

JOAQUIN ERNESTO ROSA ROMERO

PROJETO, CONSTRUÇÃO E ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM SECADOR
DE ESTEIRA DE FLUXOS CRUZADOS, PARA BAGAÇO DE CANA.

Dissertação apresentada ao Curso
de Mestrado em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal da Paraíba,
em cumprimento às exigências para
obtenção do Grau de Mestre.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETO DE PRODUTO MECÂNICO

ORIENTADORA : PROF^a ODELSIA LEONOR SANCHEZ DE ALSINA

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

JANEIRO / 1988

54
Dip. 621.631.823.2(043)



R763p	Romero, Joaquín Ernesto Rosa. Projeto, construção e estudo do desempenho de um secador de esteira de fluxos cruzados, para bagaço de cana / Joaquín Ernesto Rosa Romero. - Campina Grande, 1988. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1988. "Orientação : Profa. Dra. Odelsia Leonor Sanchez de Alsina". Referências. 1. Secagem - Cana-de-Açúcar - Bagaço- Engenharia Mecânica. 2. Secador de Esteira de Fluxos Cruzados. 3. Produto Mecânico - Projeto. 4. Dissertação - Engenharia Mecânica. I. Alsina, Odelsia Leonor Sanchez de. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título
-------	---

CDU 621:631.563.2(043)

PROJETO, CONSTRUÇÃO E ESTUDO DO DESEMPENHO DE UM SECADOR
DE ESTEIRA DE FLUXOS CRUZADOS, PARA BAGAÇO DE CANA.

JOAQUIN ERNESTO ROSA ROMERO

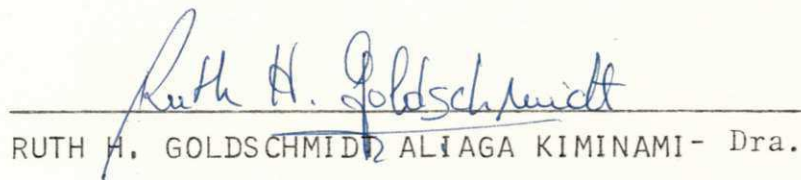
DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 20 / 01 / 1988



ODELSIA LEONOR SANCHEZ DE ALSINA - Dra.



CLAUDIO SHYINTI KIMINAMI - Dr.



RUTH H. GOLDSCHMIDT ALIAGA KIMINAMI - Dra.

CAMPINA GRANDE - PARAÍBA

JANEIRO / 1988

DEDICATÓRIA

A DEUS

Por ter dado saúde e sabedoria para chegar à meta dese_
jada.

A meus Pais, Irmãos e Esposa, pelo amor
e apoio à realização deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

À Dra. ODELSIA LEONOR SANCHEZ DE ALSINA, professora do Curso de Engenharia Química, por sua ajuda e interesse na orientação, desenvolvimento, planificação e correção deste trabalho.

Ao professor MARCINO DIAS DE OLIVEIRA JÚNIOR, Mestre em Engenharia Mecânica e Professor do Curso de Engenharia Mecânica da UFPb, pelas sugestões e incentivo.

Ao pessoal técnico

Do Laboratório de Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, pela contribuição prestada durante a construção do protótipo.

Aos alunos

Do curso de Engenharia Química: Líbia, Hélio e Germano pela cooperação durante os ensaios realizados.

Ao Dr. Luiz Magno, Diretor proprietário do Engenho Macaíba, que forneceu o bagaço necessário para a realização das experiências.

A todos

Que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Este trabalho, diz respeito ao projeto, construção e estudo do desempenho de um equipamento em escala piloto para secagem de bagaço de cana (subproduto das usinas de açúcar, destilarias e engenhos).

O bagaço de cana se encontra na saída das moendas com 50 a 55% de umidade em base úmida: por essa razão faz-se necessário a utilização de um sistema de secagem viável para sua posterior utilização como combustível e/ou matéria prima na indústria de papel e celulose, ração animal, furfural, aglomerados, etc.

Com base em resultados de outros autores (VALENÇA e MASSARANI, 1982) foi projetado um secador de esteira em escala reduzida para bagaço de cana. São apresentadas as hipóteses utilizadas no dimensionamento do secador. Comparado com outros tipos de secadores para bagaço, as principais vantagens do equipamento proposto são: opera a baixa pressão, simplicidade de controle operacional, menor custo. Estas características o tornam adequado especialmente para engenhos e pequenas unidades.

O comportamento experimental do secador piloto foi analisado mediante um modelo simplificado obtendo-se os parâmetros que caracterizam o seu desempenho operacional.

A modelagem matemática foi utilizada para dimensionar e otimizar um protótipo em escala industrial. As experiências aqui apresentadas permitem antecipar uma razoável eficiência na secagem com baixo consumo de potência.

ABSTRACT

This work is related to a project of construction and study of the performance of an equipment in pilot scale for drying sugarcane bagasse (by-product of sugar mills and distilleries in general). The sugarcane bagasse at outlet of grinder contains 50 to 55% humidity in humid base; which makes necessary to utilize a drying system for its later use as fuel and for raw material for paper and cellulose industry, animal allowance, furfural, agglomerated etc.

A conveyor dryer, based on the results of other authors (VALENÇA e MASSARANI, 1982) was projected on a reduced scale for sugarcane bagasse. The hypothesis utilized in the dimensioning of the dryer are presented. Compared with other types of dryers for sugarcane bagasse, the main advantages of the proposed equipment are: operates at low pressure, simple operational control and low cost. These characteristics make it adequate specially for minidistilleries and other small units. The experimental behaviour of the pilot dryer was analysed by means of simplified model for obtaining the parameters which characterize its operational performance, the mathematical modelling was used for dimensioning and optimizing a prototype on industrial scale. The experiments presented permit to anticipate a reasonable efficiency in drying with a low power consumption.

SIMBOLOGIA

- A - Largura da esteira (m)
- b_s - Na base seca (%)
- b_u - Na base úmida (%)
- C - Capacidade de processamento de bagaço seco por unidade de área ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
- c_g - Calor específico do gás ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$)
- C' - Constante da equação 5.8 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)¹⁻ⁿ m^{-1}
- c - Constante da equação 5.12 (m^2/s)
- C_h - Condutividade hidráulica (s^{-1}), equação 2.5
- D - Difusividade total (m^2/s)
- D_0 - Coeficiente de difusão líquida para $c = 0$ (m^2/s)
- d - Densidade real da água (kg/m^3)
- d_1 - Densidade parcial da água (kg/m^3)
- dw/d_0 - Velocidade de secagem (kg de água/s.kg de sólidos secos)
- E - Espessura do leito do bagaço (m)
- e - Energia de ativação (J kg^{-1})
- G - Velocidade mássica do gás de secagem ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)
- h - Coeficiente volumétrico de transmissão de calor ($\text{J}/\text{s} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{K}$)

- H - Umidade absoluta do ar
- H_g - Umidade do gás de secagem (massa de água/massa de ar seco)
- H_r - Umidade relativa do ar
- H_{ss} - Umidade de saturação do gás de secagem, à temperatura superficial da substância a secar (kg/kg)
- J - Fluxo capilar líquido, equação 2.5
- K - Permeabilidade do meio poroso (m²)
- L - Comprimento do secador (m)
- M_A - Peso molecular da água
- M_B - Peso molecular do ar
- m - Massa do ar no cilindro 1, figura 4.1 (kg)
- m₁ - Nova massa de ar no cilindro 1, figura 4.1 (kg)
- m₂ - Massa de ar no cilindro 2, figura 4.1 (kg)
- P_a - Pressão de vapor do líquido na temperatura do gás (Pa)
- P_a - Pressão parcial do vapor (Pa)
- P_T - Potência total por unidade de área no secador (W/m²)
- P_{T(+)} - Potência ganha (W/m²)
- P_{T(-)} - Potência perdida (W/m²)
- P - Pressão capilar (Pa)
- P₁ - Pressão no cilindro 1, figura 4.1 (Pa)
- P₂ - Pressão no cilindro 2, figura 4.1 (Pa)

- P_i - Peso inicial da amostra (kg)
- P_f - Peso final da amostra (kg)
- P_s - Pressão parcial de saturação do vapor à temperatura da superfície de secagem (Pa)
- P_v - Pressão parcial de saturação do vapor de água à temperatura de bulbo úmido (Pa)
- Q - Vazão do ar de secagem (m^3/s)
- q - Constante da equação 2.3
- r - Coordenada espacial (raio, m), equação 2.3
- R - Constante de vapor de água ($J\ kg^{-1}\cdot K^{-1}$)
- S - Saturação do sólido
- St - Número de Stanton volumétrico
- t - Tempo de residência (s)
- T - Temperatura (K)
- T_o - Temperatura de entrada do gás (K)
- T_E - Temperatura de saída do gás (K)
- T_s - Temperatura de bulbo úmido (K)
- U - Teor de umidade do bagaço
- U_o - Umidade média inicial
- U_s - Umidade média final
- U^+ - Relação de umidade (bs) decimal
- U - Teor de umidade média no corpo (bs) decimal
- V_i - Velocidade intersticial da água, equação 2.6 (m/s)

- V_1 - Volume do ar no cilindro 1, figura 4.1 (m^3)
- V_2 - Volume de ar no cilindro 2, figura 4.1 (m^3)
- W - Taxa de secagem por unidade de área do secador ($kg/m^2.s$)
- X - Altura do ponto em relação à base do meio poroso (m)
- Z - Coordenada vertical da camada de bagaço (m)
- ΔT - Diferença de temperatura entre o gás e o sólido (K)
- $\Delta p.c.i$ - Ganho do poder calorífico inferior (J/kg)
- ξ - Porosidade
- ρ_a - Densidade aparente do leito (kg/m^3)
- ρ_s - Densidade aparente do leito de bagaço seco (kg/m^3)
- η - Fator de secagem
- λ - Calor latente de vaporização (J/kg)
- μ - Viscosidade do gás ($kg/m.s$)
- ρ - Densidade do gás (kg/m^3)

ÍNDICE

	Página
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Secagem de Bagaço	1
1.2 - Tipos de Secadores Utilizados	4
1.3 - Objetivos do Trabalho	6
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 - Utilização de Bagaço como Combustível	7
2.2 - Teorias de Secagem	13
2.2.1 - Definições básicas	13
2.2.2 - Diagrama psicrométrico	14
2.2.2.1 - Temperatura do bulbo úmido	14
2.2.3 - Teoria de Secagem	15
2.2.3.1 - Teoria da difusão líquida	16
2.2.3.2 - Teoria capilar	17
2.2.4 - Secagem a taxa constante	19
2.2.4.1 - Período de velocidade de crescente	20
2.3 - Secadores	21
2.3.1 - Secadores diretos	21
2.3.1.1 - Contínuos	22
2.3.1.1.1 - Tipos diretos contínuos	22

	Página
2.3.1.2 - Descontínuos	23
2.3.1.2.1 - Tipos diretos descontínuos.	23
2.3.2 - Secadores indiretos	24
2.3.2.1 - Contínuos	24
2.3.2.2 - Descontínuos	25
CAPÍTULO III- PROJETO, CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DOS COMPONENTES DO SECADOR PARA BAGAÇO DE CANA	
3.1 - Projeto	26
3.2 - Descrição do Sistema de Secagem	27
3.3 - Construção	28
3.3.1 - Secador	28
3.3.1.1 - Sub-sistema de injeção de ar	29
3.3.1.2 - Sub-sistema de aquecimen- to	29
3.3.1.3 - Sub-sistema de controle	29
CAPÍTULO IV- MATERIAIS E MÉTODOS	
4.1 - Material Utilizado	35
4.2 - Métodos Utilizados	38
4.2.1 - Determinação da umidade do bagaço . Método do dessecador infra-vermelho LP-15	39

	Página
4.2.2 - Determinação da Umidade Absoluta e a Umidade Relativa do Ar	40
4.3 - Procedimento Operacional do Secador	40
CAPÍTULO V - RESULTADOS E DESEMPENHO DO SECADOR PILOTO	44
5.1 - Resultados Experimentais	44
5.2 - Modelagem do Secador	45
5.2.1 - Efeito da espessura no número de Stanton	47
5.2.2 - Efeito da velocidade mássica no número de Stanton	48
5.3 - Dimensionamento do Protótipo	49
5.4 - Otimização do Protótipo	51
CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES	67
CAPÍTULO VII- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS. . . .	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
APÊNDICE "A"- Porosidade e densidade aparente do leite de bagaço para diversos níveis de umidade	75
APÊNDICE "B"- Tabelas de dados obtidos no secador de bagaço de cana	80
APÊNDICE "C"- Programa de Computação com Subrotina	

para o Cálculo da Umidade Absoluta e
a Umidade Relativa do Gás de Secagem. 99

APÊNDICE "D"- Programa de Computação com Subrotina
para o Cálculo do Dimensionamento de
um Secador de Esteira 106

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 - Secagem de Bagaço

A atual situação energética do nordeste brasileiro, que força às indústrias da região ao racionamento compulsório de energia, há muito tempo poderia ter sido amenizada se todos os recursos técnicos e disponíveis fossem racionalmente utilizados.

Segundo, GUILHON, (1980) o bagaço de cana no campo da biomassa, é aquele que reúne os melhores atributos econômicos para ser industrializado e competir comercialmente com o óleo combustível. Uma das alternativas é utilizar o bagaço de cana residual como co-produto do álcool que traria sensível aumento de até 74% ao rendimento termoenergético da cana sem nenhum investimento agrícola.

A secagem do bagaço de cana, aproveitando o conteúdo energético dos gases da chaminé, permite melhorar as suas características para uso como combustível, trazendo como vantagens o aumento do poder calorífico inferior, tornando a combustão mais eficiente pelo aumento da sua temperatura e reduzindo a quantidade de sólidos não queimados (MARANHÃO, 1980).

Por sua vez OLIVEIRA (1980), utiliza o bagaço

de cana na obtenção de energia térmica. Sobre o calor calórico do bagaço que, logicamente, varia na conformidade da maior ou menor umidade nele contida, é reproduzida, a escala abaixo proposta por NORRIS (Bol. nº 40, Est. Exp. Hawai). Informação de CUNHA BAYMA (Tecnologia do Açúcar), coleção canavieira, IAA, 1974.

UMIDADE (%)	VALOR CALORÍFICO POR kg DE BAGAÇO (Joules)
42	7262,41
43	7095,30
44	6921,22
45	6960,68
46	6580,04
47	6424,53
48	6236,53
49	6067,09
50	5895,34
51	5716,62

Outra das alternativas é utilizar o bagaço de cana na obtenção de energia elétrica em pequenas estações geradoras para fornecimento em escala residencial e comercial.

O cálculo para o estabelecimento da potência em Watts necessários ao funcionamento de uma usina ou destilaria se estabelece em função de sua capacidade de moagem, assim 2,5

a 14,0 pés quadrados de superfície calorífica, por tonelada de capacidade de moagem, produzem 1,20 a 1,40 cavalos nominais de vapor (SPENCER In CUNHA BAYMA, 1974).

A composição física do bagaço, na medida de opinião dos autores consultados, obedece aos seguintes padrões:

UMIDADE	FIBRA	SÓLIDOS SOLÚVEIS	CELULOSE	PENTOSANA	CINZAS
44,0 a 52,0%	43,0 a 52,0%	2,0 a 6,0%	35,0%	32,0%	4,0%

Quanto à composição química, CUNHA BAYMA, em sua obra "Tecnologia do Açúcar", reúne os resultados das análises de seis autores consagrados e estabelece a média desses resultados, como é mostrado a seguir:

ELEMENTOS	N.Deer	Tromp Isj.38	Kelly Fas-38	V.M. ISJ	Gregory FAS	Davies ISJ-47	Média
Carbono (C)	46,5	44,0	41,5	47,5	49,0	47,5	48,1%
Hidrogênio(H)	6,5	6,0	6,0	6,1	7,4	6,7	6,1%
Oxigênio (O)	46,0	48,0	43,0	44,4	41,8	45,4	43,3%
Cinzas	1,0	2,0	2,2	2,0	2,5	-	2,5%

Com umidade superior a 50% do seu peso, o bagaço não queima bem porque dificulta a penetração do ar necessário à combustão por entre as grelhas das fornalhas e provoca a formação de hidrocarbonetos nocivos à utilização normal do combustível.

Com essas características, o bagaço, é utilizado pelas usinas de açúcar e destilarias de álcool para a produção de energia térmica e, por vezes termoelétrica, sendo uma

fonte viva de celulose tem, ainda, múltiplas outras utilidades, como a fabricação de papel de aglomerados e painéis para construção, de carvão em blocos, de plásticos diversos, furfural, de adubo etc.

1.2 - Tipos de Secadores Utilizados

Secadores de tambores rotativos. Fabricantes: Sterns-Roger, Rader-Thompson, Rotary Dryer, Mec Company e outros. Todos operam com o mesmo princípio da simples ou múltipla passagem dos gases quentes em paralelo bagaço a secar, dentro de um tambor rotativo semelhante ao de um secador de açúcar. O bagaço seco é separado dos gases úmidos em um ciclone de grande diâmetro. São secadores de baixa eficiência, ocupam grande espaço. MARANHÃO (1983).

Secadores de bagaço em suspensão com colunas de secagem. Podemos classificar neste tipo os seguintes secadores: SPM - Pawert Corporation - Suíça, FRED - Hausmann - Suíça, COPERSUCAR - Brasil. São secadores bem mais eficientes do que os de tambores rotativos, pois utilizam colunas de secagem onde o bagaço é levado pela corrente de gás quente, e depois de seco é separado dos gases úmidos em um ou dois ciclones. Existem instalados SPM, na África do Sul, Venezuela, Madagascar e Filipinas; FRED - Hausmann nas Filipinas, e o COPERSUCAR está instalado na Usina Barra Grande em São Paulo. MARANHÃO (1983).

Secador individual de bagaço. Este secador CEMASA, foi desenvolvido na Usina Santo Antonio, MARANHÃO (1980),

em Alagoas, onde já existem 4 unidades instaladas, devendo secar na safra 70% de todo seu bagaço produzido.

Os gases quentes são succionados antes ou após o pré-aquecedor de ar, e impulsionados por um ventilador auxiliar até à parte frontal da caldeira, por um duto subterrâneo.

O bagaço úmido cai por gravidade do distribuidor normal de bagaço, passa em um alimentador, que sela a entrada de ar falso, e em vez de seguir para os espargidores, é desviado por uma portinhola de by pass, para caixa de mistura de bagaço com os gases quentes. Daí o bagaço meio disperso, é succionado por um ventilador auxiliar, que eleva a mistura através da coluna de secagem até ao ciclone, onde os gases úmidos são separados do bagaço seco.

Os gases úmidos seguem para a chaminé através de grande diâmetro, com temperatura variável entre 348,15 K e 368,15 K. O bagaço seco cai por gravidade no cano do ciclone e sai do mesmo por uma válvula rotativa, bloqueadora de ar, até o espargidor, que alimenta à fornalha.

Secador em leito deslizante para bagaço de cana. O sistema proposto para secagem do bagaço de cana, consiste basicamente de um silo vertical de 2,0m de comprimento, 0,5m de largura e 6,0m de altura, no qual o bagaço desloca-se por gravidade, em leito deslizante.

A descarga do silo é regulada através de uma válvula rotativa e gás de secagem percola o leito de bagaço na direção normal à do escoamento do sólido.

Trata-se de um secador de leito deslizante e fluxos cruzados, MASSARANI e VALENÇA (1982).

1.3 - Objetivos do Trabalho

Será projetado, dimensionado e construído um secador de esteira horizontal em escala piloto. O esquema do secador contínuo proposto, apresenta as seguintes vantagens:

- Operação simples
- O gás escoar a baixa pressão
- Flexibilidade em relação à altura do colchão de bagaço
- Grau de compactação uniforme ao longo do secador
- Flexibilidade em relação ao tempo de residência para um dado tamanho de secador.

Os ensaios realizados no secador em escala reduzida, permitirão avaliar o seu desempenho e levantar os parâmetros necessários para o projeto e construção de um secador em escala industrial.

O secador operará em forma contínua, com fluxo cruzado de ar. A alimentação e descarga do bagaço será por gravidade e o tempo de residência regulado pela velocidade da esteira.

A altura de camada de bagaço será regulada mediante uma comporta ajustável.

Serão determinados os parâmetros de secagem mediante experiências realizadas no secador piloto, utilizando ar como gás de secagem. As variáveis que serão consideradas, são a altura do leito, a vazão, o tempo de residência, e a temperatura do ar.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Utilização de Bagaço como Combustível

Após extensa pesquisa bibliográfica e revisão de inúmeros trabalhos existentes sobre o assunto a ser tratado, temos:

MARANHÃO e COSTA (1981), relatam que nos dias de hoje em que a crise de energia está cada vez mais influenciando nos custos de produção das empresas, não é admissível que se continue a ver, lançadas pelas chaminés das indústrias, perdas de calor correspondentes a valores que vão desde 33,93% até 21,04% do poder calorífico inferior disponível no bagaço, quando esta perda pode ser facilmente reduzida a 10%.

SANTOS e LEITÃO (1979), discutem, inicialmente, previsões para o crescimento da demanda mundial e brasileira de energia, face a nova situação mundial após a crise de petróleo em 1973. A importância das diversas fontes de energia também é analisada, mostrando-se, em particular, a situação em nosso País e suas perspectivas a curto e longo prazo.

As principais fontes de energia complementares ao petróleo a partir de recursos vegetais, minerais e outros são debatidos com mais detalhe, principalmente quanto à produção

de álcool etílico a partir de matérias primas vegetais.

COSTA, (1983) - (1984), faz uma avaliação do procedimento para execução de balanço térmico onde o objetivo final seja a economia de bagaço, para eliminar a utilização de combustíveis comprados a terceiros ou comercialização dos excedentes.

A análise é feita com base em tecnologia atual já dominada pelo setor, procurando sempre descrever em primeiro lugar as providências que não impliquem em grandes investimentos para compra de equipamentos evoluindo posteriormente para as soluções mais complexas, sem levar em consideração as possibilidades de retorno financeiro que dependem das condições do mercado e das dificuldades peculiares a cada indústria.

O estudo do balanço térmico em usinas de açúcar e destilarias autônomas é um hábito comum, nas entressafras para correção de problemas anteriores ou para adaptar o sistema a uma situação nova, e em novos projetos visando a determinação de equipamentos a adquirir.

Nos últimos anos, o aumento no preço dos derivados do petróleo e a crise econômica mundial provocaram rápidas mudanças no panorama energético das usinas de açúcar. É estudada uma das alternativas de melhora de balanço térmico que é a secagem de bagaço.

OLIVEIRA, (1980), acredita que a agroindústria canavieira poderá se auto-abastecer de combustível com o uso exclusivo do bagaço de cana moída para a produção de energia térmica e termoelétrica, minimizando no setor os

efeitos da crise internacional do petróleo, desde que as empresas proprietárias de usinas e destilarias, bem como a classe de fornecedores de cana, se conscientizem da necessidade de adaptação de suas frotas de veículos ao consumo de álcool, combustível que, afinal é produto resultante de suas próprias atividades específicas.

GUILHON, (1980), no campo da biomassa residuais o bagaço de cana pelas condições como se apresenta, é a que reúne os melhores atributos econômicos para ser industrializada e competir comercialmente com o óleo combustível. O aproveitamento racional do bagaço residual como co-produto do álcool traria: sensível aumento de até 74% ao rendimento termo-energético da cana sem nenhum investimento agrícola ; tendência para manter o equilíbrio do refino gasolina/óleo combustível; facilidade à substituição do óleo combustível nas pequenas e médias indústrias com o menor investimento na adaptação do equipamento, uma vez que os gases da combustão são praticamente isentos de enxofre e outros poluentes e a quantidade de cinzas cerca de 3,0 a 5,0%.

MEDEIROS e MASSARANI, (1982), falam sob a secagem de bagaço de cana recém-esmagada é analisada como uma versão simplificada do problema de secagem em meios porosos semi-infinitos com água livre.

As equações de conservação em uma dimensão são resolvidas com algoritmos numéricos e os parâmetros da modelagem estimados aproximadamente mediante a análise de dados de corridas de secagem conduzidos em laboratório.

MEDEIROS e MASSARANI, (1983), a simulação em regime

estacionário de um secador de bagaço de cana em leito deslizante, com fluxo de gás quente cruzado, em múltiplos passos, é conduzida mediante a resolução numérica das equações diferenciais de conservação de massa e energia adequadas ao problema.

O objetivo da simulação é o estabelecimento dos perfis de temperatura e umidade das fases que são contactadas na unidade, tendo em vista o projeto e a análise do desempenho de secadores desse tipo.

