C e 18.1% respectivamente.

Na Figura 5 apresenta-se a redução do teor de umidade a diferentes profundidades, durante o período de secagem. Pode-se observar, nesta Figura, que foram necessárias 30 horas para as raspas atingirem um teor de umidade média inferior a 13%. A qualidade do produto foi avaliada de "Excelente" por um fabricante de rações. Na Figura 5 também se apresentam os resultados de simulação matemática quando os seguintes dados foram aplicados ao modelo adaptado: 1) A vazão; 2) a temperatura e umidade relativa do ar de secagem a cada hora; 3) a temperatura e o teor iniciais das raspas. Boa previsão da secagem pelo modelo matemático foi observada.

Uma comparação obtida por simulação, entre a secagem solar e o ar ambiente, é apresentada na Figura 6. Pode-se observar que após 30 horas de secagem o conteúdo de umidade das camadas superiores (20 - 30 cms) era aproximadamente igual à inicial. É provável que a vazão usada (60m³/min-t) não seja suficiente para a secagem das raspas com o ar ambiente (28.6°C e 60.8% de umidade relativa em média) sem que aconteça deterioração significativa nas camadas superiores.

4.3. Uso do Modelo

Na Figura 7 são apresentados tempos de secagem para produzir raspas de 13% de umidade final, a diferentes condições de secagem e diferentes vazões. As condições de secagem foram selecionadas em tal forma que cada condição e o resultado do aquecimento de ar de 25°C e 60% de umidade relativa, mantendo a umidade absoluta constante. Pode-se observar a necessidade de aquecimento do ar (usando coletor solar) para reduzir os tempos de secagem e o risco de deterioração. Por exemplo, precisam-se de 52 horas para secar raspas nas seguintes condições: 25°C 60% de umidade relativa e 60m³/min-t. Quando o ar é aquecido até 45°C, a umidade relativa se reduz a 20%. Nestas condições, para a mesma vazão, o produto seca em 15 horas. Este gráfico serve para dimensionamento dos diferentes elementos do sistema de secagem por convecção forçada.

