

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS E AGRÍCOLA

*Estudo da utilização da  
fase de evaporação cons-  
tante da secagem na con-  
centração de líquidos.*

*Cláudia Schinke*  
Farmacêutica-Bioquímica

Prof. Dr. Roberto H. Moretti  
Orientador

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola da  
Universidade Estadual de Campinas, para a obtenção do título de Mes-  
tre em Tecnologia de Alimentos.

-1980-

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais pela compreensão.

Ao meu marido pela paciência.

Ao Prof. Roberto Hermínio Moretti  
pela valiosa orientação.

## ÍNDICE GERAL

	Pg.
RESUMO	i
SUMMARY	ii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
3. MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1. Material	17
3.1.1. Equipamento para hidratação de sílica-gel	18
3.1.2. Equipamento para concentração por secagem utilizando ar na forma de bolhas em coluna de vidro, com recuperação de aromas	20
3.1.3. Equipamento para concentração por secagem utilizando ar na forma de bolhas em cilindro metálico	22
3.1.4. Equipamento para concentração por secagem com ar seco em coluna com enchimento	24
3.1.5. Equipamento para concentração por secagem com ar ambiente em coluna com "spray"	28
3.1.6. Condensador 2	31
3.2. Métodos	32
3.2.1. Preparação da sílica-gel	32
3.2.2. Determinação do tempo de hidratação da sílica-gel	32
3.2.3. Determinação da quantidade de água adsorvida pela sílica-gel	32
3.2.4. Determinação do tempo de secagem da sílica-gel	33
3.2.5. Determinação da densidade aparente da sílica-gel	34

3.2.6.	Concentração de suco de laranja por <u>desi</u> dratação com ar seco e recuperação de a- roma	34
3.2.7.	Concentração de solução de sacarose 10 <sup>0</sup> Brix	35
3.2.8.	Secagem de líquido com ar seco	36
3.2.8.1.	Líquido frio e ar quente	36
3.2.8.2.	Líquido quente e ar quente	38
3.2.8.3.	Líquido quente e ar frio	47
3.2.9.	Análises do vinhoto concentrado	48
3.2.10.	Determinação da vazão de ar	49
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1.	Evaporação a baixa temperatura	50
4.1.1.	Com o uso de compressor	50
4.1.2.	Com o uso de turbina	63
4.1.3.	Com o uso de ventilador centrífugo	63
4.1.4.	Custo da regeneração da sílica-gel	65
4.1.5.	Desidratação do ar por refrigeração	66
4.2.	Secagem de líquido com ar seco	70
4.2.1.	Líquido frio e ar quente	70
4.2.1.1.	Coluna com 30 cm de altura da camada de enchimento	72
4.2.1.2.	Coluna com 15 cm de altura da camada de enchimento	73
4.2.2.	Líquido quente e ar quente	76
4.2.2.1.	Coluna com 15 cm da camada de enchimento	76
4.2.2.2.	Coluna com 7,5 cm de altura da camada de enchimento	79
4.2.2.3.	Líquido quente e ar frio	85
4.3.	Custo da secagem do vinhoto	93
5.	CONCLUSÕES	101
6.	BIBLIOGRAFIA	102

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA		pg.
1	Determinação do tempo de hidratação de sílica-gel, em relação à vazão de ar	51
2	Determinação da quantidade de água adsorvida em sílica-gel	53
3	Determinação do tempo de secagem de sílica-gel em estufa a 135°C	55
4	Determinação da densidade aparente da sílica-gel	56
5	Concentração de suco de laranja 12°Brix por desidratação com ar seco e recuperação de aroma	58
6	Concentração de solução de sacarose 10°Brix	60
7	Custo da água evaporada na concentração por secagem utilizando compressor para a movimentação do ar	62
8	Desumidificação do ar por refrigeração: custo da condensação da umidade por compressor que utiliza amônia	69
9	Concentração por secagem de solução de sacarose 11°Brix à temperatura de 13°C, com ar a 45°C em coluna com 30 cm de altura da camada de enchimento	72
10	Influência da vazão de água a 18°C na hidratação do ar a 60°C, em coluna com 15 cm de altura da camada de enchimento	74