MEDEIROS *et alii* (1983). A configuração de secagem em fluxos cruzados de gás e grãos são simulados por resolução aproximada das equações de conservação de massa e energia.

Os resultados obtidos, distribuições bidimensionais de umidade e temperatura, são comparados em termos de aproveitamento da capacidade de secagem do gás e uniformidade de umidade no produto final.

COUTINHO *et alii* (1982). A redução do teor de umidade, através da secagem, é uma das mais importantes operações no processamento de grãos, preservando-lhes a qualidade e valor nutritivo para consumo como alimento garantindo a germinação como semente.

No trabalho apresenta-se um modelo matemático que representa a secagem de grãos em fluxo cruzado. Utilizando grãos de soja, são realizados ensaios em escala reduzida de laboratório a fim de se comprovar o modelo e estimar alguns parâmetros do processo.

Segundo MARANHÃO (1980) e MARANHÃO (1983), a secagem de bagaço de cana, apresenta entre outras vantagens o aumento

to do poder calorífico, diminuição de excesso de ar necessário à combustão, diminuição da poluição e a possibilidade de queima em suspensão.

Os secadores de bagaço instalados no Brasil, operam em transporte pneumático com consumo de energia elevado, porém, MARANHÃO, afirma que a utilização deste tipo de secadores é vantajosa, visto que a unidade instalada na usina Santo Antonio Alagoas, tem apresentado desempenho satisfatório.

Diferentes tipos de secadores tem sido utilizados para esse fim como os de transporte pneumáticos estudados por MARANHÃO (1980), NEBRA e MACEDO (1986). Por outro lado VALENÇA e MASSARANI (1982), tem desenvolvido, um secador de bagaço de leito deslizante e fluxos cruzados, para ser instalado na Usina Capricho em Alagoas. O projeto da EPASA-CO PETEC, com financiamento do FIPEC (Fundo de Incentivo a Pesquisa), teve como objetivo desenvolver um secador de operação mais simples, que exigira menos investimento e menor consumo de energia e que acarretasse poucas modificações na tiragem caldeiras, comparativamente, aos secadores de tambor rotatório e transporte pneumático.

O secador proposto por MASSARANI e VALENÇA (1984), consiste basicamente, num silo vertical, de seção retangular, no qual o bagaço desliza por gravidade. Partindo dessa idéia, estuda-se o desempenho de um secador de esteira para bagaço de cana em modelo reduzido, horizontal e de operação contínua, com o objetivo de contribuir para o desenvolvimento de secadores de bagaço alternativos. Pensa-se que o modelo que

está sendo proposto pode apresentar vantagens, dependendo do desempenho, ROMERO e ALSINA (1986).

NEBRA e MACEDO (1986), desenvolveram um modelo teórico de secagem aplicável a um secador pneumático construído por um injetor, uma coluna e um ciclone, funcionando com mistura de tamanhos e formas de partículas. Como é conhecido, os sistemas pneumáticos têm o problema do curto tempo de permanência das partículas, no caso de partículas grandes, aparentemente o ciclone exerce uma influência decisiva na secagem, aumentando os tempos de permanência no sistema das partículas de maior tamanho.

Em relação ao modelo de secagem no ciclone apresentado aqui, ele deve ser encarado como um primeiro modelo que deve e pode ser melhorado, baseado em forte pesquisa experimental a nível de laboratório, tanto no que faz ao modelo de fluxo das partículas quanto ao de transferência de calor e massa partículas-gás.

RAGAJOPAL (1983), métodos diferentes de secagem são propostos usando secadores rotativos, vibradores, leitos fluidizados, leitos deslizantes. As vantagens de secar bagaço antes de usá-lo como combustível são bem conhecidos, o poder calorífico aumenta, e a combustão torna-se mais eficiente. O estudo mostra as vantagens de produzir vapor de água de processo como sub-produto na secagem de bagaço.

THYGESSON e GROSSMANN (1970), apresentam um modelo matemático muito simples que segundo resultados obtidos, se adapta muito bem ao nosso secador para bagaço de cana em desenvolvimento, e ao mesmo tempo espera-se obter resultados

satisfatórios do mesmo.

2.2 - Teoria de Secagem

2.2.1 - Definições básicas (PERRY e CHILTON, 1980)

A SECAGEM refere-se, em geral, à remoção de um líquido de um sólido por evaporação.

UMIDADE LIGADA NUM SÓLIDO, é o líquido cuja pressão de vapor é menor que o do líquido puro na mesma temperatura. O líquido pode estar ligado por retenção em pequenos capilares, por solução em paredes de células ou por adsorção química ou física nas superfícies sólidas.

UMIDADE LIVRE, num material higroscópico, é a umidade que está em excesso face ao teor de umidade em equilíbrio correspondente à umidade de saturação. Toda a água num material não-higroscópico é umidade livre.

UMIDADE ABSOLUTA E A UMIDADE RELATIVA:

- A umidade absoluta (H) do ar, é o número de quilogramas de vapor de água contidos num quilograma de gás livre de vapor. Com esta definição a umidade absoluta do ar depende somente da pressão parcial da água na mistura. Quando a pressão total estiver fixada para a pressão de 1 atmosfera, a pressão parcial de vapor de água é, por conseguinte:

$$P_a = \frac{(H \cdot M_B)}{(H \cdot M_B + M_A)} \quad (2.1)$$

Sendo M_A e M_B , os pesos moleculares da água e do ar, respectivamente.

A umidade relativa é definida pela equação:

$$H_r = \frac{P_a}{P_a} \cdot 100\% \quad (2.2)$$

Sendo P_a igual à pressão parcial do vapor e P_a , a pressão do vapor do líquido na temperatura do gás. Geralmente se expressa sobre uma base percentual, de forma que a umidade de 100%, corresponde a um gás saturado e a 0,0% um gás seco. (PERRY e CHILTON, 1980).

2.2.2 - Diagrama psicrométrico

O diagrama psicrométrico oferece informações sobre a umidade, sobre a saturação relativa, sobre a temperatura de bulbo úmido e sobre o calor úmido ou sobre a entalpia total, a partir de grandezas que se podem medir com facilidade como as temperaturas de bulbo seco e temperaturas de bulbo úmido.

De importância primordial no diagrama de umidade são as curvas de saturação e as curvas de umidade percentual, ou relativa, constantes. A curva de saturação está diretamente relacionada com a curva de pressão de vapor. As linhas de saturação percentual constante, ou de saturação relativa constante têm curvaturas semelhantes. Quando se plotam as linhas de saturação percentual constante, elas caem sobre ordenadas que são diretamente proporcionais às ordenadas da curva de saturação na mesma temperatura.

2.2.2.1 - Temperatura do bulbo úmido

Um dos métodos mais antigos, e ainda um dos mais comuns, de medição da umidade de uma corrente gasosa é o da medida simultânea da temperatura de bulbo úmido e da temperatura real da corrente.

A medida é realizada passando-se o gás rapidamente pela ponta de um termopar que se mantém úmido com o líquido que forma o vapor presente na corrente gasosa.

Usualmente, a ponta do termopar fica envolta numa mecha saturada de líquido. Durante o processo, se o gás não estiver saturado, parte do líquido é evaporado da mecha do termopar e passa para a corrente gasosa, levando consigo o calor latente de vaporização associado à mudança de fase.

Esta liberação de calor latente provoca um abaixamento da temperatura do termopar e da mecha, com a que haverá transferência de calor sensível para a superfície da mecha por um processo de convecção da corrente de gás e também pela radiação das vizinhanças.

2.2.3 - Teoria de secagem

Quando um sólido é seco experimentalmente, os dados obtidos relacionam usualmente o teor de umidade em função do tempo. Estes dados são então plotados como teor de umidade (em base seca) U_{bs} contra o tempo t . Esta curva representa o caso geral, quando o sólido inicialmente perde umidade por evaporação da superfície saturada cuja área diminui gradualmente e, pela evaporação da água no seu interior. Dois períodos podem em geral serem observados: de taxa constante

e decrescente.

2.2.3.1 - Teoria da difusão líquida

Os primeiros trabalhos de importância no campo da cinética de secagem foram desenvolvidos por SHERWOOD (1929, 1930, 1932), que propõe explicitamente que o movimento de água dentro de um sólido ocorre por um mecanismo de difusão líquido, permitindo a aplicação da lei de Fick para prever a velocidade de secagem de materiais, expressada como:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{1}{r^q} \frac{\partial}{\partial r} \left(D r^q \frac{\partial U}{\partial r} \right) \quad (2.3)$$

em que:

U = teor de umidade (b.s)

D = coeficiente de difusão líquida (m²/s)

r = coordenada espacial

q = 0, para placa plana

q = 1, para cilindro

q = 2, para esfera.

Em geral, o coeficiente de difusão líquida é considerado constante e às vezes dependente da temperatura, segundo uma equação do tipo Arrhenius:

$$D = D_0 \text{Exp} (-e/RT) \quad (2.4)$$

em que:

D₀ = coeficiente de difusão para e = 0 (m²/s)

e = energia de ativação ($J\ kg^{-1}$)

R = constante do vapor de água ($0,4620\ Jkg^{-1}\ K^{-1}$).

2.2.3.2 - Teoria capilar

CEAGLSKE e HOUGEM (1937) e COMINGS e SHERWOOD (1934), postulam que na secagem de sólidos granulares o fluxo de água está totalmente determinado por forças capilares e é independente da concentração de água. Consideram que a umidade contida nos interstícios e na superfície do sólido está sujeita a movimentos por gravidade e capilaridade.

Um material poroso possui uma estrutura interior muito complexa, formada por poros de diferentes tamanhos intercomunicados, cuja secção transversal varia grandemente. Sobre a superfície existem aberturas de poros de tamanhos variados. A medida que se retira água por evaporação se forma um menisco em cada poro, que desenvolve forças capilares causando uma tensão interfacial entre a superfície e o sólido. Estas forças capilares possuem componentes perpendiculares a superfície do sólido e fornecem a força impulsora para o movimento da água através dos poros em direção a superfície.

A intensidade das forças capilares depende da curvatura do menisco, a qual é função da secção transversal do poro. Os poros pequenos desenvolvem forças capilares maiores que os poros grandes e, por conseguinte, os poros menores podem extrair água dos poros maiores.

A teoria capilar é baseada no conceito de potencial capilar, que pode ser definido como a diferença de

pressão entre a água e o ar na interface água-ar presente no capilar.

Segundo BAVER *et alii* (1972), a curvatura na interface é produzida pela tensão superficial da água.

A equação de fluxo capilar líquido é dada, segundo PHILIP e DE VRIES (1957), por:

$$\vec{J} = C_h \cdot \rho \cdot \nabla U \quad (2.5)$$

onde:

C_h = condutividade hidráulica (s^{-1})

ρ = massa específica do sólido seco ($kg\ m^{-3}$)

Considerando um meio poroso como uma mistura, LUIZ e SAMPAIO (1981), escreveram a equação da continuidade para a fase líquida do seguinte modo:

$$\frac{\partial d_l}{\partial t} = - \operatorname{div}(d_l \cdot V_i) \quad (2.6)$$

onde d_l é a densidade parcial da água, t é o tempo, V_i é a velocidade intersticial da água. Designando por ξ a porosidade, por S a saturação e por d a densidade real da água, obtiveram:

$$d_l = \xi \cdot S \cdot d \quad (2.7)$$

Como durante a secagem o escoamento é muito lento, puderam generalizar a lei de Darcy, usando a seguinte hipótese:

$$\xi \cdot S \cdot V_i = Ch \nabla (P - X) \quad (2.8)$$

onde:

Ch = é a condutividade hidráulica;

X = é a altura do ponto em relação à base do meio poroso;

P = é a pressão capilar.

Considerando os pontos ao longo do eixo de simetria do meio poroso, disseram que as variáveis S, Ch e P dependem somente de X e t. A pressão capilar é definida pela diferença de pressão do ar e da água. Além disso, supondo d e ξ constantes e usando as equações 2.6, 2.7 e 2.8, teremos:

$$\xi \frac{\partial S}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial X} \left[Ch \frac{\partial P}{\partial X} \right] + \frac{\partial Ch}{\partial X} \quad (2.9)$$

A equação (2.9) é a equação diferencial apropriada para o estudo da transferência de massa durante a secagem de meios porosos, segundo LUIZ e SAMPAIO (1981).

2.2.4 - Secagem a taxa constante

Conforme NONHEBEL G. e MOSS (1979), PERRY e CHILTON, (1980), o mecanismo do período a velocidade constante está dado pela evaporação desde uma superfície líquida e a presença do sólido não afeta este mecanismo.

Embora, o sólido pode alterar as propriedades da superfície líquida e por isso a velocidade de evaporação é as vezes distinta da obtida com um líquido puro. Este efeito do sólido é relativamente pequeno e habitualmente a redução na velocidade de evaporação não é maior que 20%.

A velocidade de secagem está determinada pela velocidade de difusão do vapor através da película gasosa que recobre a superfície de secagem até o seio da corrente de gás. Transporte de calor, equação:

$$\frac{d\omega}{d\theta} = \frac{h_c \cdot A(t_g - T_s)}{\lambda} = 10^{-3} K_p A (P_s - P_v) = K_H A(H_{ss} - H_g) \quad (2.10)$$

As condições são aproximadamente as que definem e temperatura de bulbo úmido.

Qualquer ponto da superfície tende então a adquirir a temperatura de bulbo úmido correspondente à temperatura, umidade e quantidade do gás de secado. Se a quantidade de gás e suas características num ponto dado permanecem constantes, a temperatura superficial ou de bulbo úmido também será constante.

2.2.4.1 - Período à velocidade decrescente

O período à velocidade decrescente começa quando o período à velocidade constante termina, uma vez atingido o teor de umidade crítico. Quando o teor de umidade final é maior que o crítico, todo o processo ocorrerá a velocidade constante. Por outro lado, quando o teor inicial de umidade está abaixo do teor de umidade crítico, o processo de secagem ocorrerá ao modo do período a velocidade decrescente. Este período está, usualmente, dividido em duas zonas: (1) A zona de secagem da superfície insaturada e (2) a zona em que o movimento interno da umidade é controlante.

Na primeira zona, a superfície evaporante não pode ser mantida inteiramente saturada pelo teor de umidade dentro do sólido. A velocidade de secagem diminui na fração insaturada, e por isso há uma diminuição da velocidade para toda a superfície. Em alguns casos, a velocidade de secagem é uma função linear de teor de água do sólido. Em geral, no entanto, a velocidade de secagem depende de fatores que afetam a difusão de umidade para longe da superfície evaporante e de outros que alteram a velocidade do movimento interno de umidade.

À medida que a secagem avança, chega-se a um ponto em que a superfície evaporante está insaturada. O plano de evaporação desloca-se para o interior do sólido, e o processo inicia o segundo período a velocidade decrescente. A velocidade de secagem é agora governada pela velocidade do movimento da umidade interna; a influência das variáveis externas diminui. Na secagem de baixos teores de umidade, este período, usualmente predomina na determinação do tempo de secagem global.

2.3 - Secadores (PERRY e CHILTON, 1980)

Os secadores são usados para produzir um produto sólido e seco a partir de um material úmido.

2.3.1 - Secadores diretos

A transferência de calor para a secagem é realizada pelo contato direto entre o sólido úmido e os gases quentes.

O líquido vaporizado é arrastado pelo fluido de secagem, ou seja, pelos gases quentes. Os secadores diretos podem também ser denominados secadores à convecção.

2.3.1.1 - Contínuos

A operação é efetuada sem interrupção, enquanto estiver sendo fornecida alimentação úmida. É claro que qualquer secador contínuo pode ser operado intermitentemente, ou por partidas, se assim for desejado.

2.3.1.1.1 - Tipos diretos contínuos

1. Secadores contínuos a bandejas, como os de esteiras metálicas, os de bandejas vibrantes utilizando gases quentes, os secadores verticais a turbinas.

2. Secadores de folhas contínuas. Uma folha contínua do material passa pelo secador, seja pendurada frouxamente, seja esticada numa moldura apropriada.

3. Secadores-transportadores pneumáticos. Neste tipo, a secagem é realizada frequentemente em conjunto com a moagem. O material é transportado por gases a alta temperatura e alta velocidade para um coletor ciclônico.

4. Secadores rotatórios. O material é transportado e despejado dentro de um cilindro rotatório através do qual escoam os gases.

5. Secadores-pulverizadores. O material de alimentação mais seco deve ser capaz de atomização seja por um disco centrífugo, seja por um bocal.

6. Secadores a circulação permanente. O material é mantido num tabuleiro transportador contínuo enquanto é soprado ar quente através dele.

7. Secadores a túnel. O material em carrinhos ou vagonetes é transportado através de um túnel em contato com os gases quentes.

8. Leitos fluídos. Os sólidos são fluidizados num tanque estacionário. Podem também dispor de serpentinas de aquecimento indireto.

2.3.1.2 - Descontínuos

Os secadores são projetados para operar com um certo tamanho da partida de alimentação úmida, para um dado tempo de ciclos. Nos secadores descontínuos as condições de teor de umidade e de temperatura modificam-se continuamente em qualquer ponto do secador.

2.3.1.2.1 - Tipos diretos descontínuos.

1. Secadores descontínuos a circulação permanente. O material fica sobre a tela do fundo de tabuleiros através da qual é soprado ar quente.

2. Secadores de bandeja em estufa. O material fica suportado por bandejas que podem estar ou não montadas em vagonetes ou carrinhos removíveis. O ar é soprado através do material nas bandejas.

3. Leitos fluídos. Os sólidos são fluidizados num recipiente estacionário, com um filtro de

poeira montado por cima.

2.3.2 - Secadores indiretos

O calor para a secagem é transmitido ao sólido úmido por intermédio de uma parede. O líquido vaporizado é removido independentemente do fluido de aquecimento. A velocidade de secagem depende do contato entre material úmido e superfícies quentes. Os secadores indiretos também poderiam ser denominados secadores a condução ou secadores de contato.

2.3.2.1 - Contínuos

A secagem é realizada pela passagem contínua do material através do secador em contato com uma superfície quente.

- Cilindros secadores, para folhas contínuas como papel celofane, peças de tecido. Os cilindros são em geral aquecidos a vapor e girantes.

- Tambores-secadores. Podem ser aquecidos por vapor ou por água quente.

- Secadores-transportadores-parafuso. Apesar de serem contínuos a operação sob vácuo é factível. A recuperação de solvente na secagem também é possível.

- Secadores rotatórios a tubos de vapor. Podem usar vapor ou água quente. A operação sob pressão ligeiramente negativa é factível para permitir, se for necessário, a recuperação do solvente com a secagem.

- Secadores a bandejas vibratórias. A calefação é realizada por vapor ou água quente.

- Tipos especiais, como o da correia móvel de tecido em contato íntimo de uma placa aquecida a vapor. O material secante fica sobre a correia e recebe o calor por contato.

2.3.2.2 - Descontínuos

Os secadores indiretos descontínuos são bem adaptados, em geral para operar a vácuo. Podem ser divididos em tipos com agitação e tipos sem agitação.

- Secadores com tabuleiros agitados. Podem operar à pressão atmosférica ou à vácuo e podem processar quase que qualquer forma de sólidos molhados, em pequenas quantidades como sólidos liquefeitos suspensões grossas (lamas) pastas ou sólidos granulados.

- Secadores-congeladores. O material é congelado antes da secagem. A secagem no estado congelado é feita sob vácuo muito elevado.

- Secadores rotatórios a vácuo. O material é agitado num casco horizontal estacionário. O vácuo nem sempre é necessário. O agitador pode ser aquecido a vapor, além do casco.

- Secadores de bandejas a vácuo. A calefação é feita pelo contato de prateleiras aquecidas a vapor ou água quente e sobre as quais fica o material. Não há agitação.

CAPÍTULO III

PROJETO, CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DOS COMPONENTES DO SECADOR PARA BAGAÇO DE CANA

O sistema foi projetado e construído especialmente para estudar o desempenho em escala piloto e a partir do levantamento experimental dos parâmetros que caracterizam a secagem, dimensionamos e projetamos um protótipo adequado para engenhos, microdestilarias ou usinas de porte médio.

O projeto foi elaborado a partir do sistema de alimentação de ar quente de um compressor radial com 4,0 C.V. e 2920 rpm, um rotâmetro, um aquecedor de ar, existente no laboratório do Departamento de Engenharia Química. Mais adiante (3, 2) são dados melhores detalhes.

3.1 - Projeto

Utilizando um programa no computador, desenvolvido por ALSINA e BEZERRA (1986) Apêndice "D" e com características do equipamento existente e com informações bibliográficas (VALENÇA e MASSARANI, 1982), dimensionou-se o secador para bagaço de cana.

As especificações para as variáveis do processo foram:

- Vazão do ar na faixa de $0,011 \text{ m}^3/\text{s}$ ($41 \text{ m}^3/\text{h}$) e $0,069 \text{ m}^3/\text{s}$ ($250 \text{ m}^3/\text{h}$).

- Temperatura na faixa de $373,15 \text{ K}$ (100°C) a $423,15\text{K}$

(150°C).

- Tempo de residência entre 180 a 480s.
- Espessura da camada de bagaço variando entre 0,02 - 0,03 - 0,05 - 0,07 - 0,01 m.

3.2 - Descrição do Sistema de Secagem

A figura 3.1 apresenta o esquema de:

- Um compressor radial (A) dotado de motor assíncrono trifásico, tipo S 100 L2, com 4,0 C.V e 2920 rpm, que impulsiona o ar de secagem.

- Um rotâmetro (B), tipo R2 - V.C Haste, capacidade de 0,11 m³/s (400 m³/h), para medir a vazão do gás.

- Um aquecedor de ar (C), tipo RM 2560,9, com 22,5Kw, fabricado pela Palley, composto por nova resistência para aquecer o ar à temperatura desejada, pode-se usar somente as resistências que aqueçam a temperatura a ser utilizada.

- Um conjunto de chaves seletoras (E), para medir:

- 1 - Temperatura (bulbo seco) ou (bulbo úmido) na entrada do secador.

- 2 - Temperatura (bulbo seco) ou (bulbo úmido) na saída do secador.

- Um controlador de temperatura proporcional (F), tipo P 300, faixa de operação entre 293,15 K (20°C) a 473,15 K (200°C).

- Um medidor de temperatura (G), tipo H/CG, fabricado pela Instrumentos Científicos do Brasil, para medir a temperatura na entrada e na saída do secador.

- Uma caixa retangular (secador) cuja finalidade é receber o ar quente e ao mesmo tempo bagaço úmido que é seco do pelo método de fluxo cruzado.

3.3 - Construção

3.3.1 - Secador

Nas figuras 3.2 e 3.3 é apresentado o secador construído.

Para construção da caixa retangular projetada, foi cortada a chapa galvanizada de 0,0079m de espessura (nº 16), com tesoura manual, e seguidamente foi virada utilizando-se uma máquina de virar chapas, com os ângulos desejados, logo após soldada com solda a ponto. Ficando a caixa com dimensões de 1,2m de comprimento, 0,30m de altura e 0,32m de largura. Também foi construída uma bancada de cantoneira de 0,0508m por 0,0508m por 0,00635m, com as seguintes dimensões: 2,0m de comprimento; 0,5m de largura e 0,8m de altura, serve como base ao secador construído, seguidamente foram usinados dois eixos de aço 1020 com diâmetro de 0,0508m e comprimento de 0,55m, logo após foram repartidos para evitar que a esteira transportadora deslize nos roletes.

Foi colocado nas extremidades de cada rolete um mancal de rolamento, com diâmetro de 0,0254m, nº 1560 e finalmente foi montada a esteira transportadora de malha de aço de 0,0024m (nº 12), nos roletes que servem de apoio, e ao mesmo tempo locomovem a esteira em um comprimento de 1,93 m e uma largura de 0,3m.

Foi instalado um gerador de corrente contínua, tipo CC 1 - 4 - 83/4 nº 1807 - A = 6,8 - Kw 1,5, construído pela Eletro Máquinas "Anel" S/A, para movimentar a esteira transportadora, acoplado com polias de gorne; a polia motora com um diâmetro igual a 0,030m e a polia conduzida com diâmetro igual a 0,305m, com gornes para correia "A". Também foi acoplado um redutor de velocidade para evitar sobrecarga no gerador de corrente contínua, quando se trabalhasse com velocidades baixas. Ao mesmo equipamento foi instalado um auto-transformador variável, tipo 2/6 B, com inv 240 e out de 0 - 280, fabricado por The Superior Electric Co - Bristol Conn U.S.A. Cujá finalidade é aumentar e reduzir a velocidade da esteira.