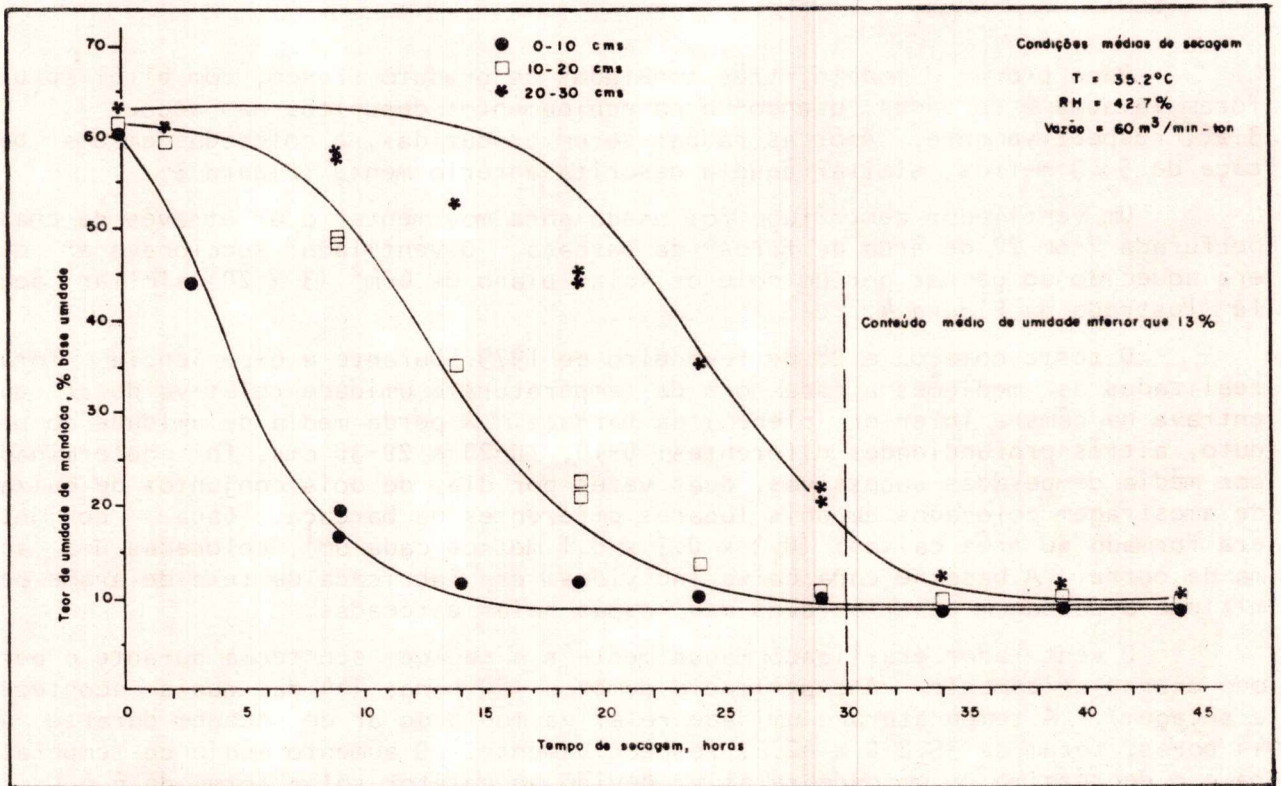


Figura 5 - Resultados experimentais e simulados da secagem de uma camada espessa de mandioca

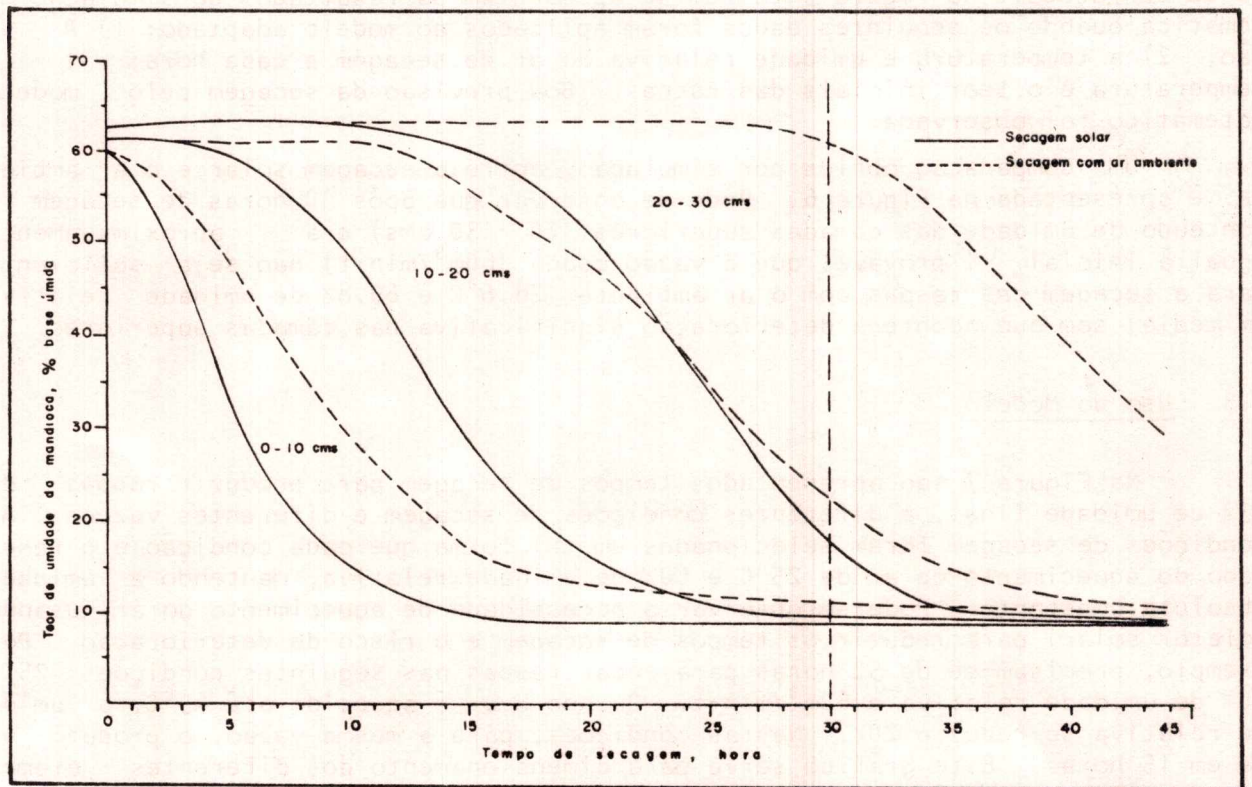


Figura 6 - Comparação simulada entre secagem solar e com ar ambiente de raspas de mandioca