11	Influência da vazão de água a 32°C na hidratação do ar a 60°C em coluna com 15 cm de altura da camada de enchimento	75
12	Influência da temperatura do líquido na vazão de água evaporada em coluna com 15 cm de altura da camada de enchimento	76
13	Concentração de vinhoto 10°Brix a 40°C por secagem com ar a 80°C em coluna com 15 cm de altura da camada de enchimento	78
14	Influência da temperatura do ar na vazão de água condensada na secagem em coluna com 7,5 cm de altura da camada de enchimento	81
15	Vazão de água evaporada mantendo ar e líquido à mesma temperatura na secagem em coluna com 7,5 cm de altura na camada de enchimento	82
16	Influência da temperatura do líquido na vazão de condensado, na secagem em coluna com 7,5 cm de altura da camada de enchimento	84
17	Concentração de solução de sacarose 20°Brix a 50°C por secagem com ar a 80°C, em coluna com 7,5 cm de altura da camada de enchimento.	85
18	Influência de elevadas temperaturas de líquido na vazão de água evaporada, utilizando "spray" de líquido numa corrente de ar à temperatura ambiente	86

## TABELA

pg.

19	Influência da altura da camada de enchimento e do tipo de contato entre líquido e ar na vazão de água evaporada durante a secagem	88
20	Concentração de vinhoto 3,9 <sup>o</sup> Brix a 90 <sup>o</sup> C com ar ambiente, por secagem em coluna com "spray"	89
21	Análise do vinhoto concentrado por secagem	92
22	Comparação da composição de vinhotos "in natura" citados por Ravnø (1979), com a composição do vinhoto concentrado por secagem	93
23	Custo total do sistema de concentração de vinhoto por secagem com ar	94

GRÁFICO		pg.
III	Vazão de ar obtida em relação à potência de motor de compressor, turbina e ventilador	64
IV	Influência da temperatura do ar na vazão de água condensada	80
V	Influência da temperatura do líquido na vazão de água condensada	83
VI	Influência da altura da camada de enchimento e do tipo de contato entre líquido e ar na vazão de água evaporada	87
VII	Concentração de vinhoto 3,9 <sup>o</sup> Brix a 90 <sup>o</sup> C com ar ambiente por secagem em coluna com "spray"	91

## ÍNDICE DE FIGURAS E GRÁFICOS

FIGURA		Pg.
1	Equipamento para hidratação da sílica-gel	19
2	Equipamento para concentração por secagem, utilizando ar na forma de bolhas em coluna de vidro, com recuperação de aromas	21
3	Equipamento para concentração por secagem, utilizando ar na forma de bolhas em cilindro metálico	23
4	Equipamento para concentração por secagem - com ar seco em coluna com enchimento	25
5	Equipamento para concentração por secagem - com ar ambiente em coluna com "spray"	29
6	Disco para sub-divisão do jato de alimentação de líquido	79
7	Equipamento para concentração de vinhoto com re-aproveitamento dos gases quentes das chaminés da caldeira e gerador-intercambiador	98
GRÁFICO		
I	Tempo de hidratação da sílica-gel em relação à vazão de ar	52
II	Acréscimo de água adsorvida em sílica-gel em relação ao tempo de hidratação	54

## RESUMO

Dos métodos disponíveis para a concentração de alimentos líquidos, destacam-se a evaporação, osmose reversa e crio-concentração, por serem técnicas de concentração a baixa temperatura muito bem estudadas, apresentando cada uma, desvantagens devido ao alto custo de investimento e/ou operação que representam.

Foi estudada uma técnica alternativa de concentração onde são utilizadas as propriedades desidratantes de um gás seco em movimento, quando em contato com um líquido, para remoção de água. Verificou-se que tanto a temperatura do líquido quanto do gás influenciam a evaporação de água, sendo essa também dependente da velocidade do gás. Verificou-se que das diversas formas de contato entre gás e líquido estudadas, a mais elevada evaporação de água foi obtida quando o líquido foi distribuído na forma de "spray" na corrente do gás.

Na concentração de solução de sacarose e vinho, foi verificada a diminuição da quantidade de água evaporada em função do aumento da concentração do produto, tal como ocorre em qualquer outro processo convencional de concentração.

Na concentração de vinho, a técnica mostrou-se viável economicamente, podendo ser utilizada na remoção de 35-40% da água do mesmo, utilizando unicamente a energia residual de uma destilaria de álcool.