3.3.1.1 - Sub-sistema de injeção de ar

O gás utilizado para a secagem é gerado por um compressor radial, onde é levado ao secador por uma tubulação galvanizada de 0,0508m de diâmetro e é soprado por baixo do leito de bagaço (fluxo cruzado de ar).

3.3.1.2 - Sub-sistema de aquecimento

O ar que passa pelo aquecedor de ar, é submetido a diversas faixas de temperaturas desejadas, acionando os interruptores, que contém três resistências cada.

3.3.1.3 - Sub-sistema de controle

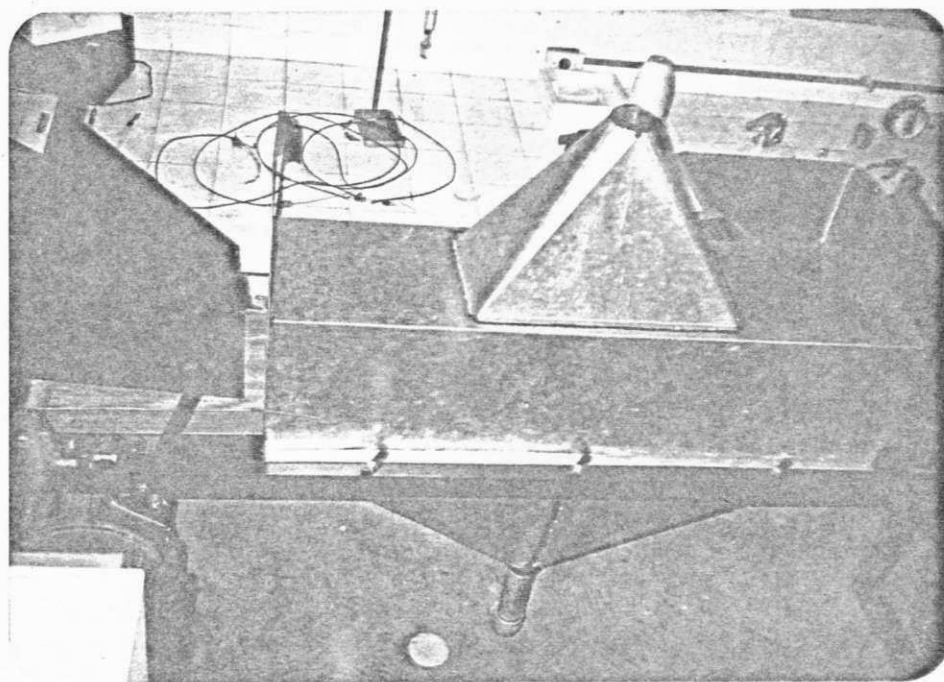
Para medir a temperatura desejada foram inseridos no secador, termopares de ferro constantam, conectados

dos a um milivoltímetro e a um controlador de temperatura.

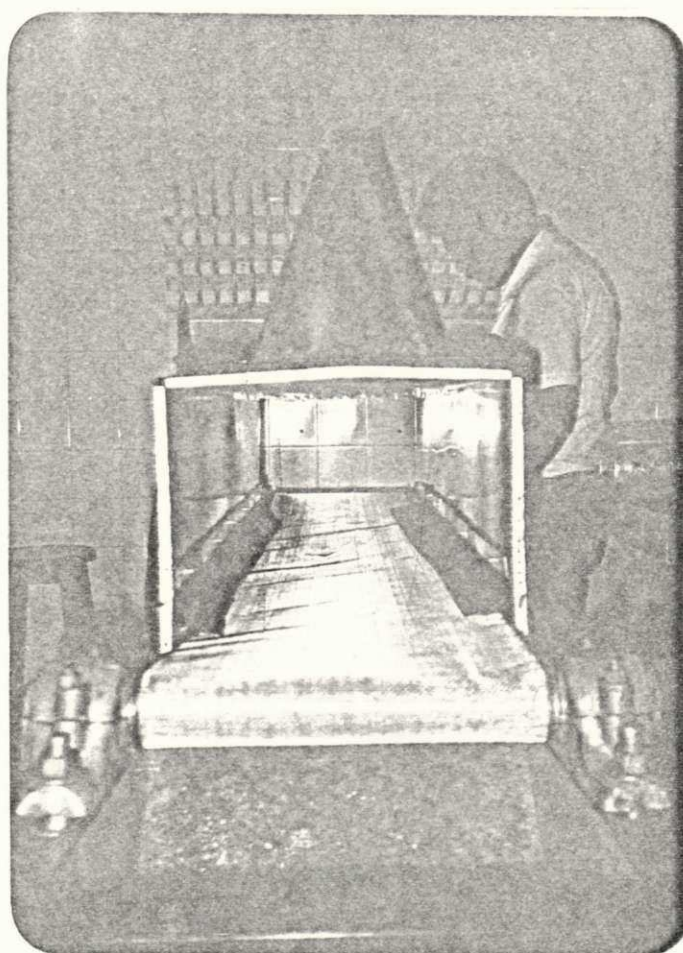
Para verificar a vazão, é regulada uma válvula à saída do ar do compressor radial, e feita a leitura por um rotâmetro em m^3/h .

Para variar a velocidade da esteira, é regulada por meio de um auto-transformador variável com o que se obtém um tempo de residência de 180 a 480 s.

Para obter espessuras da camada de bagaço de seixadas são deslocadas as comportas reguláveis de entrada e saída no secador, na faixa de 0,02 - 0,03 - 0,05 - 0,07 e 0,01m.



Lateral do secador de esteira para bagaço de cana.



Frente do secador de esteira para
bagaço de cana.

- A - COMPRESSOR RADIAL
- B - ROTÂMETRO
- C - AQUECEDOR DE AR
- D - SECADOR DE BAGAÇO DE CANA
- E - CHAVE SELETORA: 1 - TEMPERATURA B.U. DE ENTRADA
2 - TEMPERATURA B.S. DE ENTRADA
3 - TEMPERATURA B.U. NA SAÍDA
- F - CONTROLADOR DE TEMPERATURA
- G - REGISTRADOR DE TEMPERATURA B.S. NA SAÍDA

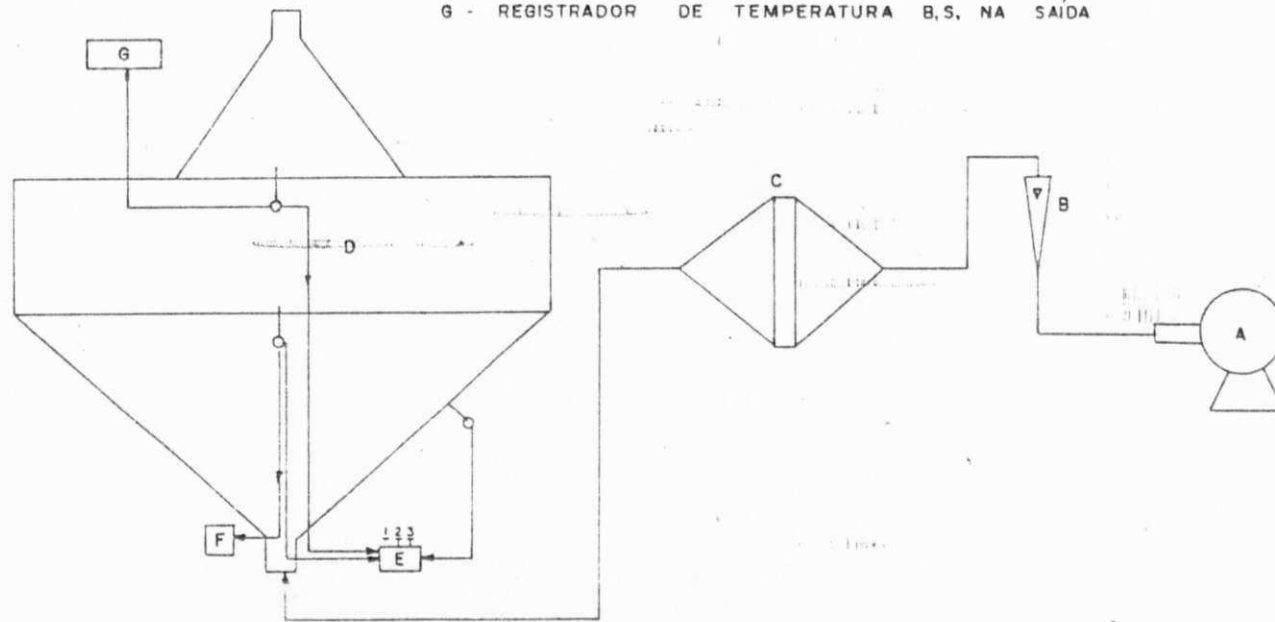


Figura 3.1 - Esquema da aparelhagem.

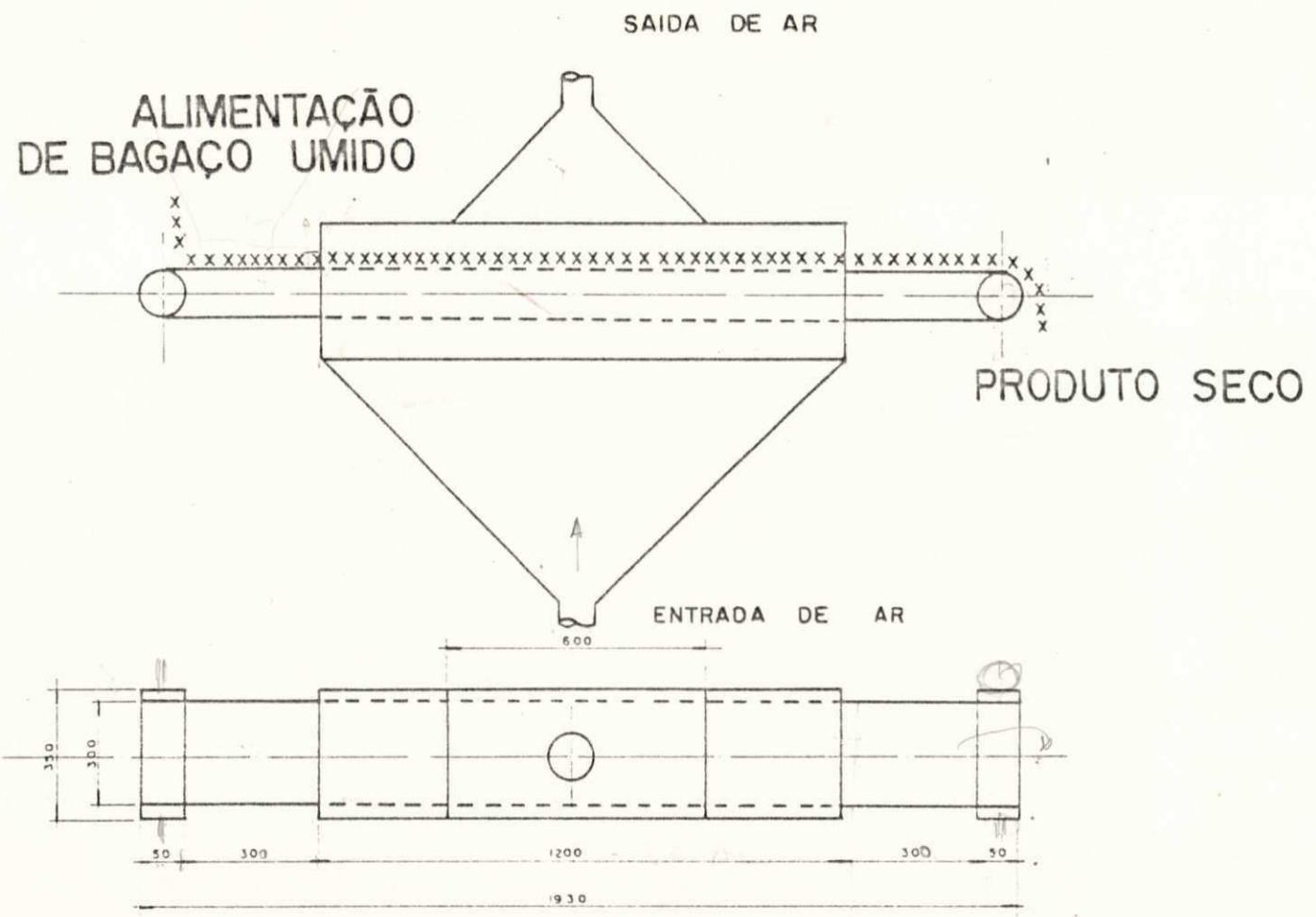


Figura 3.2 - Alimentação de bagaço úmido.

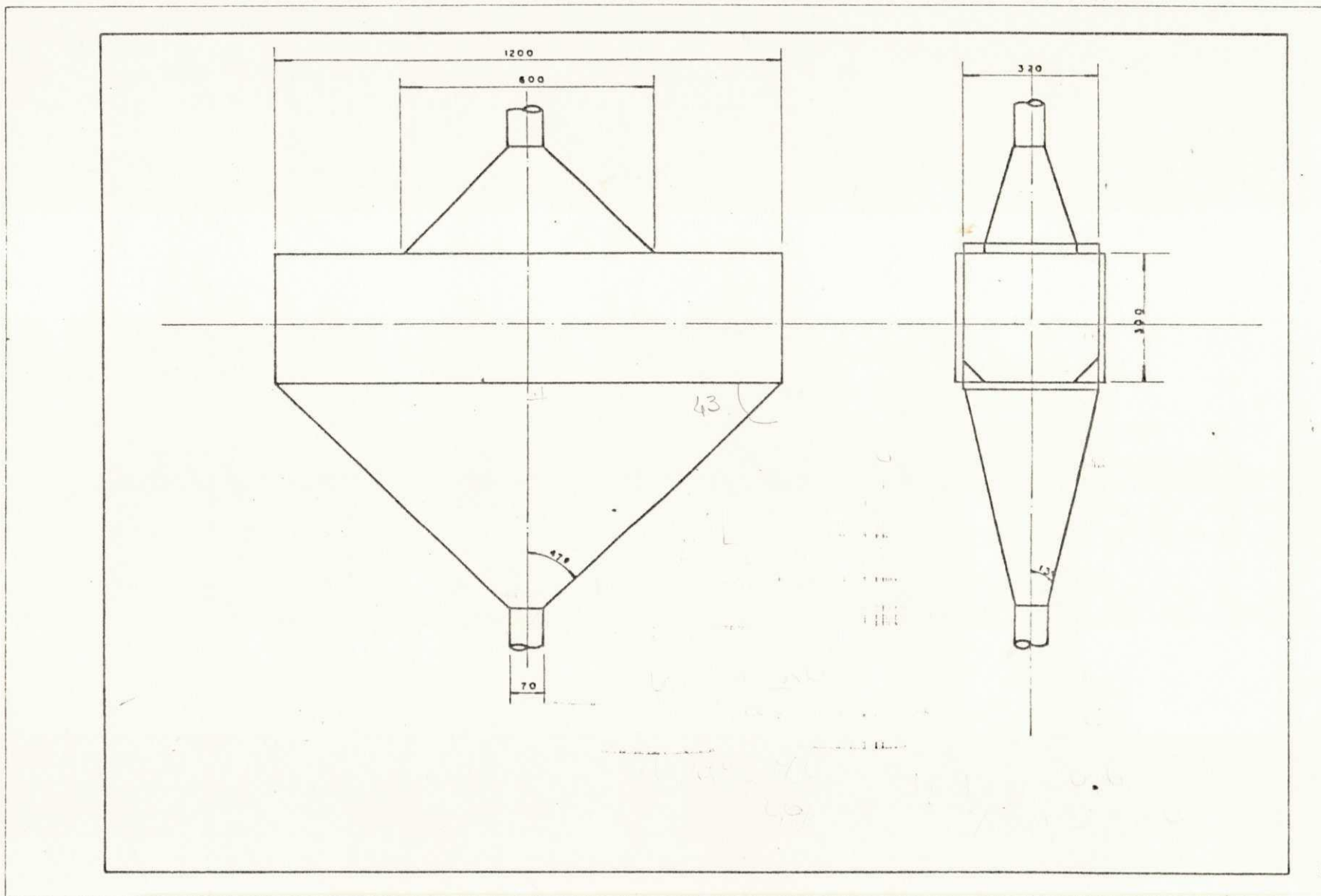


Figura 3.3 - Secador de Bagaço de cana fluxo cruzado.

CAPÍTULO IV

MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 - Material Utilizado

O material utilizado foi bagaço de cana de açúcar, colhido no engenho Macaíba de Alagoa Nova, estado da Paraíba.

O material colhido no engenho, após passar pelos picadores, foi trazido para o laboratório em sacos plásticos de modo que as experiências fossem realizadas com várias amostras, contendo teor de umidade entre 34 e 55% em base úmida.

Antes de submeter o bagaço de cana ao processo de secagem, misturam-se várias partes de diferentes locais de amostragens para determinar a umidade inicial de forma que esta determinação de umidade seja a mais representativa possível.

Para caracterizar o bagaço, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Picnômetro de comparação a ar, fabricado pelo núcleo de armazenamento do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Paraíba (UFPb), Campus II, com capacidade em cada cilindro de 180ml.

- Balança Mettler PC 440, capacidade de 420g, com precisão de leitura de 0,001g, fabricada pela Mettler Instrument AG - Suíça.

- Manômetro, tipo coluna de mercúrio, com lenda em escala milimetrada.

- Estufa de secagem, modelo 315 SE, fabricada pela Fanem, São Paulo - Brasil.

As finalidades destes equipamentos é de acoplar os implementos necessários para a obtenção de bons resultados.

4.1.1 - Caracterização do bagaço de cana

A porosidade é definida pela razão do volume de espaços vazios ao volume do leito.

$$\xi = 1 - (\rho_a / \rho) \quad (4.1)$$

Em que:

ξ = porosidade (decimal)

ρ_a = densidade aparente (kg/m^3)

ρ = densidade real (kg/m^3)

A densidade aparente é definida como a massa de sólido dividida pelo volume do leito. Foi calculada dividindo a massa do bagaço de cana contido num cilindro de volume de 1000mℓ.

A densidade real é definida pela massa do sólido dividida pelo volume do sólido. Foi calculada pela equação (4.1), uma vez conhecido o valor da porosidade e densidade aparente.

Para determinar a porosidade do leito foi utilizado um picnômetro de comparação a ar. Na figura 4.1, se apresente

ta um esquema do aparelho. O princípio do método, baseia-se na suposição do comportamento de gás ideal e condições isotérmicas.

O método de operação é feito da seguinte forma:

Inicialmente todo o sistema se encontra a pressão atmosférica.

Enche-se de ar o cilindro 1, (ver figura 4.1), através de um compressor de ar, com a válvula de conexão fechada. Nestas condições teremos no cilindro 1, a seguinte equação:

$$P_1 V_1 = m R T \quad (4.2)$$

Em que:

P_1 = pressão no cilindro ($N.m^{-2}$)

V_1 = volume de ar no cilindro 1 (m^3)

m = massa do ar no cilindro 1 (kg)

R = constante específica do gás ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)

T = temperatura ($^{\circ}K$).

Aberta a válvula de admissão de ar do cilindro 1 para o cilindro 2, que encontra-se cheio de bagaço de cana, teremos no cilindro 1, a seguinte equação:

$$P_2 V_1 = m_1 R T \quad (4.3)$$

E no cilindro 2, a seguinte equação:

$$P_2 V_2 = m_2 R T \quad (4.4)$$

Em que:

P_2 = pressão no cilindro 2 ($N.m^{-2}$)

V_2 = volume de ar no cilindro 2 (m^3)

m_1 = nova massa de ar no cilindro 1 (kg)

m_2 = massa de ar no cilindro 2 (kg)

Como as pressões medidas são relativas à atmosférica e o volume de ambos os cilindros é o mesmo, temos que:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \quad (4.5)$$

Onde P é igual a pressão relativa medida. Como $\frac{V_2}{V_1}$ é igual a porosidade, temos:

$$\xi = \frac{(P_1 - P_2)}{P_2} \quad (4.6)$$

Foram realizados os ensaios em (8,0) amostras de unidades diferentes, conforme mostrado na tabela (4.1), sendo que cada amostra foi submetida a 10,0 ensaios experimentais, para determinar a porosidade e a densidade aparente.

Os resultados obtidos estão mostrados no Apêndice (A), onde é observado que a porosidade diminui com o aumento do teor de umidade compatível com resultados encontrados na literatura para diferentes tipos de materiais (MARIZ, 1986).

4.2 - Métodos Utilizados

4.2.1 - Determinação da umidade do bagaço. Método do dessecador infra-vermelho LP-15.

Se num corpo projetamos raios infra-vermelhos, eles doam ao mesmo uma parte de energia contida. O corpo irradiado se aquece e as substâncias voláteis se evaporam. MARIZ (1980).

Este método torna-se mais rápido que o método da estufa, onde o calor é transmitido por convecção. O dessecador Mettler LP-15, baseia-se neste princípio para determinar umidades de sólidos.

O tempo de secagem depende do grau de aquecimento ajustado, do peso da amostra, da distribuição e da cor do produto.

O dessecador está adaptado sobre uma balança Mettler eletrônica PC-440 e serve para determinar o conteúdo de umidade, mediante as equações:

$$U_{bu} = \frac{P_i - P_f}{P_i}$$

$$U_{bs} = \frac{P_i - P_f}{P_f}$$

Onde:

U_{bu} = umidade em base úmida $\left(\frac{\text{kg de água}}{\text{kg de sólido úmido}} \right)$

U_{bs} = umidade em base seca $\left(\frac{\text{kg de água}}{\text{kg de sólido seco}} \right)$

P_i = peso inicial (kg)

P_f = peso final (kg)

As variações de peso são lidas continuamente de forma digital na balança. A amostra é pesada e colocada no dessecador infra-vermelho a uma temperatura de aproximadamente 373,15 K até atingir peso constante.

4.2.2 - Determinação da Umidade Absoluta e a Umidade Relativa do Ar.

A umidade relativa e a umidade relativa foi determina da mediante a carta psicrométrica, usando os valores de tem peratura do ar na entrada (Bulbo Úmido) e a temperatura do ar na entrada (Bulbo Seco), seguidamente usamos os valores da temperatura do bulbo úmido do ar na saída e a temperatu ra do bulbo seco do ar na saída.

Também usando uma sub-rotina de computador, que trata sobre o assunto, foram encontradas a umidade relativa e a umidade absoluta, para conferir os resultados encontrados pela carta psicrométrica. (PERRY e CHILTON, 1980). A sub-rotina encontra-se no Apêndice C.

4.3 - Procedimento Operacional do Secador.

Para avaliar o comportamento operacional do secador foram realizadas 18,0 experiências de secagem com umidade inicial de bagaço entre 34,0% e 55,0% na base úmida.

A faixa de temperatura do ar com que se trabalhou no secador de bagaço de cana foi de 373,15 a 423,15 K (100 a 150°C) variando a vazão do ar de 0,011 - 0,028 - 0,044 -

0,055 - 0,067 e 0,069 m³/s) e espessura de camada de bagaço, variando de 0,02 - 0,03 - 0,05 - 0,07 - 0,01m.

O tempo de residência variou entre 180 e 480 segundos, lido por um cronômetro marca Galleukamp - referência TKM-3404. O método de operação nas experiências segue a seguinte sequência:

- Liga-se o compressor radial para gerar o ar para o processo de secagem.

- Fixa-se a vazão do ar mediante a válvula reguladora, fazendo a leitura no rotâmetro.

- Ligam-se as resistências para obter a temperatura desejada.

- Regulam-se as comportas do secador para fixar a espessura do leito de bagaço e uma vez em regime registram-se as seguintes medições:

- A umidade do bagaço na entrada e saída do secador.

Temperatura do ar na entrada e saída do bulbo seco e bulbo úmido, mediante termopares posicionados como se mostra na figura 3.1 (média de seis) determinações. Com estes valores calculam a umidade absoluta e umidade relativa do ar pelo método descrito em 4.2.2.

As amostras são colhidas em quatro recipientes à entrada do secador e repetidas quatro amostras na saída do mesmo, para assim, ser determinada a umidade do bagaço de cana processado pelo método descrito no ponto 4.2.1.

A temperatura do bagaço na entrada e na saída do secador é medido por 4 determinações, pelo método do calorímetro, este método é determinado num recipiente de isopor

hermeticamente fechado e no mesmo é colocado o bagoço e se
guidamente no recipiente colocamos um termômetro para ler
a temperatura desejada.

O tempo de residência do bagoço no secador é medido
mediante um cronômetro.