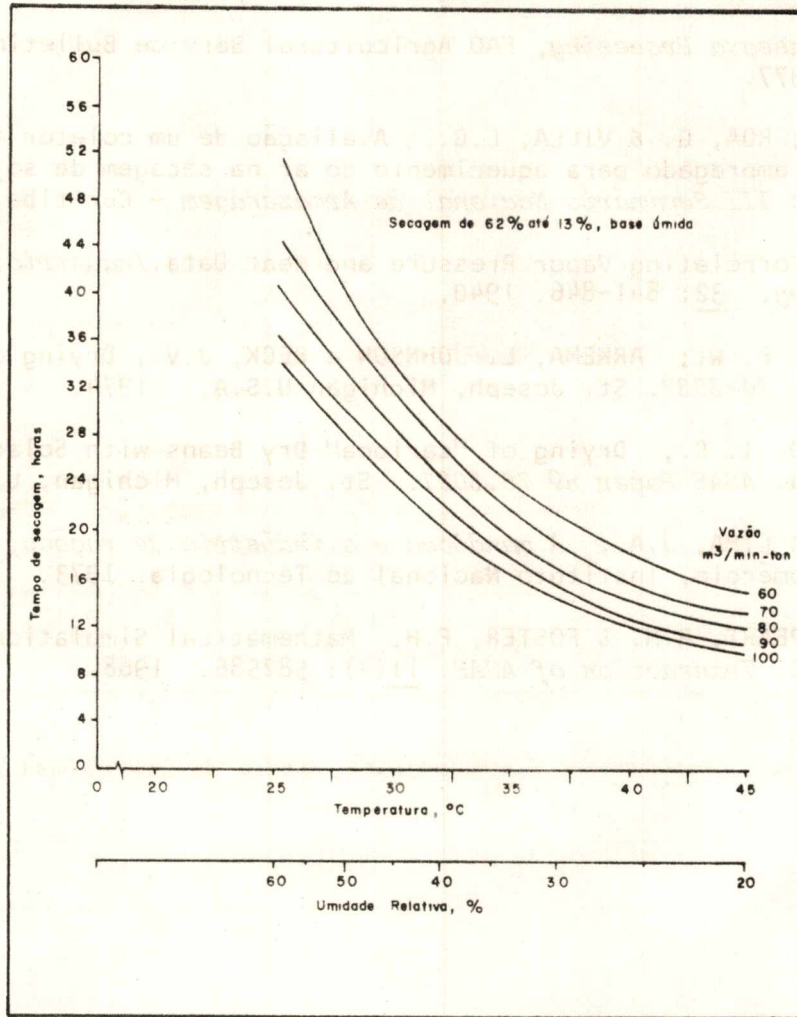


Figura 7 - Tempo de secagem de mandioca para obter raspas com 13% de umidade, a diferentes condições de secagem.

5. CONCLUSÕES

1. Um sistema econômico e simples foi desenvolvido para a secagem de raspas de mandioca para uso na alimentação animal. O sistema faz o uso da ventilação forçada e do aquecimento do ar por meio de coletores solares.

2. Um modelo matemático para prever o processo de secagem das raspas de mandioca foi adaptado a partir dos trabalhos de THOMPSON *et alii* (1968). O modelo apresentou boa previsão de condições experimentais. Pode ser usado para projetar sistemas de secagem de raspas sob condições específicas.

LITERATURA CITADA

- BRAUNBECK, O.; VILLA, L. G. & SILVA, P. da, Redução de tamanho para a secagem de mandioca. 1979. (trabalho não publicado).
- GRACE, M. R., *Cassava Processing*, FAO Agricultural Service Bulletin nº 8. FAO Rome, Italy, 1977.
- DOS SANTOS, L.A.; ROA, G. & VILLA, L.G., Avaliação de um coletor armazenador de energia solar empregado para aquecimento do ar na secagem de soja em silos. Apresentado no III Seminário Nacional de Armazenagem - Curitiba, PR. 1978.
- OTHMER, D. F., Correlating Vapor Pressure and Heat Data. *Industrial and Engineering Chemistry*. 32: 841-846. 1940.
- ROA, G.; BAKKER, F. W.; ARKEMA, L. JOHNSON e BECK, J.V., Drying of Cassava. - *ASAE PAPER* nº 74-3037. St. Joseph, Michigan U.S.A. 1974.
- ROA, G., & MACEDO, I. C., Drying of "carioca" Dry Beans with Solar Energy in a stationary bia. *ASAE Paper* nº 76.3021. St. Joseph, Michigan, U.S.A.
- ROSENTHAL, F.R. & LIMA, J.A., *A mandioca e a indústria de rações*, Ministério de Indústria e Comércio, Instituto Nacional de Tecnologia. 1973.
- THOMPSON, T.L., PEART, R.M. & FOSTER, F.H. Mathematical Simulation of Corn Drying *A Model. Transaction of ASAE* 11(4): 582586. 1968.