## SUMMARY

Of the methods available for concentration of liquid foods, special emphasis should be given to evaporation, reverse osmosis and crio-concentration, because they are very well known techniques for concentration at low temperature, although each of them presents disadvantages due to their high investment and/or operation costs.

An alternative technique of concentration has been studied, whereas the desidration properties of a dry gas in motion were used when in contact with a liquid, for the removal of water. It was observed that the temperature of the liquid and gas had great influence on the evaporation of water, the last one being also dependent of the gas velocity. It was also noted that from the different forms of contact between liquid and gas studied, the highest evaporation was achieved when the liquid was sprayed in the gas current.

By concentrating sugar solution and vinasse, it was observed that a substancial reduction in water evaporation occurred with an increase of the product concentration, like as in any other conventional concentration technique.

For the concentration of vinasse the technique showed to be economically feasible, being able to evaporate 35-40% of its water by the use of the residual energy of an alcohol distillery only.

## 1. - INTRODUÇÃO

A concentração de alimentos líquidos tem como objetivo, não só permitir sua conservação, mas também facilitar seu transporte e estocagem.

Dentre os métodos utilizados para concentração, destacam-se a evaporação, a osmose reversa e a crio-concentração. Apesar de serem técnicas já amplamente estudadas e desenvolvidas, apresentam desvantagens quanto ao investimento que representam, ou quanto ao custo de sua operação.

O objetivo do presente trabalho foi estudar uma técnica alternativa que utilizasse as propriedades desidratantes de gases secos, na concentração de alimentos líquidos. Foram determinadas as condições que maximizam a evaporação da água, pelo estudo de parâmetros tais como: temperaturas e velocidades do gás e líquido, e forma de contato entre ambos.

Foi também estudada a aplicação de tal técnica na concentração de um resíduo industrial líquido: o vinhoto.

Sendo o vinhoto o resíduo da destilação do álcool, sua produção será grandemente aumentada com a expansão do Programa Nacional do Álcool, causando importante poluição ambiental, devido ao seu elevado teor poluente.

## 2. - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A concentração é uma das operações mais importantes na indústria de alimentos. Além de ser um método de preservação, oferece as vantagens de diminuir os custos de embalagem, estocagem e transporte do produto, devido à grande redução de seu peso e volume. A concentração de alimentos líquidos termosensíveis, nos quais se incluem sucos de frutas e extrato de café e chá, apresenta grandes dificuldades quando se deseja obter um produto concentrado no qual estão conservadas as características do produto original. O mais importante problema apresenta-se quando a concentração tenciona também manter inalterados o sabor e aroma do alimento.

Quando é usada a adição de calor ao alimento líquido para proceder sua concentração, podem ocorrer reações químicas e bioquímicas, responsáveis pelo escurecimento do produto e pela aparição no produto concentrado de odores estranhos e desagradáveis, provenientes da degradação térmica dos componentes aromáticos.

A concentração de tais produtos em temperaturas relativamente baixas, tem sido recomendada por vários autores (Thijssen, 1974; King, 1974).

Vários métodos têm sido propostos para a concentração de alimentos líquidos termosensíveis em temperaturas baixas, desta-

cando-se: evaporação à baixa temperatura, osmose reversa e crio-concentração. Thijssen (1974), descreve a crio-concentração como um processo que envolve a cristalização parcial da água e uma subsequente separação dos cristais do líquido concentrado. O processo é particularmente apropriado para líquidos termosensíveis contendo aromas voláteis. Já que a água é retirada da solução por uma transformação de fase líquida em sólida, a perda de aromas por evaporação é completamente evitada. As baixas temperaturas durante o processo, por volta de  $-3$  a  $-7^{\circ}\text{C}$ , eliminam completamente as reações térmicas de decomposição. O processo apresenta desvantagens como a relativamente baixa concentração máxima capaz de ser atingida, e que se encontra em torno de 45%. A concentração máxima é controlada pela viscosidade do concentrado na temperatura de congelamento. Também ocorre perda de parte dos sólidos solúveis com o gelo e perda de parte dos aromas voláteis durante a separação gelo-líquido. Porém, segundo o mesmo autor, a principal desvantagem desse processo é o elevado custo de investimento que representa, sendo 3 a 10 vezes superior a evaporadores com recuperadores de aroma. Thijssen (1974) e Surirajan (1970) propõem também a osmose reversa na concentração de alimentos líquidos termosensíveis. Thijssen (1974), descreve a osmose reversa como uma operação de concentração na qual a água difunde através de uma membrana seletivamente permeável a uma fase aquosa de concentração em soluto muito mais baixa ou quase zero. A força motriz que atua nesse transporte de água é a diferença de pressão