No Apêndice "B" encontram-se as tabelas que contêm os
dados obtidos experimentalmente.

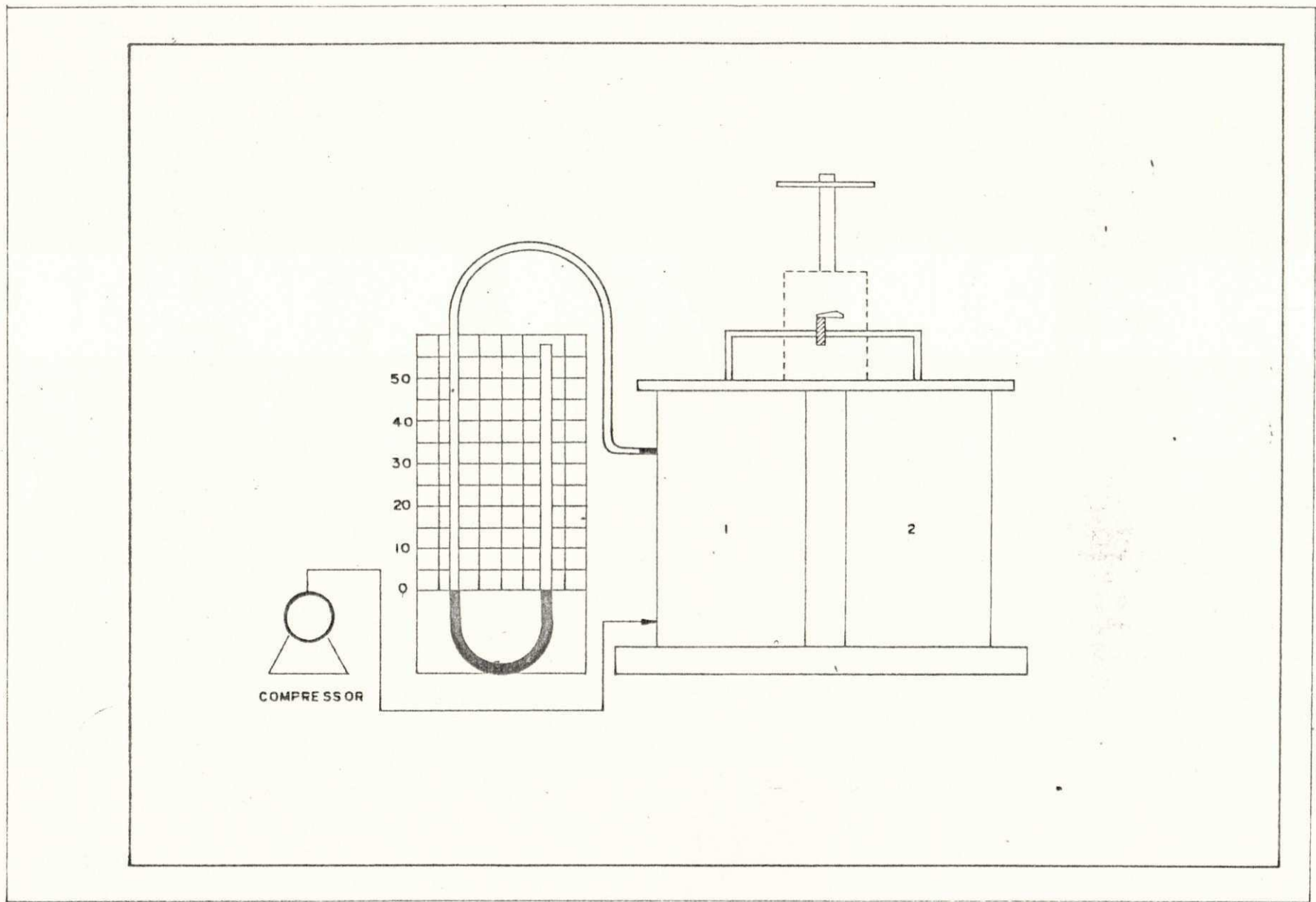


Figura 4.1 - Pícnômetro de comparação a ar.

CAPÍTULO V

RESULTADOS E DESEMPENHO DO SECADOR PILOTO

5.1 - Resultados Experimentais

Na tabela 5.1 são mostradas as condições de operação e os resultados de 18,0 ensaios de secagem realizados no equipamento de fluxos cruzados em condições de regime permanente.

Em todas as experiências realizadas verificou-se que o bagaço deixava o secador a uma temperatura próxima à de bulbo úmido do ar na saída, forte indício de que a secagem ocorre no período de taxa constante, método descrito em 2.2.4. VALENÇA e MASSARANI (1982) trabalhando com espessura de 0,5m encontraram que o ar saía saturado do secador. Por outra parte, devido a termos trabalhado com espessura de leito relativamente pequenas em nenhum dos ensaios o ar chegou à saturação.

Observa-se na tabela 5.2 que o grau de secagem depende do tempo de residência, da temperatura, da velocidade mássica e da espessura da camada do bagaço.

Na tabela 5.2 está indicado também da taxa de secagem por unidade de área do secador:

$$W = \rho_s (U - U_s) \frac{E}{t} \quad (5.1)$$

Observa-se que a taxa de secagem apresenta em geral uma tendência crescente com a elevação de velocidade mássica do ar, da espessura de camada e de ΔT , diferença entre a temperatura de entrada do ar e a temperatura de Bulbo Úmido.

Na última coluna da tabela incluiu-se o fator de secagem η , definido por:

$$\eta = \frac{W \cdot \lambda}{G \cdot c_g(T_o - T_s)} \quad (5.2)$$

O fator de secagem relaciona a energia necessária para eliminar a água do sólido com a energia que entregaria o gás se saísse à temperatura de saturação. Como se mostra na tabela 5.2, o fator de secagem em geral diminui com o aumento da vazão do ar e aumenta com a espessura da camada.

5.2 - Modelagem do Secador

No presente trabalho é utilizado um modelo simplificado, apresentado por Thygeson e Grossmann (1970) para escoamento em fluxos cruzados.

As hipóteses e restrições são as seguintes:

- Secagem adiabática através do leito.
- A temperatura do gás só varia com a distância medida através da profundidade do leito.
- Temperatura do sólido constante e uniforme e igual à temperatura de saturação adiabática.
- Propriedades físicas e coeficiente de transmissão de calor entre o sólido e o gás constantes.

- Período de secagem de taxa constante.

Nessa situação, as equações que descrevem o processo térmico e de transferência de massa no leito fixo com escoamento percolante são:

$$\rho_g \cdot c_g \cdot D \cdot \xi \frac{d^2 T}{dZ^2} - G \cdot c_g \frac{dT}{dZ} = h(T - T_s) \quad (5.3a)$$

$$\frac{dU}{dt} = - \frac{h(T - T_s)}{\rho_s \cdot \lambda} \quad (5.3b)$$

O sistema de equações (5.3a) e (5.3b), com a hipótese adicional de efeitos difusionais desprezíveis e condições inicial $U(Z,0) = U_0$ e de contorno $T(0,t) = T_0$.
Tem como solução:

$$\frac{T - T_s}{T_0 - T_s} = \exp \left[- \frac{h}{G} \cdot \frac{Z}{c_g} \right] \quad (5.4a)$$

$$U - U_0 = - \frac{h(T_0 - T_s)}{\rho_s \cdot \lambda} \cdot t \exp \left[- \frac{h}{G} \cdot \frac{Z}{c_g} \right] \quad (5.4b)$$

Para um secador de esteira e fluxos cruzados a expressão para a temperatura média do sólido na saída do equipamento é:

$$T_E - T_s = (T_0 - T_s) \exp \left[- \frac{h}{G} \cdot \frac{E}{c_g} \right] \quad (5.4c)$$

$$T_E = T_s + (T_0 - T_s) \exp \left[- \frac{h}{G} \cdot \frac{E}{c_g} \right]$$

Para um secador de esteira e fluxos cruzados. A expressão para a umidade média do sólido na saída do equipamento é

$$U_s - U_o = - \frac{G \cdot c_g (T_o - T_s) \cdot t}{\rho_s \cdot \lambda \cdot E} \left[1 - \exp\left(- \frac{h \cdot E}{G \cdot c_g}\right) \right] \quad (5.5)$$

Equação (5.5) pode ser reordenada da seguinte maneira.

$$1 - \eta = \exp(-St) \quad (5.6)$$

Onde $St = \frac{h \cdot E}{G \cdot c_g}$ é o número de Stanton volumétrico e h , o coeficiente de calor sólido/gás, volumétrico, depende da velocidade mássica conforme:

$$h = C \cdot G^n \quad (5.7)$$

5.2.1 - Efeito da espessura no número de Stanton

Se o modelo for adequado, um gráfico de $\ln(1-\eta)$ em função da espessura da camada deve ser linear, conforme a equação 5.6. Nas figuras (5.1 a, b, c) pode observar-se, para diversos valores de velocidade mássica que os resultados experimentais obtidos correspondem razoavelmente bem a essa dependência. A inclinação das retas é:

$$\frac{St}{E} = \frac{h}{G \cdot c_g} \quad (5.8)$$

Na tabela 5.3, estão relacionados os valores de St/E obtidos por médio de ajuste dos dados experimentais.

5.2.2 - Efeito da velocidade mássica no número de Stanton.

Substituindo a equação 5.7 na 5.8, resulta:

$$\frac{St}{E} = C' \cdot G^{n-1} \quad (5.8a)$$

Aplicando logarítmos na (5.8a), vem:

$$\log \frac{St}{E} = \log C' + (n-1) \log G \quad (5.8b)$$

A figura 5.2 é um gráfico de $\log St/E$ em função de $\log G$, onde os valores de St/E foram obtidos da inclinação das retas da figura 5.1 a,b,c (ver tabela 5.3).

Observa-se na figura 5.2 que os dados se ajustam adequadamente ao comportamento previsto pelo modelo conforme a equação 5.8a.

Foram calculados os valores de C' e n mediante análise de regressão linear dos dados experimentais encontrando-se (ver tabela 5.3).

$$C' = 2,37 \times 10^{-3} \quad = 1,161 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)^{0,69} \frac{1}{\text{m}}$$

$$(n - 1) = -0,69$$

Os resultados de ajuste dos dados experimentais se mostram na tabela (5.4) que mostra o valor de umidade medidos e calculados mediante a equação 5.6, como também os valores de T_E medidos e os calculados mediante a equação 5.4c.

As equações 5.6 e 5.8 predizem a umidade média na saída com um desvio médio de 10,7% e 72,0% dos dados apresentam desvio inferior a 12,0%. Entretanto quando utilizamos a equação 5.4c para calcular a temperatura de saída do gás, os valores estimados são bem maiores que os medidos (ver tabela 5.4). Esta discrepância pode ser explicada a perdas de calor ao ambiente causadas pela falta de isolamento térmico no equipamento.

5.3 - Dimensionamento do Protótipo

De acordo com o estabelecido na seção anterior, as equações (5.6) e (5.8) descrevem o desempenho do secador na faixa operacional utilizada: $(0,03 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} < G < 0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$.

$$0,02\text{m} < E < 0,01\text{m}$$

$$373,15\text{K} < T_0 < 423,15 \text{ K}$$

$$0,51 < U_0 < 1,23$$

A capacidade de processamento por unidade de área, expressa em bagaço seco por unidade de tempo, de acordo com o modelo proposto é:

$$\frac{C}{A \cdot L} = \frac{\rho_s \cdot E}{t} = \frac{G \cdot c_g(T_0 - T_s)}{\lambda(U_0 - U_s)} [1 - \exp(-St)] \quad (5.9)$$

Tomando as condições típicas de operação do engenho Macaíba, relacionadas a seguir, foi calculada a capacidade por unidade de área para vários valores de velocidade mássica dos gases da chaminé. Supõe-se que o modelo é aplicável

também no "scaling up" e que o comportamento com gases de combustão é análogo ao do ar como meio de secagem.

Condições operacionais da Usina.

Dia de 12 horas úteis:

- a) 200tn/dia de cana processada, que correspondem a aproximadamente 40 tn/dia de bagaço;
- b) 20.000 litros/dia de aguardente produzido;
- c) Caldeira de 4", 140 tubos de 6m de comprimento, pressão de trabalho 120 Psi;
- d) Gases da chaminé = 200°C;
- e) Moenda DEDINI 45", dois ternos;
- f) Umidade do bagaço na saída das moendas = 55% (base úmida).

Foi adotada a seguinte base de cálculo:

$$T_o = 413,15 \text{ K}$$

$$T_s = 313,15 \text{ K}$$

$$U_o = 1,20$$

$$U_s = 0,80$$

$$c_g = 1004,64 \text{ J/kg K}$$

$$\lambda = 2415322 \text{ J/kg}$$

Na tabela (5.5) se mostra a capacidade em bagaço seco por unidade de área de secador, calculada mediante a equação (5.9), para diversas condições de vazão e de espessura.

Escolhendo como condições típicas uma velocidade mássica de 0,5 kg/m².s e 0,15m de espessura encontramos que para processar 18 tn/dia de bagaço com 55% de umidade se requer uma área de secado de 3m x 5m, sendo necessário 6,6 m³/s de gases da chaminé a 413,15 K. Nessas condições, de acordo com a equação (5.4a) a temperatura de saída do gás seria de 388,15 K.

Mantendo os valores de cg , $(T_o - T_s)$, λ , e $(U_o - U_s)$ cons tan tes, vemos que o número de Stanton aumenta quando se au men ta a espessura do leito de bagaço e diminui com o aumen to da velocidade mássica, a capacidade processada por unida de de área será tanto maior quanto maior a vazão mássica e aumenta com a espessura do leito. Em consequência o ganho de potência $P_T^{(+)}$ segue a mesma tendência.

A potência necessária para soprar o ar através do leito está dada pela equação:

$$P_T^{(-)} = \left[\frac{\mu}{K} + \frac{C \cdot G}{\sqrt{K}} \right] \times \frac{G^2}{\rho^2} \times E \quad (5.12)$$

onde:

$$\mu = 2,2 \text{ pa.s}$$

$$K = 3 \times 10^{-7} \text{ m}^2$$

$$C = 0,1$$

Do trabalho de Valença e Massarani (1982), foram obtidos os valores de C e K . Na equação (5.12) observa-se que o consumo de potência também aumenta com o acréscimo da velocidade mássica e da espessura.

Fazendo a equação (5.11) menos a equação (5.12), obtemos a expressão para a potência líquida obtida pelo processo de secagem:

$$P_T = \frac{G \cdot cg(T_o - T_s) \times \Delta p \cdot c \cdot i}{\lambda (U_o - U_s)} [1 - \exp(-St)] - \left[\frac{\mu}{K} + \frac{C \cdot G}{\sqrt{K}} \right] \times \frac{G^2}{\rho^2} \times E$$

onde:

$$\Delta \text{ p.c.i.} = 1088360 \text{ J/kg}$$

P_T = potência líquida obtida no processo de secagem em W/m^2 .

Analisando a equação (5.13) observa-se que existirão valores de G e de E para os quais P_T é máximo.

Ditos valores foram encontrados traçando gráficos de P_T em função de E e de P_T em função de G . Nas figuras (5.3) a (5.8), analisando os resultados observa-se que:

a) Para espessura entre 0,05 e 0,30m, o máximo corresponde a $G = 5,0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ (figuras 5.3 a 5.6);

b) Para velocidades mássicas até $0,1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, praticamente não há aumento de potência obtida a partir de um certo valor de E , sendo este patamar igual a 0,07m para $G = 0,01 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, de 0,20m para $0,05 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ e 0,30m para $G = 0,1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ (figura 5.7);

c) Para velocidades mássicas maiores o máximo não foi encontrado na faixa estudada (figuras 5.7 e 5.8);

d) Espessuras maiores que 0,30m não foram analisadas devido a que são desaconselháveis em um secador de esteira.

TABELA 5.1 - RESUMO DOS RESULTADOS

Condições do ar									Condições do bagaço							
Q m ³ /s	Entrada				Saída				E m	Tempo de residência (s)	Entrada			Saída		
	Tbs (k)	Tbu (k)	H	Hr%	Tbs (k)	Tbu (k)	H	Hr%			Ubs%	Ubu%	T(k)	Ubs%	Ubu%	T(k)
0,011	375,15	308,85	0,00963	1,42	325,15	304,35	0,0202	23,44	0,05	277,0	51,0	34,0	299,15	42,0	29,0	306,15
0,028	403,65	314,15	0,0131	0,77	317,15	311,15	0,0320	20,72	0,02	252,0	95,0	49,0	299,15	69,0	41,0	310,15
0,28	390,15	312,15	0,0120	1,05	330,15	310,15	0,033	28,94	0,02	240,0	77,0	43,0	297,15	52,0	43,0	301,15
0,028	395,95	308,55	-	-	315,65	306,15	0,0285	52,68	0,03	370,0	83,0	45,0	300,15	60,0	38,0	310,15
0,028	399,15	311,55	0,00686	0,42	335,15	308,35	0,0253	18,12	0,05	390,0	77,0	43,0	300,15	58,0	36,0	309,15
0,028	406,15	313,25	0,0068	0,32	332,25	308,35	0,0265	21,68	0,1	462,0	100,0	50,0	302,15	65,0	39,5	313,15
0,044	409,15	314,95	0,0131	0,65	356,85	311,95	0,0378	35,4	0,03	335,0	73,0	42,0	309,15	46,0	31,0	318,15
0,044	388,15	323,15	0,0561	4,96	322,35	313,15	0,0446	57,28	0,07	305,0	91,0	47,5	301,15	77,0	43,6	312,15
0,044	419,85	312,55	0,00154	0,06	299,85	307,15	0,019	56,65	0,1	435,0	83,0	45,0	302,15	50,0	33,0	309,15
0,055	411,15	313,15	0,00669	0,32	324,75	314,15	0,0469	53,2	0,05	320,0	75,0	43,0	299,15	52,0	34,0	314,15
0,067	418,15	317,15	0,0172	0,65	408,15	315,15	0,0143	0,73	0,02	255,0	78,0	44,0	299,15	47,0	32,0	321,15
0,067	400,15	317,15	0,0143	0,92	344,95	311,15	0,0286	13,24	0,03	240,0	93,0	48,0	297,15	63,0	38,0	308,15
0,067	393,15	313,65	0,015	1,25	331,55	314,15	0,043	36,11	0,05	276,0	119,0	54,2	303,15	105,0	51,2	311,15

continuação da TABELA 5.1 - RESUMO DOS RESULTADOS

Condições do ar									Condições do ar							
Q m ³ /s	Entrada				Saída				E m	Tempo de residência (s)	Entrada			Saída		
	Tbs(k)	Tbu(k)	H	Hr%	Tbs(k)	Tbu(k)	H	Hr%			Ubs%	Ubu%	T(k)	Ubs%	Ubu%	T(k)
0,067	399,35	311,35	0,0064	0,43	328,15	309,55	0,038	32,2	0,07	430,0	75,0	42,5	300,15	53,0	34,0	310,15
0,067	393,15	314,85	0,0195	1,55	325,85	312,85	0,0421	45,65	0,07	270,0	97,0	49,3	300,15	79,0	43,7	313,15
0,067	403,15	313,15	0,0099	0,59	348,15	309,15	0,022	8,98	0,1	300,0	123,0	55,0	302,15	95,0	47,5	311,15
0,067	405,15	315,15	0,0155	0,86	327,05	312,05	0,0391	40,15	0,1	300,0	95,0	48,8	301,15	69,0	40,9	312,15
0,067	380,15	313,95	0,0220	2,68	377,65	313,75	0,0225	2,98	0,1	330,0	96,0	48,5	299,15	70,0	42,0	313,15

TABELA 5.2 - Resultados Experimentais

G (kg/m ² .S)	E (m)	To (k)	Ts (k)	t (s)	Uo	Us	$W\left(\frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \times 10^4\right)$	η
0,034	0,05	375,15	304,15	277	0,51	0,43	4,33	0,43
0,0879	0,02	403,15	311,15	252	0,95	0,69	6,19	0,18
	0,02	390,15	310,15	240	0,77	0,52	6,25	0,21
	0,03	396,15	306,15	370	0,83	0,60	5,59	0,17
	0,05	399,15	308,15	390	0,77	0,58	7,31	0,22
	0,1	406,15	308,15	462	0,92	0,65	5,26	0,15
0,141	0,03	409,15	312,15	335	0,73	0,53	5,37	0,09
	0,07	388,15	313,15	305	0,91	0,77	9,64	0,22
	0,1	420,15	307,15	435	0,83	0,50	22,75	0,34
0,176	0,005	411,15	314,15	320	0,75	0,52	10,78	0,15
0,211	0,02	418,15	315,15	255	0,78	0,47	7,29	0,08
	0,03	400,15	311,15	240	0,93	0,63	11,25	0,14
	0,05	393,15	314,15	291	1,19	1,05	7,22	0,10
	0,07	399,15	309,15	430	0,75	0,53	10,74	0,136
	0,07	393,15	313,15	270	0,97	0,79	14,0	0,20
	0,1	403,15	309,15	360	1,23	0,95	23,30	0,28
	0,1	405,15	312,15	300	0,95	0,69	26,00	0,32
	0,1	380,15	314,15	330	0,96	0,70	23,60	0,40

TABELA 5.4 - Verificação do modelo.

$W \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{s.m}^2} \times 10^4$	η	$T_0(\text{K})$	$T_E(\text{K})$	$T_E(\text{K})^*$	U_0	U_s	U_s^*
4,33	0,43	375,15	325,15	344,33	0,51	0,42	0,53
6,19	0,18	403,15	314,15	398,49	0,95	0,69	0,78
6,25	0,21	390,15	330,15	385,89	0,77	0,52	0,63
5,59	0,17	396,15	315,65	389,25	0,83	0,60	0,60
7,31	0,22	399,15	335,15	381,9	0,77	0,58	0,54
5,26	0,15	406,15	332,25	356,51	0,92	0,65	0,66
5,37	0,09	409,15	356,85	363,47	0,73	0,46	0,46
9,64	0,22	388,15	322,15	385,29	0,91	0,77	0,74
22,75	0,34	420,15	299,85	372,75	0,83	0,50	0,48
10,78	0,15	411,15	324,75	396,92	0,75	0,52	0,48
7,29	0,08	418,15	408,15	415,3	0,78	0,47	0,53
11,25	0,14	400,15	344,95	394,39	0,93	0,63	0,73
7,22	0,10	393,15	331,55	381,87	119	105	0,98
10,74	0,136	399,15	328,15	382,6	0,75	0,53	0,41
14,0	0,20	393,15	325,15	370,96	0,97	0,79	0,78
23,30	0,28	403,15	348,15	366,3	123	0,95	0,94
26,00	0,32	405,15	327,05	363,37	0,95	0,69	0,71
23,60	0,40	380,15	377,65	352,49	0,96	0,70	0,77

T_E^* - temperatura bulbo seco na saída, estimado

U_s^* - umidade em base úmida na saída, estimado.

TABELA 5.3 - Ajuste de dados experimentais ao modelo (Equação 5.6 e 5.7.