sobre a membrana e que excede a diferença de pressão osmótica. A membrana permite a passagem de água, mas também uma passagem limitada de pequenas moléculas, tais como: sais, monossacarídeos e aromas. A osmose reversa requer altas pressões, 50-75 atm, porém, oferece a vantagem de operar à baixa temperatura, 20 a 30°C, evitando completamente a degradação térmica. A osmose reversa, porém, não apresenta a mesma seletividade da crio-concentração com respeito às pequenas moléculas dos aromas, pois as membranas que apresentam a seletividade necessária têm baixa permeabilidade. A permeabilidade também é dependente da viscosidade e temperatura do produto, limitando a concentração máxima capaz de ser atingida, que se encontra em torno de 20 a 35%. Do ponto de vista do custo de operação, porém, a osmose reversa é superior a qualquer outro processo de concentração.

Jã Thijssen (1970), diz que a evaporação é considerada a técnica mais bem desenvolvida e economicamente mais favorável na concentração de alimentos líquidos. Porém, reconhece que existem sérias desvantagens, como a degradação térmica do produto, e a obstrução da superfície da troca de calor. O mesmo autor, (1974), recomenda que, a fim de prevenir a deterioração química, alguns alimentos líquidos devem ser concentrados em temperatura abaixo de 50°C, permanecendo o mínimo tempo em contato com a superfície de aquecimento. Os aromas, porém, são perdidos quase quantitativamente com o vapor e, geralmente, a perda

de voláteis resulta em decréscimo de qualidade. Vários métodos são empregados para compensar essa perda, e Thijssen (1970) descreve vários deles. Nos métodos de recuperação de aromas - porém, os aromas muito voláteis são perdidos com os gases inertes e aromas com volatilidade semelhante à da água, não conseguem ser recuperados do vapor. De um lado, devido à recuperação incompleta dos aromas, geralmente, não mais de 60% e, de outro, devido à degradação térmica, a qualidade de alimentos líquidos concentrados termicamente, o que inclui extrato de café e a maioria dos sucos de frutas, é sempre algo inferior.

A concentração de alimentos líquidos termosensíveis também pode ser efetuada por secagem, isto é, contactando o líquido com um gás seco em movimento, de modo que o gás evapore umidade e concentre o líquido. O líquido, suprimindo parte da energia necessária à evaporação, sofre redução de sua temperatura até a temperatura de bulbo úmido do gás com o qual está em contato. Segundo Hougen (1967), durante a evaporação de um líquido em um gás, parte da energia necessária à evaporação é fornecida pelo líquido e outra parte pelo gás. O líquido sofre redução de sua temperatura até atingir uma temperatura, que a partir de então permanecerá constante durante todo o processo evaporativo, e chamada de temperatura de bulbo úmido do gás. Segundo van Arsdel (1973), na secagem de alimentos sólidos, o produto é conservado à baixa temperatura pelo efeito de resfriamento - que ocorre quando a água do alimento evapora na corrente de ar.

Enquanto a superfície do produto permanecer saturada de umidade, a velocidade de evaporação permanece constante, pois a umidade migra do interior para a superfície a uma velocidade suficientemente grande para manter a saturação superficial, e os primeiros estágios da secagem do produto ocorrem de maneira essencialmente idêntica à da evaporação de água pura. Masters (1972), complementa que a velocidade de transferência de calor e massa é função da temperatura, da umidade e propriedades de transporte do ar que está em contato com o líquido. Van Arsdel (1973), indica que entre os fatores que determinam a velocidade de evaporação, encontram-se a temperatura da água, temperatura, umidade, pressão e velocidade do ar, sendo que são menos importantes o tamanho e a forma da superfície úmida e a direção do movimento do ar com respeito a ela. Para King (1974), - processos de secagem evaporativa, nos quais o calor é suprido pelo ar ou outros gases, apresentam uma remoção de água relativamente simples e de grande capacidade. É necessário, porém, - suprir uma quantidade de energia igual ao calor latente de vaporização de toda a água a ser retirada do sistema, energia que, na maioria dos sistemas de secagem, é fornecida pelo ar aquecido, já que o produto entra no sistema à temperatura ambiente. - Na secagem de alimentos aromáticos, a utilização de ar é muitas vezes nociva, pois o oxigênio pode provocar degradação química tanto de componentes voláteis quanto não-voláteis do produto. - A substituição por gases inertes, como gás carbônico, além de evitar tal degradação, pode aumentar a velocidade de concentra

ção, pois segundo Hougen (1967), esse gás tem maior capacidade de absorção de umidade do que o ar. Perry (1973), apresenta várias maneiras de promover o contato entre líquido e gás: bolhas de gás no líquido, película de líquido sobre a qual passa o gás, e "spray" de líquido em uma corrente gasosa. O gás na forma de bolhas é obtido com placas porosas mergulhadas no líquido, onde um compressor impulsiona o gás com certa pressão a través das placas, fazendo-o borbulhar no líquido. A distribuição das bolhas também pode ser obtida com o uso de uma turbina que funciona conectada a um tubo de aspiração, onde, pela agitação provocada pela turbina, ocorre aspiração do gás pelo tubo e sua dispersão no líquido. O líquido na forma de película é obtido em coluna do tipo destinado à absorção de gases, onde diversos tipos de materiais, que servem de enchimento à coluna, promovem a distribuição do líquido e seu contato com o gás. O gás nesse sistema é movido pela ação de um ventilador centrífugo. Já a distribuição do líquido na forma de pequenas gotas é obtida em coluna onde um aspersor distribui o líquido em uma corrente gasosa, criada por um ventilador centrífugo. Como se trata de concentrar alimentos líquidos aromáticos, o contato com gás em movimento causa arraste de aromas voláteis. Mantendo, porém, o gás em ciclo fechado, não ocorre perda, pois sempre o mesmo gás circula em contato com o líquido. Entretanto, em ciclo fechado, há necessidade de uma etapa de regeneração do gás, pois seu contato com o líquido o umedece, sendo necessária a retirada dessa umidade para que a operação continue sendo eficiente.

Segundo Perry (1950), gases podem ser desidratados pelos seguintes processos:

- absorção: usando agentes dessecantes líquidos, como glicerina, soluções salinas, etc;
- adsorção: usando adsorventes sólidos, como sílica-gel e alumina;
- compressão: comprimindo o gás até que a pressão parcial do vapor d'água seja maior que a pressão de saturação e ocorra condensação da umidade;
- resfriamento: resfriando o gás abaixo da temperatura do ponto de orvalho, provocando condensação da umidade.

Os métodos mecânicos para a desidratação de gases, compressão e resfriamento, são usados em operações de grande escala e são, geralmente, métodos mais caros do que aqueles que utilizam agentes dessecantes. Na escolha de um agente dessecante para um processo industrial é necessário determinar a necessidade de regeneração ou não do dessecante. Geralmente em processos industriais, a quantidade de agente dessecante empregado é elevada e o custo de seu descarte seria proibitivo, sendo conveniente a instalação de equipamento para a regeneração do mesmo. Kirk & Othmer (1950), afirmam que a seleção de um agente dessecante envolve a avaliação de vários fatores. Entre eles:

- a) a possibilidade de ocorrerem outras reações entre o dessecante e o gás que está sendo desidratado;

b) o equipamento e as operações físicas envolvidas no uso do dessecante.

Dessecantes líquidos são mais facilmente manuseados do que sólidos, principalmente em grandes instalações. Com líquidos é possível a utilização de operação contínua. Dessecantes sólidos são, geralmente, empacotados em colunas fixas, de operação descontínua, alternando secagem com regeneração, e o equipamento necessário atinge elevado custo de investimento e operação. Perry (1950), porém, alerta para o fato de que com dessecantes sólidos é possível obter maior grau de secagem do que com dessecantes líquidos, sendo possível atingir ar com umidades bem mais baixas. Como o processo de evaporação e concentração por secagem exige a circulação do gás em ciclo fechado, torna-se inconveniente a utilização de agentes dessecantes líquidos, pois grande parte dos aromas voláteis arrastados pelo gás durante a concentração ficaria absorvida no dessecante juntamente com a umidade. Dos agentes dessecantes sólidos, a sílica-gel é a que mais tem sido utilizada na desidratação de gases, por ser estável química, física e termicamente. Kirk & Othmer (1950), afirmam também que a sílica-gel apresenta grande capacidade de secagem, exigindo menor quantidade do dessecante, menor tamanho da coluna e menor quantidade de calor para sua regeneração. Para que seu uso se torne eficiente, porém, há necessidade de determinar algumas de suas características: tempo durante o qual a sílica mostra-se eficiente na desidratação do