$G \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$	St/E (m^{-1})
0,034	11,36
0,0879	06,18
0,141	04,04
0,176	03,35
0,211	03,67

TABELA 5.5 - Capacidade de processamento de bagaço seco por unidade de área do secador.

$$\frac{C}{AL} \times 10^4 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$$

E m	$G_{\text{kg/m}^2 \text{s}}$	0,01	0,05	0,1	0,5
	0,15		10,2	38,8	59,6
0,10		9,7	31,0	42,8	88,8
0,07		8,9	24,5	34,2	61,5
0,05		7,7	19,0	25,7	46,4

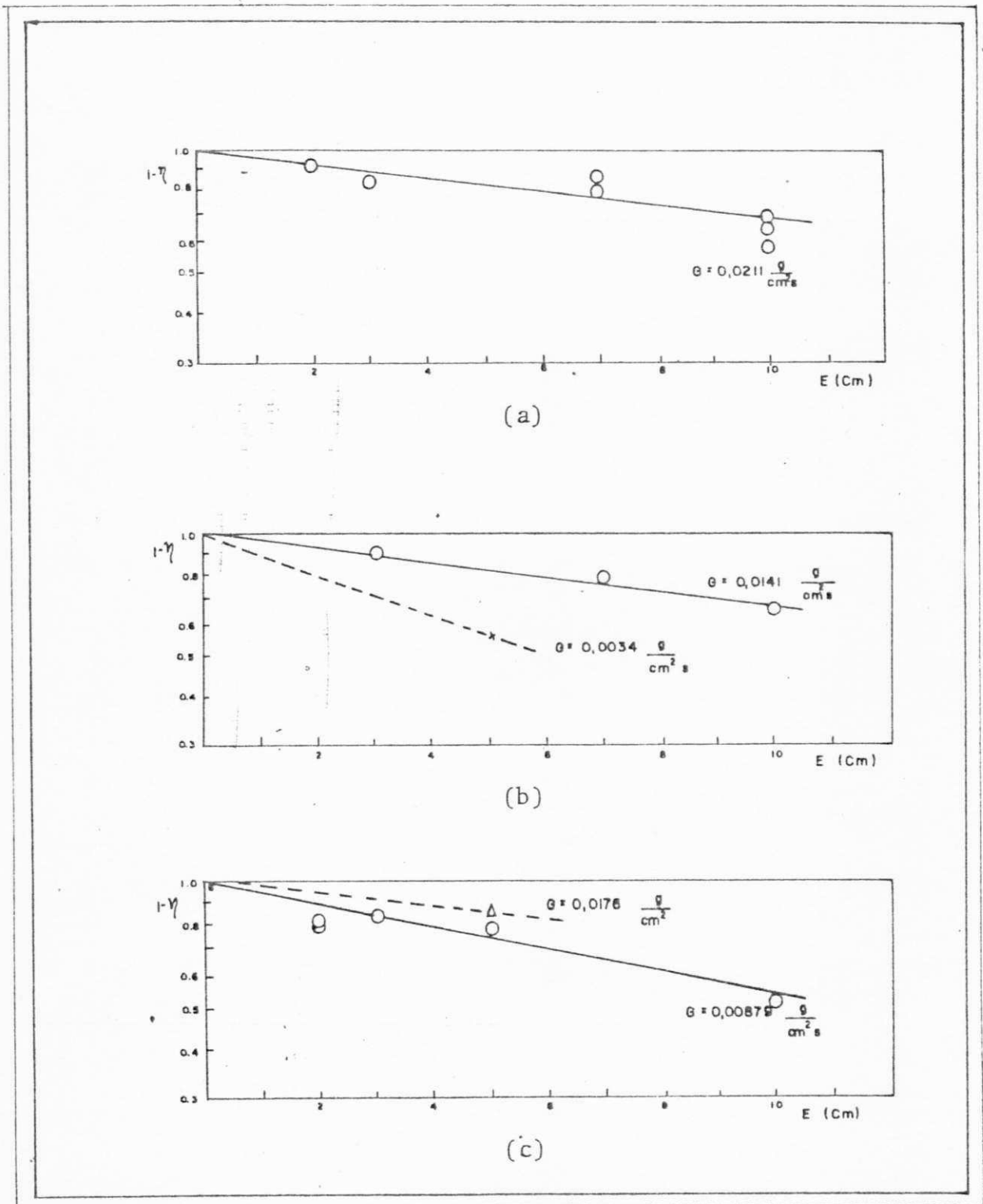


Figura 5.1 - Efeito da espessura no número de Stanton - Equação 5.6.

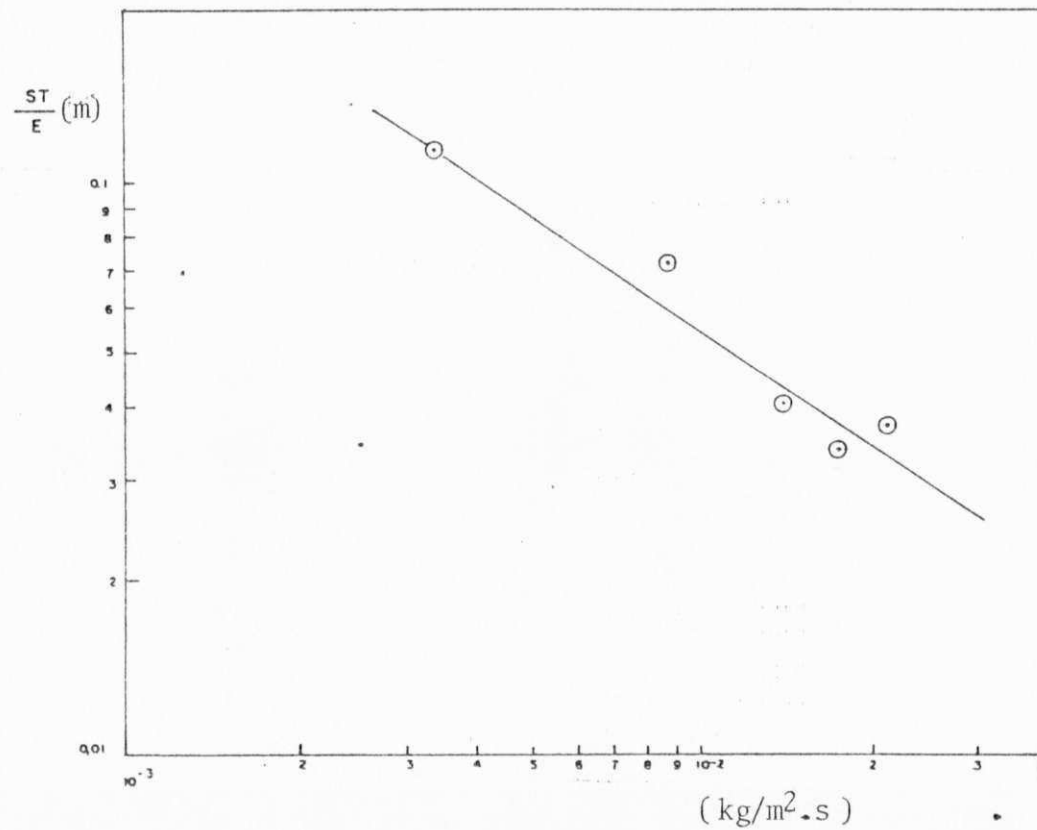


Figura 5.2 - Efeito da vazão no número de Stanton - Equação 5.8a.

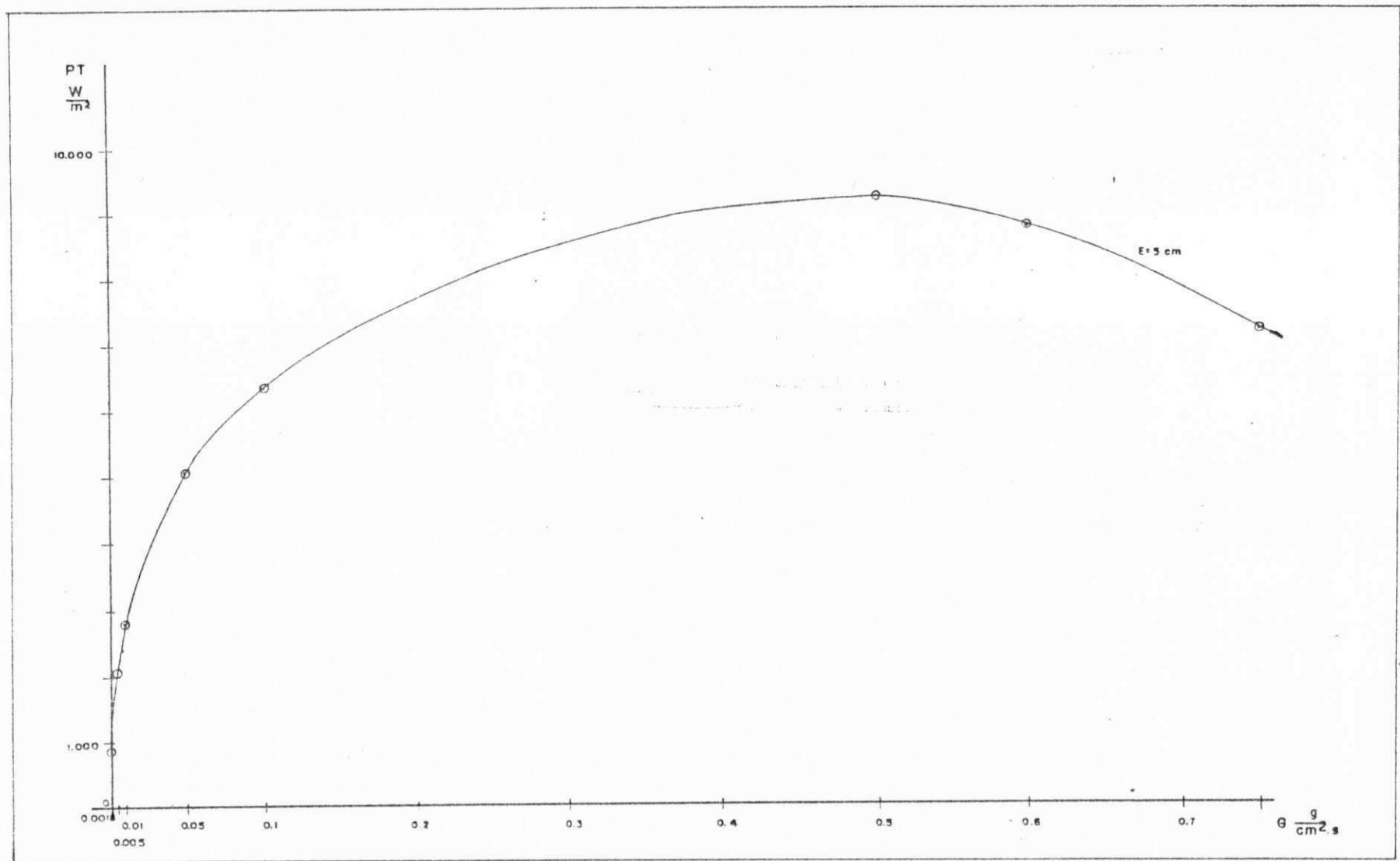


Figura 5.3 - Ganho líquido de potência em função de G para E = 0,05m.

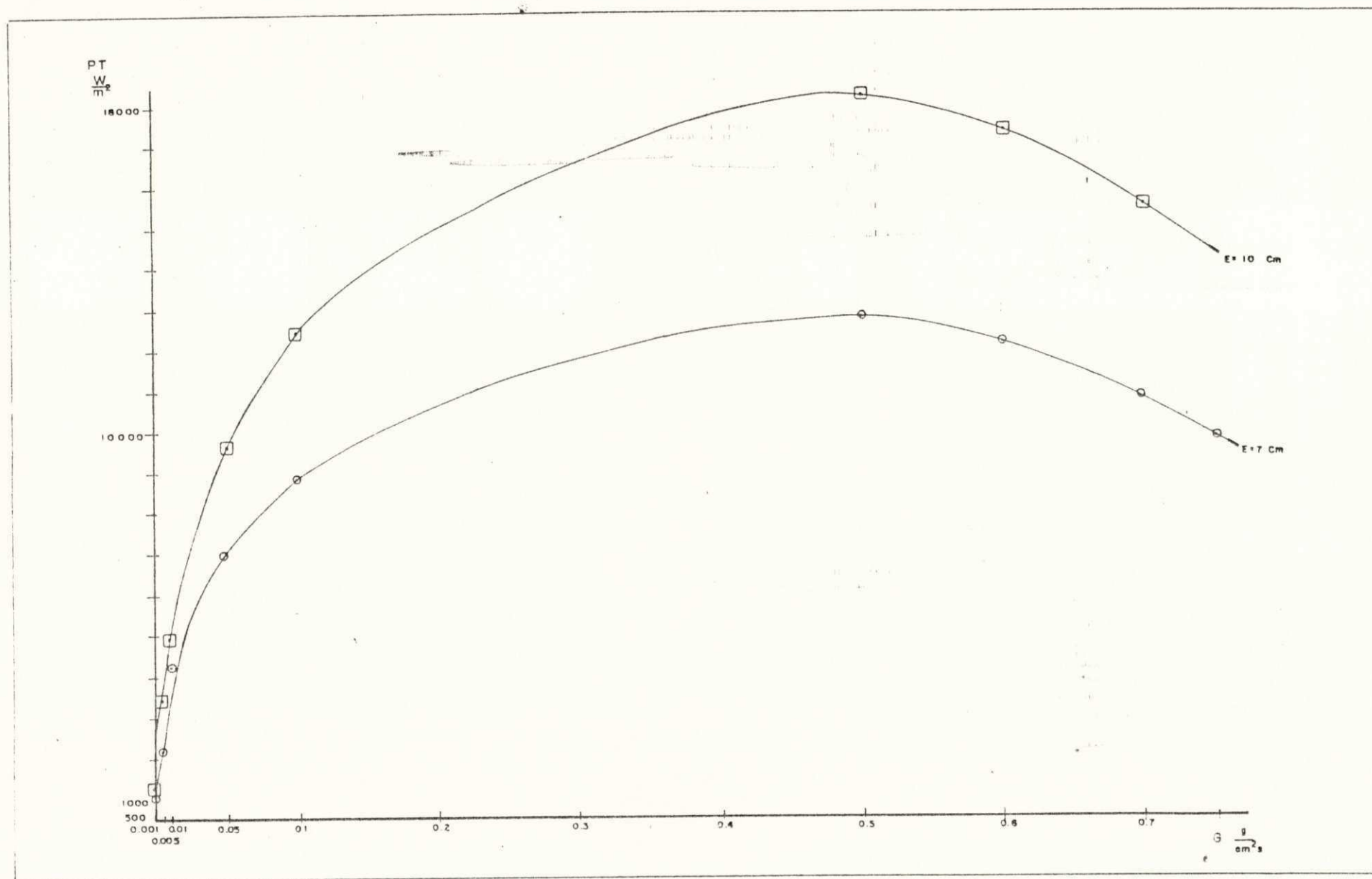


Figura 5.4 - Ganho líquido de potência em função de G para $E=0,07m$ e $E = 0,1m$.

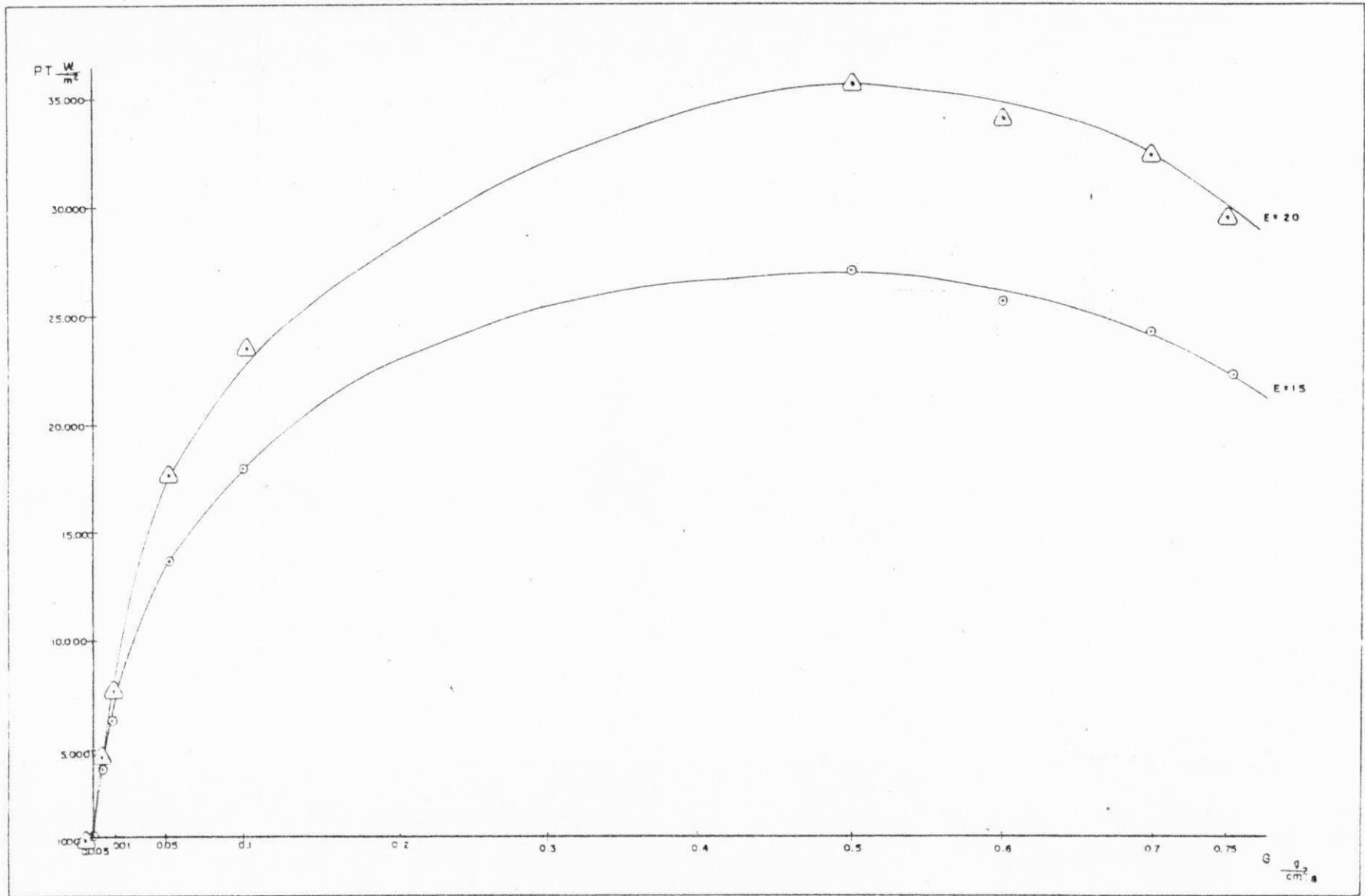


Figura 5.5 - Ganho líquido de potência em função de G para E = 0,15m e E = 0,20m.

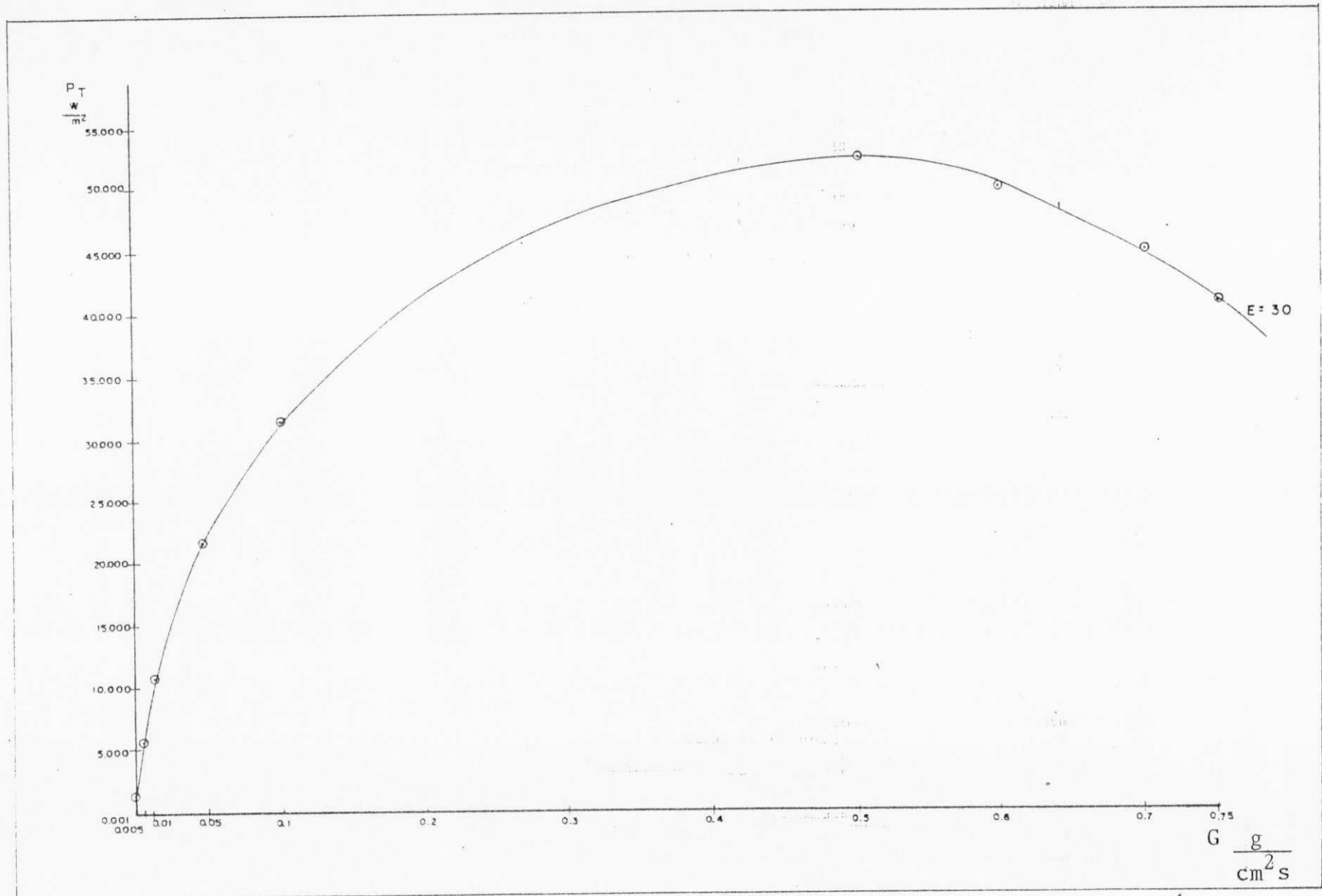


Figura 5.6 - Ganho líquido de potência em função de G para $E = 0,30m$.

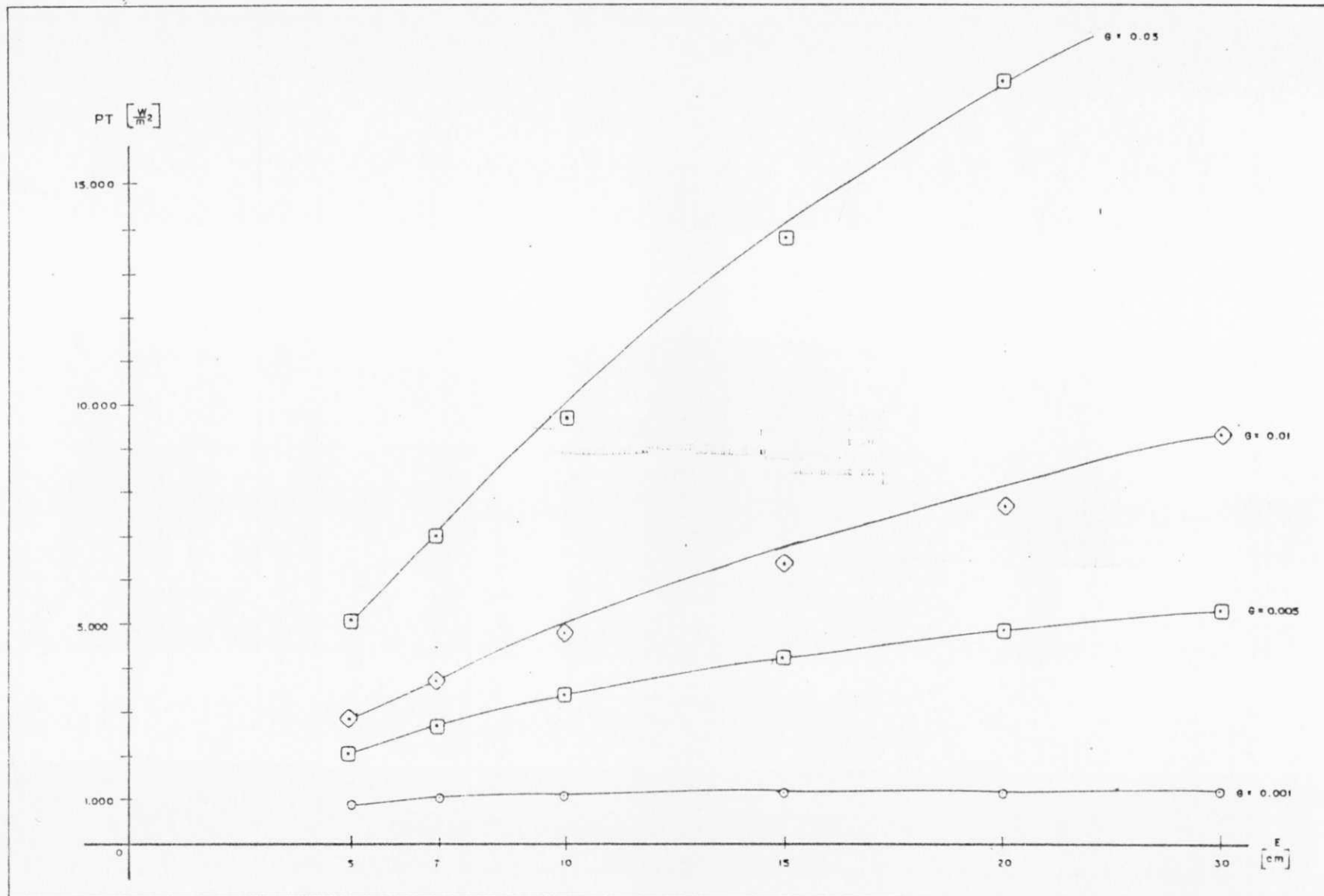


Figura 5.7 - Ganho líquido de potência em função de E para G entre 0,01 e 0,5 $kg/m^2.s$.