gás, tempo necessário para a regeneração da mesma com ar quente, entre outras. A refrigeração, entretanto, pode apresentar algumas vantagens sobre os dessecantes sólidos na desidratação de gases. Com o uso de dessecantes sólidos sempre ocorre perda de carga na vazão do gás, dependente do tipo de sílica e comprimento do leito, exigindo equipamento que movimente o ar a maior pressão. Por outro lado, o uso de dessecante exige uma operação secundária para a regeneração do mesmo, operação completamente desnecessária na refrigeração, já que se trata de uma operação contínua. Como a operação visa a conservação dos aromas, desumidificadores que utilizam uma superfície refrigerada seca para o contato com o gás úmido, são os mais indicados, pois aqueles que utilizam água fria como meio de troca de calor, apresentam o mesmo inconveniente dos dessecantes líquidos, isto é, absorção de parte dos aromas.

Alguns processos tem sido desenvolvidos baseados nesse sistema de evaporação de água, apesar de apresentarem objetivos diferentes. Os processos de Schueller (1977) e Kirksmoeller (1977) seguem esse princípio com a finalidade de recuperar água potável de água salgada. Pujol (1951) utiliza um processo de concentração no qual uma solução aquosa a  $70^{\circ}\text{C}$  entra em contato com ar aquecido e à pressão atmosférica onde o ar e vapor de saída trocam calor com o ar de entrada. É sugerido ainda, o uso de um gás inerte em ciclo fechado com condensadores, em casos onde ar não pode ser utilizado.

O processo de concentração por secagem pode ter como aplicação não somente alimentos líquidos, mas também resíduos industriais líquidos, onde, pelas características do próprio produto, não há necessidade dos cuidados com a temperatura do produto e a reciclagem do ar. Na concentração desse tipo de produto, a degradação térmica ou perda de aroma, se houver, não é prejudicial ao produto. O produto é aquecido a temperaturas bem superiores às da secagem de alimentos líquidos, a fim de acelerar a evaporação, utilizando ar ambiente para o arraste da umidade, jogando-o após, novamente no ambiente, sem etapa intermediária de regeneração. O processo exige apenas uma fonte de calor para o aquecimento do líquido, uma bomba para a circulação do mesmo e um equipamento para a movimentação do ar.

Entre os resíduos industriais líquidos que hoje em dia representam problema quanto ao seu destino, encontra-se o vinhoto, não só pelo seu alto teor poluente, como também pelo elevado volume produzido. Na medida em que a capacidade das destilarias e, conseqüentemente, a produção do álcool começou a expandir-se em forma acelerada com a execução do Programa Nacional do Álcool, acentuou-se a necessidade imperiosa da análise de opções técnico-econômicas de aproveitamento da vinhaça, que constitui o principal resíduo da fabricação do álcool, num volume em média de 13 a 17 litros por litro de álcool produzido, variável em função da natureza da matéria-prima utilizada e da condução do processo de destilação, representando, assim, a

maior vazão mássica de saída do processo de destilação. Destaca-se o fato de a vinhaça apresentar-se como um elemento altamente poluidor, devido à sua elevada demanda bioquímica de oxigênio (DBO). Conforme Jackman (1977), um litro de vinhoto corresponde ao despejo doméstico de 1,43 pessoas. Uma destiladora industrial de álcool de porte médio que processa 200 ton por dia de melaço de cana tem uma produção de vinhoto similar ao despejo de uma cidade de cerca de um milhão de habitantes, - diz Kujala (1979). A esse nível, o meio ambiente corre sérios riscos caso o vinhoto não seja submetido à tratamento conveniente. A matéria poluente na vinhaça origina-se dos componentes não-fermentáveis, dos sub-produtos não-voláteis da fermentação e dos açúcares residuais fermentáveis provenientes da ineficiente conversão dos mesmos em etanol.

No Brasil, vários tratamentos de vinhoto têm sido estudados, - podendo ser basicamente reduzidos aos seguintes:

- uso direto como fertilizante de solos;
- evaporação até xarope, com ou sem incineração;
- digestão anaeróbia para a produção de metano;
- produção de biomassa fúngica,

sendo que o vinhoto concentrado pode ser utilizado como fertilizante, alimentação para gado e para a recuperação de potássio.