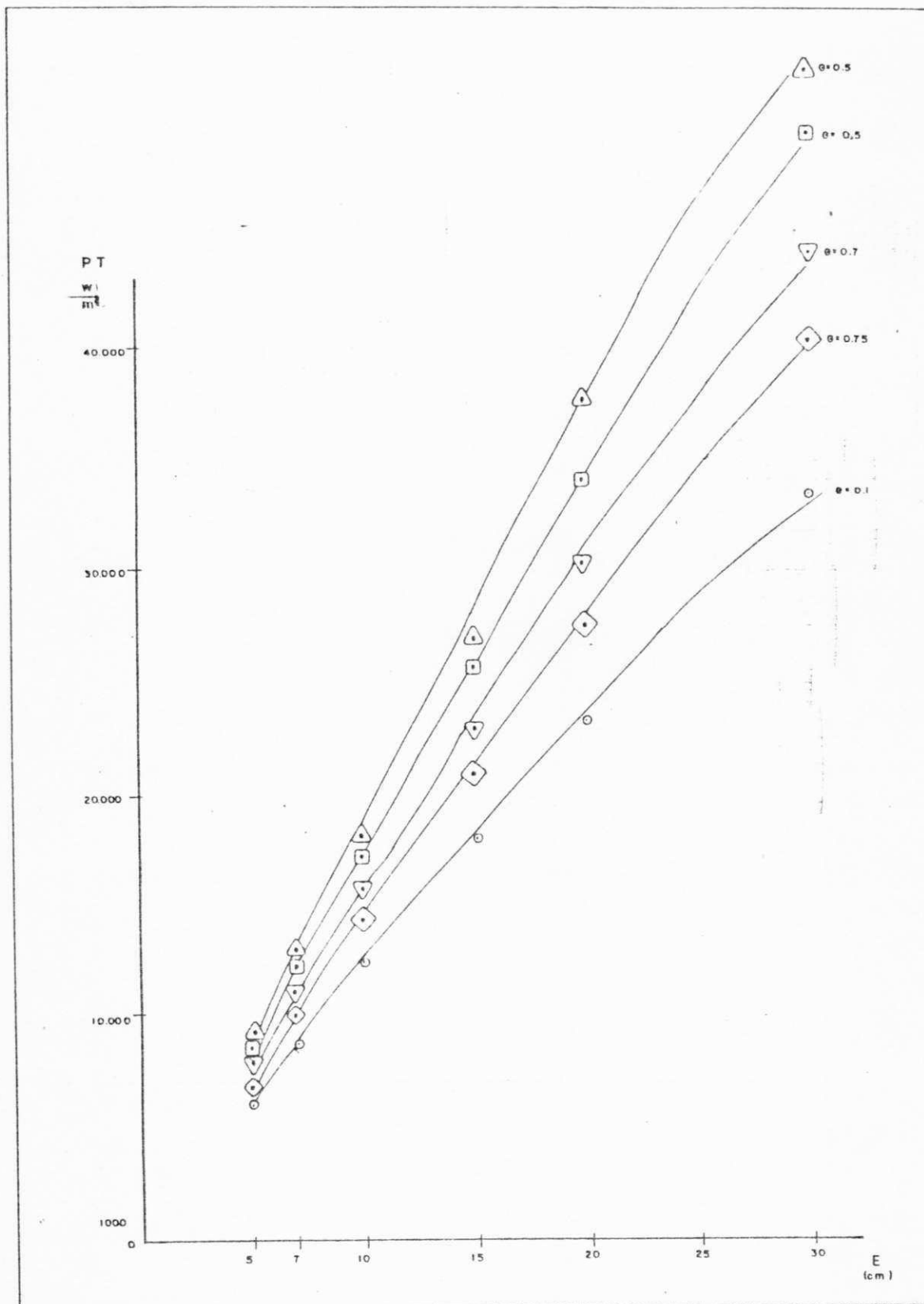


Figura 5.8 - Ganho líquido de potência em função de E para G entre 1,0 e 5,0 $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

A partir dos ensaios realizados no secador de bagaço de cana, escala reduzida, e usando diferentes condições de umidade para o bagaço, tempo de residência, temperatura, vazões de gás de secagem e espessuras do leito de bagaço, podemos concluir:

- O secador para bagaço proposto possui características favoráveis para sua instalação em pequenas unidades.

- A versatilidade em relação a altura do colchão de bagaço que permite trabalhar com diversos graus de secagem e capacidade conforme as necessidades de produção.

- Facilidade de operação, baixo custo e razoável eficiência na secagem com baixo consumo de potência.

- Os desvios entre os valores de umidade de saída do bagaço preditos pelo modelo e os resultados experimentais são da ordem de 10%, valor considerado satisfatório dado o número de variáveis envolvidas.

- Com os resultados encontrados foi dimensionado um secador em escala industrial adequado para as condições operacionais de um engenho de pequena capacidade.

Nessas condições mostrou-se que é possível processar praticamente todo o bagaço oriundo das moendas com 55% de umidade e secá-lo até níveis de umidade de 44% necessitando

para este fim de uma área de secagem de 15m^2 .

- Não se recomenda trabalhar com espessura de bagaço muito grande, devido a que é inviável para o processo de secagem num secador de esteira.

- Concluí-se que o máximo valor de ganho de potência, foi encontrado na faixa de uma velocidade mássica igual a $5,0 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$.

CAPÍTULO VII

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para obter melhor conhecimento sobre a secagem de bagaço de cana, em secadores horizontais de esteira e fluxos cruzados, podemos sugerir:

1 - Ensaiai outros modelos para verificação e simulação de secadores horizontais de esteira em fluxo cruzado.

2 - Verificar o comportamento do bagaço submetido à secagem em camadas de bagaço igual e superiores a 0,30m.

3 - Verificar o comportamento do secador para bagaço de cana, usando alturas do leito de bagaço igual e superiores a 0,30m.

4 - Isolar a tubulação por onde circula o fluxo de ar de secagem e o secador, com a finalidade de evitar perdas de calor durante o processo.

5 - Projetar e construir um protótipo de demonstração.

6 - Análise econômica, comparando outros tipos de secaidores e outros meios de secagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALSINA, O.L.S., MARIZ, F.T., ROMERO, J.E.R., CONRADO, L.S. (1987), "Secador de Esteira para Bagaço de Cana". Anais do XV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Uberlândia de 21 a 23 de outubro, Minas Gerais, 1987.
- ALSINA, O.L.S. e ROMERO, J.E.R., (1987). Otimização do Desempenho de um Secador de Esteira para Bagaço de Cana". IV Encontro Paraibano de Química de 27 a 29 de novembro de 1987 - Centro Cultural, Campina Grande - Paraíba.
- ALSINA, O.L.S. e BEZERRA, H.F. (1986). "Programa de Computação com Subrotina para o Cálculo do Dimensionamento de um Secador de Esteira - UFPb.
- BAVER, D. *et alii* (1972). "Soil Physics". Quarta edição, Juhn Willey and Sons, New York, 1972, apud ALVARENGA, L.C. ; FORTES, M.; FILHO, J.B.P. e HARA, T. "Transporte...", op. cit., p.7.
- COSTA, G.M.M. (1983). "Melhoria do Balanço Térmico com o Uso de Secadores de Bagaço". VI Encontro Técnico Região Centro - Sul de Alagoas. Usina Triunfo.
- COSTA, G.M.M. (1984). "Melhoria de Balanços Térmicos Visan Sobre de Bagaço". II Simpósio de Avaliação da Agroindústria da Cana de Açúcar em Alagoas.

- COUTINHO, P.L.A., MEDEIROS, J.L., MASSARANI, G. (1982). "Secagem de Grãos em Fluxo Cruzado", Anais do X Encontro Sobre Escoamento de Meios Porosos, Vol. I, 206-221-São Carlos, SP.
- COMINGS, E.W. e SHERWOOD, T.K. (1934). "The Drying of Solids-VII: Moisture Movement by Capillarity in Drying Granular Materials". Ind. Eng. Chem., 26:p.1096, 1934.
- CUNHA, B. "Tecnologia do Açúcar", Coleção Canavieira, IAA, Brasil Açucareiro, Vol. nº 02, 20-23, (1974).
- CEAGLSKE, N.H. e HOUGEN, O.A., (1937). "Drying Granular Solids". Ind. Eng. Chem., 29: 805 - 813, 1937.
- FOUST, A., WENZEL, L., CLUMP, C., ANDENSEN, L. (1982) "Princípios das Operações Unitárias". 2ª edição. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1982.
- GUILHON, C.V. (1980). "Bagaço de cana substituto potencial do óleo combustível". Brasil Açucareiro, II Simpósio de Energia do Hemisfério Ocidental, [1], 17-21.
- LUIZ, A.M. e SAMPAIO, F.R. (1981). "Influência da Capilaridade na Secagem de Meios Porosos". Anais do III Encontro Nacional de Secagem, Viçosa, 1981.
- MARANHÃO, L.E.C. (1980). "Secador Individual para Bagaço". XVII Congresso da ISSCT, Filipinas, Brasil Açucareiro, 2-82-91.
- MARANHÃO, L.E.C. e COSTA, G.M.M. (1981). "A Eficiência das Caldeiras com o Uso de Secadores de Bagaço". II Congresso Nacional da Sociedade dos Técnicos Açucareiros do

Brasil - STAB.

MARANHÃO, L.E.C. (1983). "Secagem de Bagaço". Seminário de Avaliação do Bagaço, Sopral, São Paulo, 1-15.

MARIZ, T.F. (1986). "Secagem de Casca de Carço de Algodão em Leito Fixo". Dissertação Apresentada ao Curso de Engenharia Química da UFPb, em cumprimento para obtenção do Grau de Mestre (1986).

MASSARANI, G. e VALENÇA, G.C. (1981). "Secagem de Bagaço de Cana". Anais do III Encontro Nacional de Secagem, Viçosa, Julho 1981 - 355.

MEDEIROS, J.L. e MASSARANI, G., (1982). "Secagem de Bagaço de Cana III". Trabalho apresentado no X Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos, São Carlos, 1982, UFSCar, I - 222-241.

MEDEIROS, J.L. e MASSARANI, G., (1983). "Secagem de Bagaço de Cana IV". Trabalho apresentado no IV Encontro de Secagem, 1983. Secagem de Produtos Agrícolas Coletânea COPPE - 119-128.

MEDEIROS, J.L., MASSARANI, G., ASSUMPÇÃO, G.B., (1983). "Secagem de Grãos em Secador de Fluxos Cruzados II". Anais do XI ENEMP, Rio de Janeiro, outubro 1983. I - 177-191.

NEBRA, S.A. e MACEDO, I. de C. (1986). "Secagem Pneumático de Bagaço de Cana II". Anais do II Congresso Latinoamericano de Transferência de Calor e Matéria", II - 941-952.

NORRIS, D., "Valor Energético do Bagaço". Tecnologia do Açú

- car, Vol. nº 40, Est. Exp. Hawaii). [2] 68-70 (1974).
- NONHEBEL, G. e MOSS, A.A.H., (1979). "El Secado de Sólidos en la Indústria Química". Editorial Reverté, S.A., 1979.
- OLIVEIRA, H.P. (1980). "Aproveitamento do Bagaço de Cana como Combustível nas Usinas e Destilarias" Brasil Açucareiro, 20 - 23, Fevereiro 1980.
- PERRY e CHILTON (1980). "Manual de Engenharia Química". Quinta edição, Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980 - Capítulo 20.3 - 20.62.
- PHILIP, J.R. e DE VRIES, D.A. (1957). "Moisture Movement in Porous Materials Under Temperature Gradient". Trans. Am. Geophys. Union, 38 (2): 222 - 232, 1957.
- RAGAJOPAL, K. (1983). "Processos Alternativos para Secagem de Bagaço". Anais do XI Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, I, 166 - 176.
- ROMERO, J.E.R. e ALSINA, O.L.S. (1986). "Secador de Esteira para Bagaço Comunicação de Resultados Preliminares. Anais do XIV Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos, Campinas, S.P. 160 - 171, 1986.
- SANTOS, L.M. e LEITÃO, M.D. (1979). "Apreciação dos Recursos Naturais Disponíveis para Utilização como Fontes de Energia Complementares ao Petróleo". Boletim Técnico da PETROBRÁS, 22 [3], 211 - 226 Jul./Set. 1979.
- SHERWOOD, T.K. (1930). "The Drying of Solids - III" Ind. Eng.

Chem, 22: 132.

SHERWOOD, T.K., (1929). "The Drying of Solids - I" Ind.Eng. Chem., 21: 12.

SHERWOOD, T.K., (1932). "The Drying of Solids -IV".Ind.Eng. Chem., 24: 307.

THYGESSON, R.J. e GROSSMANN, D.E. (1970). "Optimization of a Continuous Through-circulation Dryer" Aiche Journal, Vol. 16, nº 5, 749 a 754.

VALENÇA, G.C. e MASSARANI, G. (1982). "Secagem de Bagaço de Cana II". Anais do I Congresso Latinoamericano de Transferência de Calor e Massa. La Plata, Novembro de 1982. - Vol. II - 798 - 811.

APÊNDICE "A"

(Porosidade e densidade aparente do leito de bagaço para di
versos níveis de umidade).

Tabela 4.1 - Porosidade e densidade aparente do leito de bagaço para diversos níveis de umidade.

ξ	U_{bs} (%)	ρ_a (kg/m ³)
0,970	49,0	45,47
0,980	75,5	57,56
0,998	51,0	42,51
0,954	99,0	67,18
0,983	2,9	32,28
0,935	81,3	70,71
0,986	103,3	58,90
0,997	11,2	36,24

Na figura 4.2, mostra-se o efeito da umidade (U_{bs}) na densidade aparente e na figura 4.3 a variação de porosidade. Observa-se que a densidade aparente aumenta de forma aproximadamente linear com a umidade, enquanto que a porosidade é elevada, em torno de 90 - 95%, apresentando um ligeiro de crêscimo, também aproximadamente linear, com a umidade.

Um ajuste por mínimos quadrados dos dados experimentais deu o seguinte resultado:

- Para a densidade aparente:

$A = 31,5944979$. . . Termo Constante.

$B = 3,448317872 \times 10^{-4}$. Coeficiente de Regressão.

$r = 0,9099713844$. . . Coeficiente de Correlação.

$r^2 = 0,8280479205$. . . Coeficiente Crítico.

$$\rho_a = 31,6 + 0,0345 \times U_{bs}$$

- Para a porosidade:

A = 0,9920195781 . . . Termo Constante.

B = 0,000280550 . . . Coeficiente de Regressão.

r = 0,485858809 . . . Coeficiente de Correlação.

r^2 = 0,2360580836 . . . Coeficiente Crítico.

$\xi = 0,992 - 0,028 \times U_{bs}$

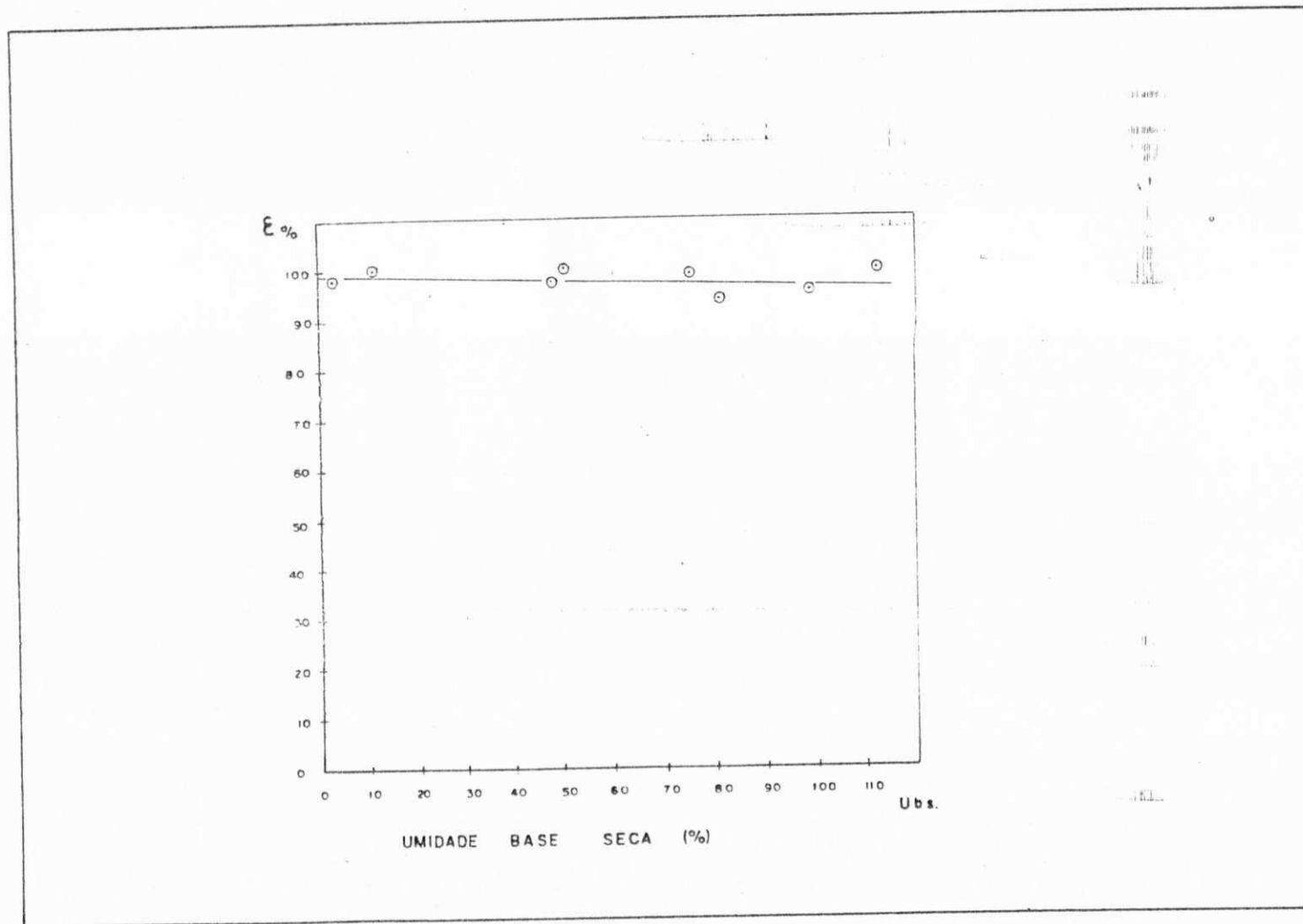


Figura 4.3 - Gráfico da porosidade

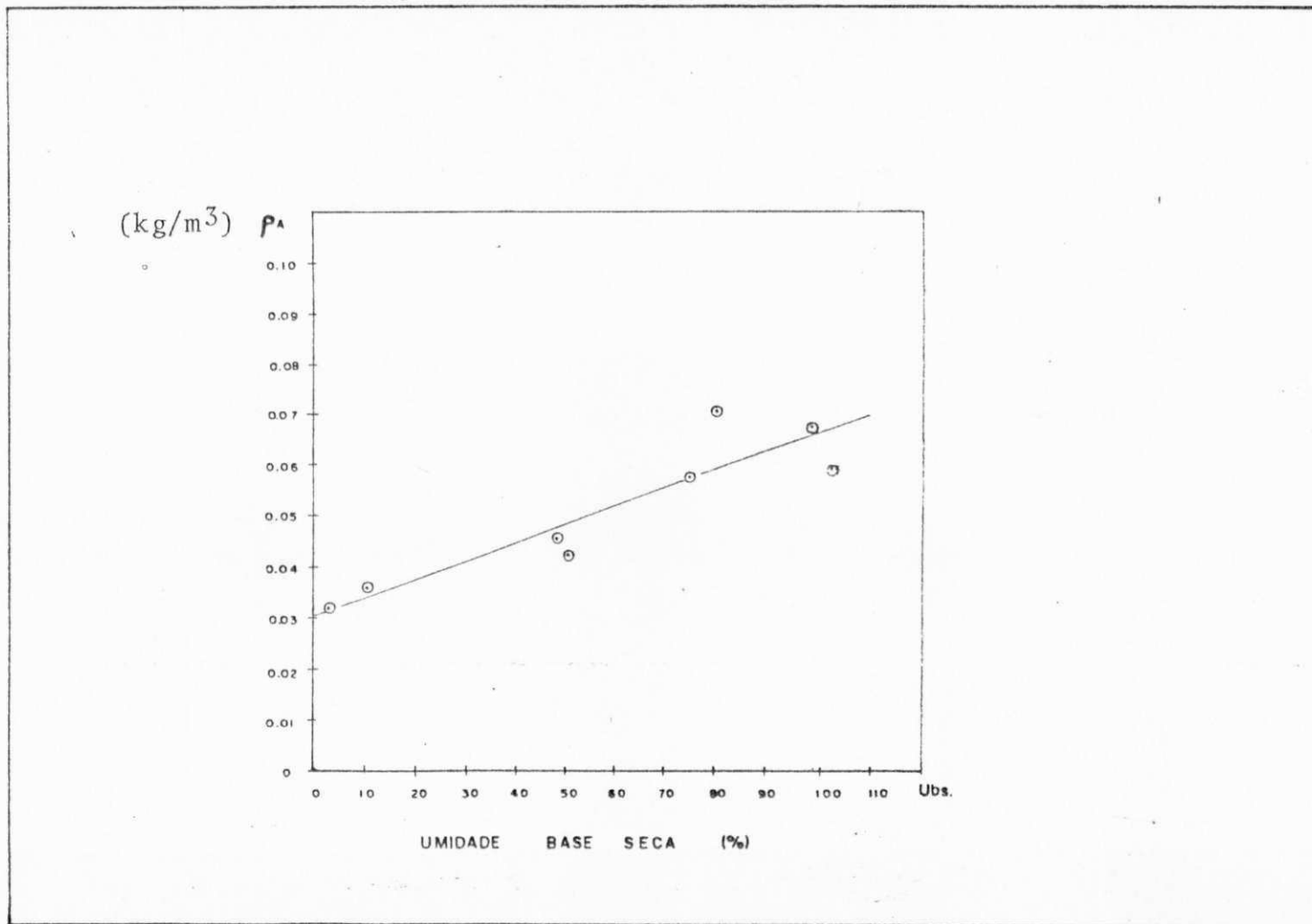


Figura 4.2 - Gráfico da densidade aparente.