O relatório da Copersucar (1979) caracteriza o uso da vinhaça "in natura" como fertilizante, como um importante fator econô-

mico na agro-indústria alcooleira e açucareira. Os estudos de vinhoto "in natura" como fertilizante de solos, iniciados na década de 50, acabaram por caracterizá-lo como importante potencial de fertilização dos solos. Monteiro (1975), apresenta algumas conclusões a que chegaram pesquisas realizadas no Brasil usando vinhoto "in natura" como fertilizante. Observou-se que, apesar do baixo pH do vinhoto, sua aplicação eleva o pH natural do solo e aumenta sua capacidade de retenção de água. Estudos posteriores levaram às seguintes conclusões: quando aplicado ao solo, qualquer tipo de vinhoto, indiferente de seu grau de acidez, trará as seguintes vantagens pela decomposição microbiológica da matéria orgânica coloidal e ácidos orgânicos:

- aumenta o pH do solo, tornando-o neutro ou alcalino;
- aumenta a capacidade de retenção de água;
- melhora as propriedades físicas e químicas;
- aumenta a capacidade de retenção de sais minerais;
- produz condições ideais para o cultivo da cana-de-açúcar;
- restaura e mantém a fertilidade do solo;
- desenvolve a microflora do solo.

A composição do vinhoto apresenta considerável variação, conforme Bittencourt (1978), César (1978), Kujala (1976), Cahmi (1979) e outros. Os dados apresentados a seguir, representam uma variação típica para vinhoto produzido no Estado de São Paulo:

pH	3,7 - 5,9
matéria orgânica (% base seca)	70
nitrogênio (g/l)	1,0 - 3,5
potássio (g/l)	9,0 - 13,0
fósforo (g/l)	0,4 - 4,0
magnésio (g/l)	0,8 - 1,5

Verifica-se que o vinhoto é rico em substâncias fertilizantes, matéria orgânica e potássio, e o conteúdo relativamente elevado em cálcio e magnésio é responsável pela elevação do pH do solo. Como consequência da aplicação do vinhoto, verifica-se um aumento da produtividade agrícola e seu uso poderá, ainda, reduzir o custo da produção, substituindo, em parte, as adubações minerais, conforme Copersucar (1980). A necessidade da adubação de soqueiras de cana-de-açúcar é indiscutível, tendo em vista que em cada ciclo a planta retira do solo quantidades apreciáveis de nutrientes, que necessitam ser restituídos através de adubação. Nesse particular, as pesquisas têm mostrado que o vinhoto tem possibilidade de fornecer a maior parte dos nutrientes requeridos pela cana-soca, onde seu emprego deve ser prioritário pelo fato de sua disponibilidade ocorrer quando do corte da cana, isto é, na época de safra. Porém, devido ao baixo teor de sólidos que o produto apresenta, a adubação com vinhoto "in natura" só se mantém dentro de um limite econômico quando a distância entre o canavial e a destilaria é de

poucos quilômetros. O produto concentrado não só torna mais e conômica a operação, como viabiliza as maiores distâncias a serem atingidas com o transporte. Para Jackman (1977), porém, a maior vantagem reside no fato da disponibilidade de um fertilizante estável a ser administrado ao solo como e quando requerido, acrescentando que o vinhoto é geralmente evaporado até 60<sup>o</sup>Brix ou mais, para garantir a estabilidade do produto.

O vinhoto concentrado também pode ser utilizado como componente na formulação de rações para animais (Jackman, 1977; Campos 1979; Kujala, 1976; Lewicki, 1977). Evaporando-o somente até 30-35%, é possível misturá-lo diretamente a uma forragem, desde que a mesma esteja suficientemente seca. Caso seja necessário estocá-lo ou transportá-lo a longa distância, é necessário evaporá-lo a uma concentração estável de 60-65% de sólidos, a fim de evitar qualquer degradação por microrganismos mais resistentes. Vinhoto concentrado como alimento direto para gado, não é recomendado devido ao seu alto teor em sais minerais. Porém, misturado a uma forragem contendo teores convenientes de proteína, lignina e outros suplementos, é possível a formulação de rações adequadas para animais. Estudos feitos na Ucrânia (Campos, 1979) sobre os efeitos da alimentação de gado vacum, a uma dosagem de 1,5 kg por cabeça por dia de vinhoto - concentrado adicionado à ração em substituição ao melaço, verificaram um aumento de 940 g por dia a mais, comparando-se com ração sem vinhoto. Convém ainda ressaltar as propriedades a-