APÊNDICE "B"

(Tabelas de dados obtidos no secador de bagaço de cana)

EXPERIÊNCIA Nº : 01
 VAZÃO DO AR : 41 m³/h
 UMIDADE AMBIENTE : 60%
 TEMPERATURA AMBIENTE: 27°C

TEMPERATURA DO BAGAÇO NA ENTRADA: 26°C
 TEMPERATURA DO BAGAÇO NA SAÍDA: 33°C
 TEMPO DE RESIDÊNCIA : 4' 37"
 CAMADA DO BAGAÇO : 5 cm

UMIDADE DO BAGAÇO									
ENTRADA					SAÍDA				
Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)	Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)
1	2.824	1.842	35	53	5	5.050	3.549	30	42
2	2.824	1.917	32	47	6	4.678	3.259	30	43
3	3.858	2.614	32	47	7	4.257	2.911	31	46
4	3.178	2.023	36	57	8	5.195	3.664	29	42
Umidade média			34	51	Umidade média			30	43

TEMPERATURA DO AR									
Determinação		1	2	3	4	5	6	Temperatura média	
								mV	°C
Entrada	Bulbo seco mV	3,95	3,96	3,95	3,96	3,97	3,96	3,96	102
	Bulbo úmido mV	0,45	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	35,7
Saída	Bulbo seco mV	1,25	1,35	1,42	1,36	1,29	1,24	1,32	52,0
	Bulbo úmido mV	0,14	0,19	0,21	0,24	0,25	0,27	0,22	31,2

EXPERIÊNCIA N° : 02
 VAZÃO DO AR : 100 m³/h
 UMIDADE AMBIENTE : 65%
 TEMPERATURA AMBIENTE : 27°C

TEMPERATURA DO BAGAÇO NA ENTRADA: 26°C
 TEMPERATURA DO BAGAÇO NA SAÍDA : 37°C
 TEMPO DE RESIDÊNCIA : 4' 12"
 CAMADA DO BAGAÇO : 2,0 cm

UMIDADE DO BAGAÇO									
ENTRADA					SAÍDA				
Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _{bu} (%)	U _{bs} (%)	Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _{bu} (%)	U _{bs} (%)
1	7.251	3.642	50	99	5	4.548	2.720	40	67
2	7.025	3.805	46	85	6	4.995	2.917	42	71
3	7.758	3.971	49	95	7	4.565	2.741	40	66
4	7.371	3.679	50	100	8	5.818	3.425	41	70
Umidade média			49	95	Umidade média			41	69

TEMPERATURA DO AR										
Determinação									Temperatura média	
		1	2	3	4	5	6	7	mV	°C
Entrada	Bulbo seco mV	5,49	5,50	5,48	5,37	5,40	5,46	5,49	5,45	130,5
	Bulbo úmido mV	0,67	0,73	0,72	0,72	0,73	0,73	0,73	0,72	41,0
Saída	Bulbo seco mV	1,56	1,63	1,80	2,46	2,31	1,92	1,94	1,95	64,0
	Bulbo úmido mV	0,41	0,50	0,55	0,60	0,62	0,63	0,65	0,56	38,0

EXPERIÊNCIA N° : 03
 VAZÃO DO AR : 100 m³/h
 UMIDADE AMBIENTE : 90%
 TEMPERATURA AMBIENTE : 23°C

TEMPERATURA DO BAGAÇO NA ENTRADA: 24°C
 TEMPERATURA DO BAGAÇO NA SAÍDA: 28°C
 TEMPO DE RESIDÊNCIA : 4 minutos
 CAMADA DO BAGAÇO : 2,0 cm

UMIDADE DO BAGAÇO									
ENTRADA					SAÍDA				
Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)	Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)
1	4.744	2.838	40	67	5	6.400	4.073	36	57
2	4.388	2.538	42	73	6	4.009	2.695	33	49
3	4.574	2.474	46	85	7	3.713	2.413	35	54
4	5.216	2.835	45	84	8	3.830	2.610	32	48
Umidade média			43	77	Umidade média			34	52

TEMPERATURA DO AR										
Determinação		1	2	3	4	5	6	7	Temperatura média	
									mV	°C
Entrada	Bulbo seco mV	4,99	4,97	4,96	4,96	4,94	4,97	4,99	4,97	117,0
	Bulbo úmido mV	0,81	0,83	0,84	0,84	0,82	0,82	0,80	0,82	39,0
Saída	Bulbo seco mV	1,81	1,82	2,00	1,82	1,72	1,68	1,71	1,79	57,0
	Bulbo úmido mV	0,61	0,73	0,78	0,78	0,78	0,77	0,75	0,74	37,0

EXPERIÊNCIA Nº : 04
 VAZÃO DO AR : 100 m³/h
 UMIDADE AMBIENTE : 60%
 TEMPERATURA AMBIENTE : 27°C

TEMPERATURA DO BAGAÇO NA ENTRADA: 27°C
 TEMPERATURA DO BAGAÇO NA SAÍDA: 37°C
 TEMPO DE RESIDÊNCIA : 6' 10"
 CAMADA DO BAGAÇO : 3,0 cm

UMIDADE DO BAGAÇO									
ENTRADA					SAÍDA				
Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _{bu} (%)	U _{bs} (%)	Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _{bu} (%)	U _{bs} (%)
1	3.452	1.735	49	99	5	4.826	3.101	36	56
2	6.391	3.453	46	85	6	4.493	2.803	38	60
3	4.785	2.735	43	75	7	6.214	3.806	39	63
4	4.244	2.427	43	75	8	6.343	3.927	38	61
Umidade média			45	83	Umidade média			38	60

TEMPERATURA DO AR									
Determinação		1	2	3	4	5	6	Temperatura média	
								mV	°C
Entrada	Bulbo seco mV	5,05	5,02	5,04	5,06	5,07	5,05	5,04	122,8
	Bulbo úmido mV	0,44	0,43	0,45	0,44	0,44	0,45	0,44	35,4
Saída	Bulbo seco mV	0,89	0,85	0,84	0,83	0,79	0,72	0,82	42,5
	Bulbo úmido mV	0,30	0,32	0,30	0,32	0,34	0,36	0,32	33,0

EXPERIÊNCIA : 05
 VAZÃO DO AR : 100 m³/h
 UMIDADE AMBIENTE : 55%
 TEMPERATURA AMBIENTE : 27°C

TEMPERATURA DO BAGAÇO NA ENTRADA: 27°C
 TEMPERATURA DO BAGAÇO NA SAÍDA : 36°C
 TEMPO DE RESIDÊNCIA : 6' 30"
 CAMADA DO BAGAÇO : 5,0cm

UMIDADE DO BAGAÇO									
ENTRADA					SAÍDA				
Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)	Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)
1	4.109	2.281	44	80	5	4.803	2.972	38	61
2	3.657	2.195	40	66	6	6.595	4.573	39	64
3	4.798	2.682	44	79	7	6.107	3.919	36	56
4	3.820	2.101	45	82	8	4.733	3.160	33	50
Umidade média			43	77	Umidade média			36	58

TEMPERATURA DO AR									
Determinação		1	2	3	4	5	6	Temperatura média	
								mV	°C
Entrada	Bulbo seco mV	5,15	5,20	5,22	5,23	5,25	5,25	5,22	126,0
	Bulbo úmido mV	0,59	0,60	0,60	0,61	0,61	0,61	0,60	38,4
Saída	Bulbo seco mV	1,85	1,83	1,82	1,88	1,90	1,79	1,84	62,0
	Bulbo úmido mV	0,40	0,42	0,43	0,44	0,43	0,44	0,43	35,2

EXPERIÊNCIA N° : 06
 VAZÃO DO AR : 100 m³/h
 UMIDADE AMBIENTE : 56%
 TEMPERATURA AMBIENTE : 28°C

TEMPERATURA DO BAGAÇO NA ENTRADA: 29°C
 TEMPERATURA DO BAGAÇO NA SAÍDA: 40°C
 TEMPO DE RESIDÊNCIA : 7' 42"
 CAMADA DO BAGAÇO : 10 cm

UMIDADE DO BAGAÇO									
ENTRADA					SAÍDA				
Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)	Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)
1	3.072	1.694	45	81	5	5.457	3.334	39	64
2	5.719	2.996	47	91	6	4.518	2.711	40	67
3	4.132	2.112	49	96	7	4.401	2.629	40	67
4	4.102	2.047	50	100	8	4.498	2.750	39	63
Umidade média			48	92	Umidade média			39,5	65

TEMPERATURA DO AR									
Determinação		1	2	3	4	5	6	Temperatura média	
								mV	°C
Entrada	Bulbo seco mV	5,54	5,45	5,53	5,56	5,57	5,60	5,54	133,0
	Bulbo úmido mV	0,64	0,64	0,65	0,65	0,64	0,65	0,64	40,1
Saída	Bulbo seco mV	1,83	1,83	1,62	1,54	1,51	1,53	1,64	59,1
	Bulbo úmido mV	0,38	0,35	0,37	0,39	0,40	0,41	0,38	35,2

EXPERIÊNCIA N° : 07
 VAZÃO DO AR : 160 m³/h
 UMIDADE AMBIENTE : 60%
 TEMPERATURA AMBIENTE : 28°C

TEMPERATURA DO BAGAÇO NA ENTRADA: 36°C
 TEMPERATURA DO BAGAÇO NA SAÍDA: 45°C
 TEMPO DE RESIDÊNCIA : 5' 35"
 CAMADA DO BAGAÇO : 3,0 cm

UMIDADE DO BAGAÇO									
ENTRADA					SAÍDA				
Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)	Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)
1	4.336	2.460	43	76	5	3.081	1.966	36	57
2	3.261	1.934	41	69	6	3.275	2.057	37	59
3	4.077	2.369	42	72	7	3.547	2.335	34	52
4	4.655	2.649	43	76	8	3.019	2.068	31	46
Umidade média			42	73	Umidade média			34	53

TEMPERATURA DO AR									
Determinação		1	2	3	4	5	6	Temperatura média	
								mV	°C
Entrada	Bulbo seco mV	5,72	5,73	5,76	5,73	5,66	5,70	5,72	136,0
	Bulbo úmido mV	0,72	0,73	0,73	0,73	0,74	0,75	0,73	41,8
Saída	Bulbo seco mV	2,95	2,69	2,96	3,00	3,06	2,96	2,94	83,7
	Bulbo úmido mV	0,57	0,58	0,54	0,57	0,60	0,60	0,57	38,8

EXPERIÊNCIA N° : 08
 VAZÃO DO AR : 160 m³/h
 UMIDADE AMBIENTE : 70%
 TEMPERATURA AMBIENTE : 28°C

TEMPERATURA DO BAGAÇO NA ENTRADA: 28°C
 TEMPERATURA DO BAGAÇO NA SAÍDA: 39°C
 TEMPO DE RESIDÊNCIA : 5 minutos
 CAMADA DO BAGAÇO : 7,0 cm

UMIDADE DO BAGAÇO									
ENTRADA					SAÍDA				
Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)	Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _s (%)	U _s (%)
1	4.877	2.522	48,3	93,4	5	5.201	2.890	44,4	79,9
2	5.071	2.708	46,6	87,3	6	5.015	2.805	44,1	78,8
3	5.168	2.723	47,3	89,6	7	5.022	2.905	42,1	72,9
4	5.196	2.705	47,9	92,0	8	5.180	2.905	43,9	78,3
Umidade média			47,5	91,0	Umidade média			43,6	77,0

TEMPERATURA DO AR									
Determinação		1	2	3	4	5	6	Temperatura média	
								mV	°C
Entrada	Bulbo seco mV	4,57	4,58	4,58	4,58	4,58	4,60	4,58	115,0
	Bulbo úmido mV	1,18	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	50,0
Saída	Bulbo seco mV	1,11	1,13	1,13	1,13	1,10	1,09	1,11	49,2
	Bulbo úmido mV	0,61	0,64	0,64	0,65	0,65	0,65	0,64	40,0

EXPERIÊNCIA Nº : 09
 VAZÃO DO AR : 160 m³/h
 UMIDADE AMBIENTE : 70%
 TEMPERATURA AMBIENTE : 24°C

TEMPERATURA DO BAGAÇO NA ENTRADA: 29°C
 TEMPERATURA DO BAGAÇO NA SAÍDA: 36°C
 TEMPO DE RESIDÊNCIA : 7' 15"
 CAMADA DO BAGAÇO : 10 cm

UMIDADE DO BAGAÇO									
ENTRADA					SAÍDA				
Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)	Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)
1	4.467	2.456	45	82	5	3.937	2.585	34	52
2	3.749	2.191	41	71	6	3.838	2.480	35	55
3	4.713	2.547	46	85	7	3.306	2.291	30	44
4	4.372	2.268	48	93	8	2.928	1.955	33	50
Umidade média			45	83	Umidade média			33	50

TEMPERATURA DO AR									
Determinação		1	2	3	4	5	6	Temperatura média	
								mV	°C
Entrada	Bulbo seco mV	6,47	6,49	6,47	6,48	6,47	6,45	6,47	146,7
	Bulbo úmido mV	0,78	0,79	0,80	0,81	0,83	0,87	0,81	39,4
Saída	Bulbo seco mV	1,63	1,56	1,39	1,28	1,25	1,36	1,41	26,7
	Bulbo úmido mV	0,44	0,44	0,50	0,55	0,60	0,63	0,53	34,0

EXPERIÊNCIA Nº : 10
 VAZÃO DO AR : 200 m³/h
 UMIDADE AMBIENTE : 60%
 TEMPERATURA AMBIENTE : 26°C

TEMPERATURA DO BAGAÇO NA ENTRADA: 26°C
 TEMPERATURA DO BAGAÇO NA SAÍDA: 41°C
 TEMPO DE RESIDÊNCIA : 5' 20"
 CAMADA DO BAGAÇO : 5,0 cm

UMIDADE DO BAGAÇO									
ENTRADA					SAÍDA				
Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _{bu} (%)	U _{bs} (%)	Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _{bu} (%)	U _{bs} (%)
1	5.410	3.137	42	72	5	3.161	1.986	37	59
2	3.699	2.099	43	76	6	2.887	1.913	34	51
3	3.560	2.099	41	70	7	2.474	1.647	33	50
4	3.020	1.654	45	82	8	2.579	1.758	32	47
Umidade média			43	75	Umidade média			34	52

TEMPERATURA DO AR									
Determinação		1	2	3	4	5	6	Temperatura média	
								mV	°C
Entrada	Bulbo seco mV	5,81	5,90	5,93	5,94	5,97	6,00	5,9	138,0
	Bulbo úmido mV	0,75	0,75	0,76	0,74	0,73	0,73	0,74	40,0
Saída	Bulbo seco mV	1,33	1,41	1,30	1,36	1,38	1,30	1,35	51,6
	Bulbo úmido mV	0,68	0,66	0,68	0,69	0,70	0,71	0,79	41,0

EXPERIÊNCIA Nº : 11
 VAZÃO DO AR : 240 m³/h
 UMIDADE AMBIENTE : 75%
 TEMPERATURA AMBIENTE: 25°C

TEMPERATURA DO BAGAÇO NA ENTRADA: 26°C
 TEMPERATURA DO BAGAÇO NA SAÍDA: 48°C
 TEMPO DE RESIDÊNCIA : 4' 15"
 CAMADA DO BAGAÇO : 2,0 cm

UMIDADE DO BAGAÇO									
ENTRADA					SAÍDA				
Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)	Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)
1	8.869	4.847	45	83	5	7.792	5.338	31	46
2	5.501	3.314	40	66	6	8.784	6.079	31	44
3	7.088	4.020	43	76	7	7.925	5.619	29	41
4	8.032	4.263	47	88	8	10.731	6.884	36	56
Umidade média			44	78	Umidade média			32	47

TEMPERATURA DO AR									
Determinação		1	2	3	4	5	6	Temperatura média	
		mV						°C	
Entrada	Bulbo seco mV	6,36	6,22	6,32	6,40	6,36	6,34	6,33	145,0
	Bulbo úmido mV	0,96	1,02	1,03	1,04	1,05	1,04	1,0	44,0
Saída	Bulbo seco mV	5,78	5,77	5,78	5,80	5,83	5,85	5,80	135,0
	Bulbo úmido mV	0,60	0,92	0,99	1,00	1,02	1,01	0,9	42,0

EXPERIÊNCIA Nº : 12
 VAZÃO DO AR : 240 m³/h
 UMIDADE AMBIENTE : 80%
 TEMPERATURA AMBIENTE : 23°C

TEMPERATURA DO BAGAÇO NA ENTRADA: 24°C
 TEMPERATURA DO BAGAÇO NA SAÍDA : 35°C
 PESO DE RESIDÊNCIA : 4' minutos
 CAMADA DO BAGAÇO : 3,0 cm

UMIDADE DO BAGAÇO									
ENTRADA					SAÍDA				
Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _{bu} (%)	U _{bs} (%)	Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _{bu} (%)	U _{bs} (%)
1	6.064	3.127	48	94	5	6.537	3.897	40	68
2	6.760	3.617	46	87	6	6.428	3.970	38	62
3	9.964	4.974	50	100	7	10.194	6.176	39	65
4	6.467	3.410	47	90	8	6.121	3.933	36	56
Umidade média			48	93	Umidade média			38	63

TEMPERATURA DO AR									
Determinação		1	2	3	4	5	6	Temperatura média	
								mV	°C
Entrada	Bulbo seco mV	5,54	5,56	5,60	5,42	5,48	5,39	5,50	127,0
	Bulbo úmido mV	0,93	0,94	0,96	0,97	0,96	0,95	0,95	41,0
Saída	Bulbo seco mV	2,52	2,43	2,37	2,52	3,00	2,60	2,57	71,8
	Bulbo úmido	0,66	0,75	0,84	0,86	0,87	0,83	0,80	38,0

EXPERIÊNCIA Nº : 13
 VAZÃO DO AR : 240 m³/h
 UMIDADE AMBIENTE : 86%
 TEMPERATURA AMBIENTE : 27°C

TEMPERATURA DO BAGAÇO NA ENTRADA: 30°C
 TEMPERATURA DO BAGAÇO NA SAÍDA: 38°C
 TEMPO DE RESIDÊNCIA : 4,6 minutos
 CAMADA DO BAGAÇO : 5,0 cm

UMIDADE DO BAGAÇO									
ENTRADA					SAÍDA				
Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _{bi} (%)	U _{bs} (%)	Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _{bu} (%)	U _{bs} (%)
1	5.050	2.271	55	1,224	5	7.354	3.511	52	1,094
2	5.092	2.355	53	1,162	6	5.451	2.640	51	1,065
3	5.359	2.416	55	1,218	7	7.348	3.611	51	1,035
4	6.083	2.806	54	1,168	8	5.124	2.532	51	1,024
Umidade média			54,2	1,193	Umidade média			51,2	1,055

TEMPERATURA DO AR									
Determinação		1	2	3	4	5	6	Temperatura média	
								mV	°C
Entrada	Bulbo seco mV	4,90	4,80	4,91	-	-	-	4,87	120,0
	Bulbo úmido mV	0,85	0,87	0,85	0,85	0,92	1,12	0,91	40,5
Saída	Bulbo seco mV	1,42	1,60	1,80	-	-	-	1,60	58,4
	Bulbo úmido mV	0,50	0,60	0,69	0,74	0,76	0,75	0,67	41,0

EXPERIÊNCIA Nº : 14
 VAZÃO DO AR : 240 m³/h
 UMIDADE AMBIENTE : 60%
 TEMPERATURA AMBIENTE : 27°C

TEMPERATURA DO BAGAÇO NA ENTRADA: 27°C
 TEMPERATURA DO BAGAÇO NA SAÍDA: 37°C
 TEMPO DE RESIDÊNCIA : 7' 10"
 CAMADA DO BAGAÇO : 7 cm

UMIDADE DO BAGAÇO									
ENTRADA					SAÍDA				
Amostra	Peso (g) Inicial	Peso (g) Final	U _{bu} (%)	U _{bs} (%)	Amostra	Peso (g) Inicial	Peso (g) Final	U _{bu} (%)	U _{bs} (%)
1	3.167	1.851	41	71	5	4.203	2.671	36	57
2	3.720	1.978	46	88	6	3.411	2.285	33	49
3	4.022	2.382	41	69	7	4.278	2.718	36	57
4	4.914	2.848	42	72	8	3.659	2.424	32	48
Umidade média			42,5	75	Umidade média			34	53

TEMPERATURA DO AR									
Determinação		1	2	3	4	5	6	Temperatura média	
								mV	°C
Entrada	Bulbo seco mV	5,17	5,20	5,24	5,24	5,26	5,27	5,23	126,2
	Bulbo úmido mV	0,58	0,59	0,60	0,61	0,60	0,61	0,60	38,4
Saída	Bulbo seco mV	1,45	1,46	1,50	1,46	1,50	1,50	1,48	55,0
	Bulbo úmido mV	0,48	0,49	0,49	0,50	0,50	0,50	0,49	36,4

EXPERIÊNCIA Nº : 15
 VAZÃO DO AR : 240 m³/h
 UMIDADE AMBIENTE : 70%
 TEMPERATURA AMBIENTE: 28°C

TEMPERATURA DO BAGAÇO NA ENTRADA: 27°C
 TEMPERATURA DO BAGAÇO NA SAÍDA: 40°C
 TEMPO DE RESISTÊNCIA : 4:30 minutos
 CAMADA DO BAGAÇO : 7 cm

UMIDADE DO BAGAÇO									
ENTRADA					SAÍDA				
Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)	Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)
1	5.190	2.570	50,5	105,9	5	6.445	3.046	38,0	62,3
2	5.103	2.638	48,3	93,4	6	5.235	2.243	47,0	90,7
3	5.350	2.600	51,4	105,7	7	4.865	2.693	44,6	80,6
4	5.205	2.756	47,0	88,7	8	5.076	2.771	45,4	83,0
Umidade média			49,3	97,0	Umidade média			43,7	79,0

TEMPERATURA DO AR									
Determinação		1	2	3	4	5	6	Temperatura média	
								mV	°C
Entrada	Bulbo seco mV	4,88	4,89	4,87	4,87	4,86	4,85	4,87	120,0
	Bulbo úmido mV	0,72	0,72	0,73	0,73	0,72	0,72	0,72	41,7
Saída	Bulbo seco mV	1,85	1,32	1,33	1,35	1,26	1,27	1,30	52,7
	Bulbo úmido mV	0,56	0,60	0,63	0,64	0,63	0,64	0,62	39,7

EXPERIÊNCIA N° : 16
 VAZÃO DO AR : 240 m³/h
 UMIDADE AMBIENTE : 100%
 TEMPERATURA AMBIENTE : 25°C

TEMPERATURA DO BAGAÇO NA ENTRADA: 29°C
 TEMPERATURA DO BAGAÇO NA SAÍDA: 38°C
 TEMPO DE RESIDÊNCIA : 5 minutos
 CAMADA DO BAGAÇO : 10,0 cm

UMIDADE DO BAGAÇO									
ENTRADA					SAÍDA				
Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)	Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)
1	5.736	2.702	53	112	5	6.325	3.375	47	87
2	6.453	2.965	54	117	6	6.428	3.378	47	90
3	6.518	2.725	58	139	7	6.511	3.332	49	95
4	6.297	2.765	56	127	8	6.024	3.207	47	107
Umidade média			55	123	Umidade média			47,5	95

TEMPERATURA DO AR									
Determinação		1	2	3	4	5	6	Temperatura média	
								mV	°C
Entrada	Bulbo seco mV	5,64	5,67	5,61	5,58	5,40	5,28	5,53	130,0
	Bulbo úmido mV	0,80	0,79	0,83	0,82	0,83	0,85	0,82	40,0
Saída	Bulbo seco mV	1,66	1,68	2,70	1,70	3,41	4,88	2,7	75,0
	Bulbo úmido mV	0,35	0,47	0,54	0,65	0,69	0,71	0,57	36,0

EXPERIÊNCIA N° : 17
 VAZÃO DO AR : 240 m³/h
 UMIDADE AMBIENTE : 80%
 TEMPERATURA AMBIENTE : 26°C

TEMPERATURA DO BAGAÇO NA ENTRADA: 28°C
 TEMPERATURA DO BAGAÇO NA SAÍDA: 39°C
 TEMPO DE RESIDÊNCIA : 5 minutos
 CAMADA DO BAGAÇO : 10 cm

UMIDADE DO BAGAÇO									
ENTRADA					SAÍDA				
Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)	Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _u (%)	U _s (%)
1	6.021	3.152	47,6	91,0	5	5.139	3.457	41,8	71,8
2	6.201	3.079	50,3	101,4	6	5.567	3.197	42,6	74,1
3	5.925	3.073	48,1	92,8	7	5.608	3.372	39,9	66,3
4	5.906	2.993	49,3	97,3	8	5.550	3.363	39,4	65,0
Umidade média			48,8	95,0	Umidade média			40,9	69,0

TEMPERATURA DO AR									
Determinação		1	2	3	4	5	6	Temperatura média	
								mV	°C
Entrada	Bulbo seco mV	5,58	5,59	5,60	5,62	5,62	5,62	5,605	132,0
	Bulbo úmido mV	0,84	0,84	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	42,0
Saída	Bulbo seco mV	1,60	1,53	1,32	1,37	1,46	1,55	1,472	53,9
	Bulbo úmido mV	0,63	0,65	0,65	0,70	0,72	0,73	0,680	38,9

EXPERIÊNCIA N°: 18
 VAZÃO DO AR : 240 m³/h
 UMIDADE AMBIENTE : 80%
 TEMPERATURA AMBIENTE: 30°C

TEMPERATURA DO BAGAÇO NA ENTRADA: 26°C
 TEMPERATURA DO BAGAÇO NA SAÍDA: 40°C
 TEMPO DE RESIDÊNCIA : 5,30 min.
 CAMADA DO BAGAÇO : 10 cm

UMIDADE DO BAGAÇO									
ENTRADA					SAÍDA				
Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _{Bu} (%)	U _{Bs} (%)	Amostra	Peso(g) Inicial	Peso(g) Final	U _{Bu} (%)	U _{Bs} (%)
1	6.209	3.463	44,2	79,3	5	6.130	3.585	41,5	71,0
2	6.156	3.050	50,4	101,8	6	6.367	3.770	40,8	63,8
3	6.222	3.314	46,7	87,7	7	6.143	3.372	45,0	82,0
4	6.032	2.856	52,7	111,3	8	5.843	3.687	37,0	58,6
Umidade média			48,5	96,0	Umidade média			42,0	70,0

TEMPERATURA DO AR									
Determinação		1	2	3	4	5	6	Temperatura média	
		mV						°C	
Entrada	Bulbo seco mV	4,05	4,09	4,08	4,09	4,07	4,07	4,075	107,0
	Bulbo úmido mV	0,58	0,57	0,51	0,56	0,57	0,57	0,57	40,8
Saída	Bulbo seco mV	3,88	3,95	3,95	3,93	3,93	3,92	3,92	104,5
	Bulbo úmido mV	0,55	0,57	0,57	0,56	0,56	0,56	0,57	40,6

APÊNDICE "C"

(Programa de Computação com Subrotina para o Cálculo da Umidade Absoluta e a Umidade Relativa do Gás de Secagem).

```

C      *****
C      *
C      *   p r o g i  --->  subrotina i.
C      *
C      *   este programa calcula os fenomenos do ar, que
C      *   sao temperaturas de bulbo seco e molhado, umi-
C      *   dade relativa, pressao atmosferica, razao de
C      *   umidade, pressao de vapor, ponto de orvalho,
C      *   entalpia, calor latente de vaporizacao, e pres-
C      *   sao de vapor de saturacao.
C      *
C      *****
C
C      definicao das variaveis
C      double precision r,a,b,c,d,e,f,g,tbs(300),tbu(300),ur(300),
C      *tpo(300),patm,t1,t2,hsgbs(300),hsgbu(300),hfgbs(300),pvsbs(300),
C      *pvsbu(300),hfgbu(300),pvc(300),pvbu(300),w(300),v(300),h(300)
C      external hfg1,hfg2,hfg3
C      integer i,ind,s,pag,linh
C      common i,t1,t2
C
C      abertura dos arquivos de leitura e saida de relatorio
C      open(5,file='temp.dat',status='old')
C      open(6,file='temp.sai',status='new')
C
C      leitura das temperaturas de bulbo seco e molhado
C      read(5,10)ind,patm
10     format(i3,d8.3)
C      read(5,15)(tbs(i),i=1,ind)
C      read(5,15)(tbu(i),i=1,ind)
15     format(8d6.2)
C      pag=1
C      linh=0
C      write(6,100)pag,patm
C      do 300 i=1,ind
C         s=i
C
C
C      t4 =(tbu(i)-.32d2)* 0.5d1 / 0.9d1
C      transformacoes das temperaturas em grau rankine
C      t1 = ( tbs(i) * 0.9d1 / 0.5d1 ) + 0.49169d3
C      t2 = ( tbu(i) * 0.9d1 / 0.5d1 ) + 0.49169d3
C
C      chamada da subrotina para calcular a pressao de vapor saturado
C      call prsat(t1,t2,i,pvsbs,pvsbu)
C
C      chamada da subrotina do calculo do calor latente
C      call calor(t1,t2,i,hsgbs,hsgbu,hfgbs,hfgbu)
C
C      calculo da pressao de vapor da tbu e tbs
C      call hv(pvsbu,patm,pvc)
C
C      calculo da umidade relativa, razao de umidade e volume especifico
if     call wurv(t1,t2,i,pvc,patm,pvsbs,ur,w,v)
C

```

```

c      chamada da subrotina p/ calculo do ponto de orvalho
      call pto(pvc,i,t2,tpo)
c
c      chamada da subrotina para calcular a entalpia
      call ental(ti,t2,hsgbs,hfgbs,w,tpo,i,h)
c
      tpo(i) = (tpo(i)-0.49169d3) * 0.5d1 / 0.9d1
c      saida das informacoes obtidas em forma de relatorio
      write(6,200)tbs(i),tbu(i),i,pvc(i),ur(i),w(i),v(i),
*      pvsbs(i),pvsbu(i),hsgbs(i),hsgbu(i),hfgbs(i),hfgbu(i),
*      tpo(i),h(i)
      linh=linh+2
      if(linh.lt.26)go to 300
      pag=pag+1
      linh=0
      write(6,100)pag,patm
300   continue
      write(6,101)
100   format('1',50x,15('*'),/,15x,'relatorio geral',50x,'pag-',i3,/,
*51x,15('*'),//,
* 'pressao atmosferica = ',f8.3,//,
*131('*'),/,1x,'temp.bs',4x,'temp.bu',4x,'ind',4x,'pressao vapor',
*4x,'umid.rel',4x,'razao umidade',4x,'volume espec.',/,
*11x,'p.v.s.bs',8x,'p.v.s.bu',8x,'h.s.g.bs',8x,'h.s.g.bu',8x,
* 'h.f.g.bs',8x,'h.f.g.bu',8x,'pont.orv',8x,'entalpia',/,131('*'))
101   format('1')
200   format(1x,f7.2,4x,f7.2,4x,i3,5x,d12.6,5x,f7.2,5x,2(d12.6,4x),/,
*3x,8(4x,d12.5))
      close(5,status='keep')
      close(6,status='keep')
      stop
      end
c
c      *****
c      *
c      *      inicio      das      subrotinas      *
c      *
c      *****
c      *
c      *      subrotina ---->      p r s a t      *
c      *
c      *      calcula a pressao de vapor saturado para ambas      *
c      *      temperaturas,em grau rankine .      *
c      *      constantes utilizadas: r,a,b,c,d,e,f,g      *
c      *      variaveis utilizadas:      *
c      *      -t1 ----> temperatura de bulbo seco      *
c      *      -t2 ----> temperatura de bulbo molhado      *
c      *      -i ----> indice      *
c      *      -pvsbs ---> pressao de vapor de saturacao do      *
c      *      bulbo seco      *
c      *      -pvsbu ---> pressao de vapor de saturacao do      *
c      *      bulbo molhado      *
c      *
c      *****
c      *

```



```

C      *
C      *      calcula a entalpia a partir dos seguintes para-      *
C      *      metros: t1,t2,hsgbs,hfgbs,w,po,h                      *
C      *      variaveis utilizadas:                                  *
C      *      -tp ----> variavel auxiliar do ponto de orvalho      *
C      *      -h ----> entalpia                                     *
C      *
C      *
C      *****
C
C      subroutine prsat(t1,t2,i,pvsbs,pvsbu)
C      double precision r,a,b,c,d,e,f,g,pvsbs(300),pvsbu(300),t1,t2
C
C      r=0.3206182232d04
C      a=-0.2740552584d05
C      b= 0.5418960763d02
C      c=-0.4513703841d-01
C      d=0.2153211916d-04
C      e=-0.4620266568d-08
C      f=0.2416127209d01
C      g=0.1215465167d-02
C      if(t1.lt.0.45969d03.and.t1.gt.0.49169d03) go to 10
C      pvsbs(i)=dexp(0.233924d02-(0.112866489d05/t1)
C      * -0.46057d0*dlog(t1))
C 10  if (t1.lt.0.49169d03.and.t1.gt.0.95969d03) go to 20
C      pvsbs(i)=r*dexp((a+b*t1+(c*t1**0.2d01)+(d*t1**0.3d01)
C      * +(e*t1**0.4d01))/(f*t1-g*t1**0.2d01))
C 20  if (t2.lt.0.45969d03.and.t2.gt.0.49169d03) go to 30
C      pvsbu(i)=dexp(0.233924d02-(0.112866489d05/t2)
C      * -0.46057d0*dlog(t2))
C 30  if (t2.lt.0.49169d03.and.t2.gt.0.95969d03) go to 40
C      pvsbu(i)=r*dexp((a+b*t2+(c*t2**0.2d01)+(d*t2**0.3d01)
C      * +(e*t2**0.4d01))/(f*t2-g*t2**0.2d01))
C 40  return
C      end
C
C      subroutine calor(t1,t2,i,hsgbs,hsgbu,hfgbs,hfgbu)
C      double precision hsgbs(300),hsgbu(300),hfgbs(300),hfgbu(300),
C      * hsg(300),hfg(300),t,t1,t2
C      integer i,j
C      hsg(i)=0.d0
C      hfg(i)=0.d0
C      t=t1
C      j=1
C      calculo do calor de sublimacao
C 10  if (t.lt.0.45969d03.and.t.gt.0.49169d03)go to 20
C      hfg(i)=0.10758965d04-0.56983d0*(t-0.45969d03)
C      calculo do calor latente
C 20  if ((t.lt.0.49169d03).and.(t.gt.0.60969d03))go to 30
C      hfg(i)=0.10758965d04-0.56983d0*(t-0.45969d03)
C 30  if ((t.lt.0.60969d03).and.(t.gt.0.95969d03))go to 40
C      hfg(i)=(0.1354673214d07-0.9125275587d0*(t**0.2d1))**0.5d0
C 40  if (j.ne.2)go to 50
C      hsgbu(i)=hsg(i)
C      hfgbu(i)=hfg(i)
C      return

```

```

50  hsgbs(i)=hsg(i)
    hfgbs(i)=hfg(i)
    j=j+1
    t=t2
    go to 10
    end

c
    subroutine hv(pvsbu,patm,pvc)
    real*8 t,t1,t2,patm,hf,pvc(300),pvsbu(300),div1,div2
    common i,t1,t2

c
    t=t2
    if(t.lt.0.45969d03.and.t.gt.0.49169d03)go to 15
        hf= 0.1220844d4 - 0.5077d-1 * ( t - 0.45969d3 )
15  if(t.lt.0.49169d03.and.t.gt.0.60969d03)go to 25
        hf= 0.10758965d4 - 0.56983d0 * ( t - 0.45969d3 )
25  if(t.lt.0.60969d03.and.t.gt.0.95969d03)go to 35
        hf= (0.1354673214d7 - 0.9125275587d0 * t**2d0)**(.1d1/.2d1)
35  div1=pvsbu(i)*0.62194d0*hf+0.2405d0*(pvsbu(i)-patm)*(t1-t2)
    div2=0.62194d0*hf-0.037463d0*(pvsbu(i)/patm-.1d01)*(t2-t1)
    pvc(i)=div1/div2
    return
    end

c
c
c
c    function hfg1(t)
c    hfg1=1220.844d0-0.05077d0*(t-0.45969d03)
c    return
c    end

c
c    function hfg2(t)
c    hfg2=1.0758965d03-0.56983d0*(t-0.45969d03)
c    return
c    end

c
c    function hfg3(t)
c    hfg3=(1354.673214d03-0.9125275587d0*t**2)**(.1d01/.2d01)
c    return
c    end

c
    subroutine wurv(t1,t2,i,pvbs,patm,pvsbs,ur,w,v)
    double precision pvbs(300),t1,t2,patm,pvbs(300),pvbu(300),
*        ur(300),v(300),w(300)

c
    if(t1.lt.0.45969d03.and.t1.gt.0.95969d03)go to 10
        w(i)=0.6219d0*pvbs(i)/(patm-pvbs(i))
        v(i)=0.5335d02*t1/(0.144d03*(patm-pvbs(i)))
        ur(i)=((pvbs(i)/pvsbs(i))*0.10d03)
10  return
    end

c
c
c
c    subroutine pto(pvbs,i,t1,po)
    double precision pvbs(300),po(300),tbs(300),tbu(300),t,dt,tol1,
*        div,t1

```

```

    toli=1.0d-4
    t = t1
    dt = 0.1d1
10  div=dexp(0.5463d2-(0.1230169d5/t)-0.517d1*dlog(t))
    c  dif=pvbs(i)-div
    dif = div - pvbs(i)
    if((dif.gt.0.0d0).or.(abs(dif).lt.toli))go to 20
        t=t+dt
        dt = dt * 0.9d0
        t = t -dt
        go to 10
20  if(abs(dif).lt.toli)go to 30
        t=t-dt
        go to 10
30  po(i)=t
    return
end

c
c
    subroutine ental(t1,t2,hsgbs,hfgbs,w,po,i,h)
    double precision w(300),po(300),tp,t1,t2,h(300),
*   hsgbs(300),hsgbu(300),hfgbs(300),hfgbu(300)
    tp=po(i)
    call calor(t1,t2,i,hsgbs,hsgbu,hfgbs,hfgbu)
    if((t1.lt.0.45969d03).and.(t1.gt.0.49169d03))go to 10
        h(i)=0.2405d0*(t1-0.45969d03)-w(i)*(0.14335d03+0.485d0*
*   0.49169d03-po(i)-hsgbs(i))*w(i)+0.448d0*w(i)*
*   (t1-po(i))
10  if((t1.lt.0.49169d03).and.(t1.gt.0.67169d03))go to 20
        h(i)=0.2405d0*(t1-0.45969d03)+w(i)*(-0.49169d03+po(i)+
*   hfgbs(i))+0.448d0*w(i)*(t1-po(i))
20  return
end

```

APÊNDICE "D"

(Programa de Computação com Subrotina para o Cálculo do Di
mensionamento de um Secador de Esteira).

C
C
C
C
C
C
C
C
C
C
C

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PAPA...
CENTRO DE CIENCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUIMICA
ALSINA, C. L. S. E BEZERRA, H. F.
DIMENSIONAMENTO DE UM SECADOR DE ESTEIRA (FLUXO CRUZADO).

```

1  DIMENSION E(10),DTM(10),G(10),W(10),Y(10),V(10),T(10,10,10,10),
1RU(10,10,10,10),A(10,10,10,10),U(10,10,10,10)
2  READ,N,M,PC,PM,PN,PLAMB,WO,WE,UO
3  PRINT,' N =',N,' M =',M,' PC =',PC,' PM =',PM,' PN =',PN
4  PRINT,' PLAMB =',PLAMB,' WO =',WO,' WE =',WE,' UO =',UO
5  DO 1 I=1,N
6  READ,E(I),DTM(I)
7  1 CONTINUE
8  DO 2 J=1,M
9  READ,G(J),W(J)
10  2 CONTINUE
11  DO 3 I=1,N
12  DO 4 J=1,M
13  Y(J)=ALOG((WO-WE)/(W(J)-WE))
14  DO 33 K=1,N
15  DO 44 L=1,M
16  A(I,J,K,L)=-G(L)**PN*DTM(K)/(PC*PLAMB*E(I)**PM)
17  T(I,J,K,L)=-Y(J)/A(I,J,K,L)
18  U(I,J,K,L)=UO*EXP(A(I,J,K,L)*T(I,J,K,L))
19  RU(I,J,K,L)=U(I,J,K,L)/UO
20  44 CONTINUE
21  33 CONTINUE
22  4 CONTINUE
23  3 CONTINUE
24  DO 5 I=1,N
25  WRITE(6,30)I,E(I)
26  30 FORMAT(2X,'PARA E(',I1,') =',F10.5)
27  DO 6 J=1,M
28  WRITE(6,31)J,W(J)
29  31 FORMAT(2X,'PARA W(',I1,') =',F10.5)
30  WRITE(6,22)J,Y(J)
31  22 FORMAT(2X,'Y(',I1,') =',F10.5)
32  DO 55 K=1,N
33  WRITE(6,20)K,DTM(K)
34  20 FORMAT(2X,'PARA DTM(',I1,') =',F10.5)
35  DO 66 L=1,M
36  WRITE(6,21)L,G(L)
37  21 FORMAT(2X,'PARA G(',I1,') =',F10.5,/)
38  WRITE(6,23)I,J,K,L,A(I,J,K,L),I,J,K,L,T(I,J,K,L)
39  23 FORMAT(2X,'A(',I1,',',I1,',',I1,',',I1,') =',F10.5,/)
40  1,2X,'T(',I1,',',I1,',',I1,',',I1,') =',F10.5,/)
41  WRITE(6,24)I,J,K,L,U(I,J,K,L),I,J,K,L,RU(I,J,K,L)
42  24 FORMAT(2X,'U(',I1,',',I1,',',I1,',',I1,') =',F10.5,/)
43  1,2X,'RU(',I1,',',I1,',',I1,',',I1,') =',F10.5,///)
44  CONTINUE
45  55 CONTINUE

```

-0.00197 T(2,3,2,1) = 610.94530

36.00006 RU(2,3,2,1) = 0.30000

0.61000

-0.00286 T(2,3,2,2) = 420.91890

36.00006 RU(2,3,2,2) = 0.30000

0.81000

-0.00414 T(2,3,2,3) = 291.13670

36.00006 RU(2,3,2,3) = 0.30000

EXECUTED= 453

OBJECT CODE= 3280 BYTES, ARRAY AREA= 160240 BYTES, TOTAL AREA AVAILABLE= 1973312 BYTES

NUMBER OF ERRORS= 0, NUMBER OF WARNINGS= 0, NUMBER OF EXTENSIONS= 0

0.34 SEC, EXECUTION TIME= 0.85 SEC, 10.59.15 WEDNESDAY 27 JAN 88 WATFIV - JUN 1977 V1L6

TOP

PARA W(2) = 20.00000
Y(2) = 1.60944
PARA DTM(1) = 20.00000
PARA G(1) = 0.45800

A(1,2,1,1) = -0.00358 T(1,2,1,1) = 449.90200
U(1,2,1,1) = 24.00003 RU(1,2,1,1) = 0.20000

PARA G(2) = 0.61000
A(1,2,1,2) = -0.00519 T(1,2,1,2) = 309.96630
U(1,2,1,2) = 24.00003 RU(1,2,1,2) = 0.20000

PARA G(3) = 0.81000
A(1,2,1,3) = -0.00751 T(1,2,1,3) = 214.39400
U(1,2,1,3) = 24.00003 RU(1,2,1,3) = 0.20000

PARA DTM(2) = 30.00000
PARA G(1) = 0.45800
A(1,2,2,1) = -0.00537 T(1,2,2,1) = 299.93480
U(1,2,2,1) = 24.00003 RU(1,2,2,1) = 0.20000

PARA G(2) = 0.61000
A(1,2,2,2) = -0.00779 T(1,2,2,2) = 206.64410
U(1,2,2,2) = 24.00003 RU(1,2,2,2) = 0.20000

PARA G(3) = 0.81000
A(1,2,2,3) = -0.01126 T(1,2,2,3) = 142.92930
U(1,2,2,3) = 24.00003 RU(1,2,2,3) = 0.20000

PARA W(3) = 30.00000
Y(3) = 1.20397
PARA DTM(1) = 20.00000
PARA G(1) = 0.45800
A(1,3,1,1) = -0.00358 T(1,3,1,1) = 336.55830

U(1,3,1,1) = 36.00006 RU(1,3,1,1) = 0.30000

110

PARA G(2) = 0.61000

A(1,3,1,2) = -0.00519 T(1,3,1,2) = 231.87660

U(1,3,1,2) = 36.00006 RU(1,3,1,2) = 0.30000

PARA G(3) = 0.81000

A(1,3,1,3) = -0.00751 T(1,3,1,3) = 160.38170

U(1,3,1,3) = 36.00006 RU(1,3,1,3) = 0.30000

PARA DTM(2) = 30.00000

PARA G(1) = 0.45800

A(1,3,2,1) = -0.00537 T(1,3,2,1) = 224.37240

U(1,3,2,1) = 36.00006 RU(1,3,2,1) = 0.30000

PARA G(2) = 0.61000

A(1,3,2,2) = -0.00779 T(1,3,2,2) = 154.58430

U(1,3,2,2) = 36.00006 RU(1,3,2,2) = 0.30000

PARA G(3) = 0.81000

A(1,3,2,3) = -0.01126 T(1,3,2,3) = 106.92120

U(1,3,2,3) = 36.00006 RU(1,3,2,3) = 0.30000

PARA E(2) = 14.00000

PARA W(1) = 10.00000

Y(1) = 2.20259

PARA DTM(1) = 20.00000

PARA G(1) = 0.45800

A(2,1,1,1) = -0.00131 T(2,1,1,1) = 1752.64000

U(2,1,1,1) = 12.00001 RU(2,1,1,1) = 0.10000

PARA G(2) = 0.61000

A(2,1,1,2) = -0.00191 T(2,1,1,2) = 1207.50500

U(2,1,1,2) = 12.00001 RU(2,1,1,2) = 0.10000

PARA G(3) = 0.81000

A(2,1,1,3) = -0.00276 T(2,1,1,3) = 835.19400

U(2,1,1,3) = 12.00001 RU(2,1,1,3) = 0.10000

PARA DTM(2) = 30.00000

PARA G(1) = 0.45800

A(2,1,2,1) = -0.00197 T(2,1,2,1) = 1168.42700

U(2,1,2,1) = 12.00001 RU(2,1,2,1) = 0.10000

PARA G(2) = 0.61000

A(2,1,2,2) = -0.00286 T(2,1,2,2) = 805.00360

U(2,1,2,2) = 12.00001 RU(2,1,2,2) = 0.10000

PARA G(3) = 0.81000

A(2,1,2,3) = -0.00414 T(2,1,2,3) = 556.79630

U(2,1,2,3) = 12.00001 RU(2,1,2,3) = 0.10000

PARA W(2) = 20.00000

Y(2) = 1.60944

PARA DTM(1) = 20.00000

PARA G(1) = 0.45800

A(2,2,1,1) = -0.00131 T(2,2,1,1) = 1225.04200

U(2,2,1,1) = 24.00003 RU(2,2,1,1) = 0.20000

PARA G(2) = 0.61000

A(2,2,1,2) = -0.00191 T(2,2,1,2) = 844.00970

U(2,2,1,2) = 24.00003 RU(2,2,1,2) = 0.20000

PARA G(3) = 0.81000

A(2,2,1,3) = -0.00276 T(2,2,1,3) = 583.77530

U(2,2,1,3) = 24.00003 RU(2,2,1,3) = 0.20000

112

PARA DTM(2) = 30.00000

PARA G(1) = 0.45800

A(2,2,2,1) = -0.00197 T(2,2,2,1) = 816.69500

U(2,2,2,1) = 24.00003 RU(2,2,2,1) = 0.20000

PARA G(2) = 0.61000

A(2,2,2,2) = -0.00286 T(2,2,2,2) = 562.67300

U(2,2,2,2) = 24.00003 RU(2,2,2,2) = 0.20000

PARA G(3) = 0.81000

A(2,2,2,3) = -0.00414 T(2,2,2,3) = 389.18380

U(2,2,2,3) = 24.00003 RU(2,2,2,3) = 0.20000

PARA W(3) = 30.00000

Y(3) = 1.20397

PARA DTM(1) = 20.00000

PARA G(1) = 0.45800

A(2,3,1,1) = -0.00131 T(2,3,1,1) = 916.41790

U(2,3,1,1) = 36.00006 RU(2,3,1,1) = 0.30000

PARA G(2) = 0.61000

A(2,3,1,2) = -0.00191 T(2,3,1,2) = 631.37860

U(2,3,1,2) = 36.00006 RU(2,3,1,2) = 0.30000

PARA G(3) = 0.81000

A(2,3,1,3) = -0.00276 T(2,3,1,3) = 436.70480

U(2,3,1,3) = 36.00006 RU(2,3,1,3) = 0.30000

PARA DTM(2) = 30.00000

PARA G(1) = 0.45800

44 5 CONTINUE
45 5 CONTINUE
46 STOP
47 END

ENTRY

N = 2 M = 3 PC = 0.9500000E 00 PM = 0.900000
PLAMB = 0.5400000E 03 WO = 0.1000000E 03 WE = 0.0000000E 00 UO
PARA E(1) = 4.60000
PARA W(1) = 10.00000
Y(1) = 2.30258
PARA DTM(1) = 20.00000
PARA G(1) = 0.45800

A(1,1,1,1) = -0.00358 T(1,1,1,1) = 643.66470
U(1,1,1,1) = 12.00001 RU(1,1,1,1) = 0.10000

PARA G(2) = 0.61000
A(1,1,1,2) = -0.00519 T(1,1,1,2) = 443.46160
U(1,1,1,2) = 12.00002 RU(1,1,1,2) = 0.10000

PARA G(3) = 0.81000
A(1,1,1,3) = -0.00751 T(1,1,1,3) = 306.72850
U(1,1,1,3) = 12.00002 RU(1,1,1,3) = 0.10000

PARA DTM(2) = 30.00000
PARA G(1) = 0.45800
A(1,1,2,1) = -0.00537 T(1,1,2,1) = 429.11010
U(1,1,2,1) = 12.00001 RU(1,1,2,1) = 0.10000

PARA G(2) = 0.61000
A(1,1,2,2) = -0.00779 T(1,1,2,2) = 295.64080
U(1,1,2,2) = 12.00002 RU(1,1,2,2) = 0.10000

PARA G(3) = 0.81000
A(1,1,2,3) = -0.01126 T(1,1,2,3) = 204.48570
U(1,1,2,3) = 12.00001 RU(1,1,2,3) = 0.10000