glutinantes e aromatizantes bastante elevadas, e já existem no mercado internacional rações à base de vinhoto concentrado, dosadas para diversas opções como crescimento, engorda e outras. Kujala (1976) e Jackman (1977) também apresentam a concentração do vinhoto como etapa intermediária na obtenção de sais de potássio por incineração do mesmo. A cinza obtida pode ser usada como fonte de potássio na formulação de fertilizantes NPK.

A maioria dos autores sugere evaporadores de múltiplo efeito - na concentração do vinhoto, salientando os problemas decorrentes de tal concentração como formação de espuma dentro do evaporador, a formação de depósitos e incrustações de sais minerais nas superfícies de troca de calor, dificuldade de bombeamento devido à cristalização de sais no xarope, entre outros. Ressaltam, também, o fato de evaporadores de múltiplo efeito - significarem alto custo de investimento, além de sugerirem fontes alternativas de calor para a produção do vapor necessário, como queima do bagaço e de vinhoto concentrado.

Já a concentração parcial de vinhoto por secagem pode ser efetuada com o aproveitamento da energia dos gases residuais das chaminés das caldeiras, como informa Chenu (1976), porém, a economicidade do processo não foi relatada.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. MATERIAL

- Reagentes (Carlo Erba, Merck, etc.)
- Vidraria de laboratório
- Estufa Retilínea Fanem S/A
- Balança Mettler P1210
- Sílica-gel 4-10 mesh
- Rotâmetro Lab-Crest Century
- Rotâmetro Gilmont nº 5
- Rede de ar comprimido
- Tamis 12 mesh
- Suco de laranja 12<sup>o</sup>Brix
- Solução de sacarose 10<sup>o</sup>Brix
- Anti-espumante Dow Corning antifoam A/AF emulsion
- Solução hidro-alcoólica 50%
- Refratômetro Warszawa RL 1
- Compressor de ar Sultz de motor de 1/3 CV
- Balança Hobard-Dayton com intervalo de 10 g
- Coluna de recuperação de aromas Alfa-Laval (CT 1B-2)
- Ventilador centrífugo Asten VC 280 de 0,75 CV
- Termostato Fonovits
- Bomba centrífuga Alfa-Laval GM-1 de 0,75 CV
- Bomba centrífuga de 0,33 CV
- Tanque com isolamento térmico Alfa Laval, capacidade 500 l.

- Unidade de refrigeração: compressor Radio-Frigor tipo IV  
: motor Brasil modelo T-334-6 de 3 CV
- Cronômetro Seiko
- Espectrofotômetro Carl Zeiss M4 Q III e PM Q II
- Espectrofotômetro de absorção atômica Unicam SP90A series 2
- Digestor de proteína
- Destilador de proteína
- Tubo de pitot Dwyer nº 400
- Solução de sacarose 19,3<sup>o</sup>Brix, contendo 1% de ac.tartárico
- Solução de sacarose 10<sup>o</sup>Brix
- Vinhoto 10<sup>o</sup>Brix, contendo 35 ppm de anti-espumante
- Vinhoto 3<sup>o</sup>Brix
- Vinhoto 3,9<sup>o</sup>Brix
- Mufla Indústria Forlabo Ltda.

### 3.1.1. Equipamento para hidratação de sílica-gel

Seguindo o esquema da Figura 1, foi montado o seguinte equipamento: uma coluna de vidro de cerca de 70 cm de comprimento e 33 cm<sup>2</sup> de área interna da secção transversal, provida de septo de vidro sinterizado e destinada a conter água, está conectada à rede de ar comprimido e a uma segunda coluna de vidro, de aproximadamente, 20 cm de comprimento e 4 cm<sup>2</sup> de área interna - de secção transversal, destinada a conter sílica-gel. Entre ambas colunas estão adaptados um conjunto de termômetros de bulbo seco e bulbo úmido e um rotâmetro de 1-10 l/min. O sentido do fluxo do ar é do termômetro de bulbo seco ao de bulbo úmido.

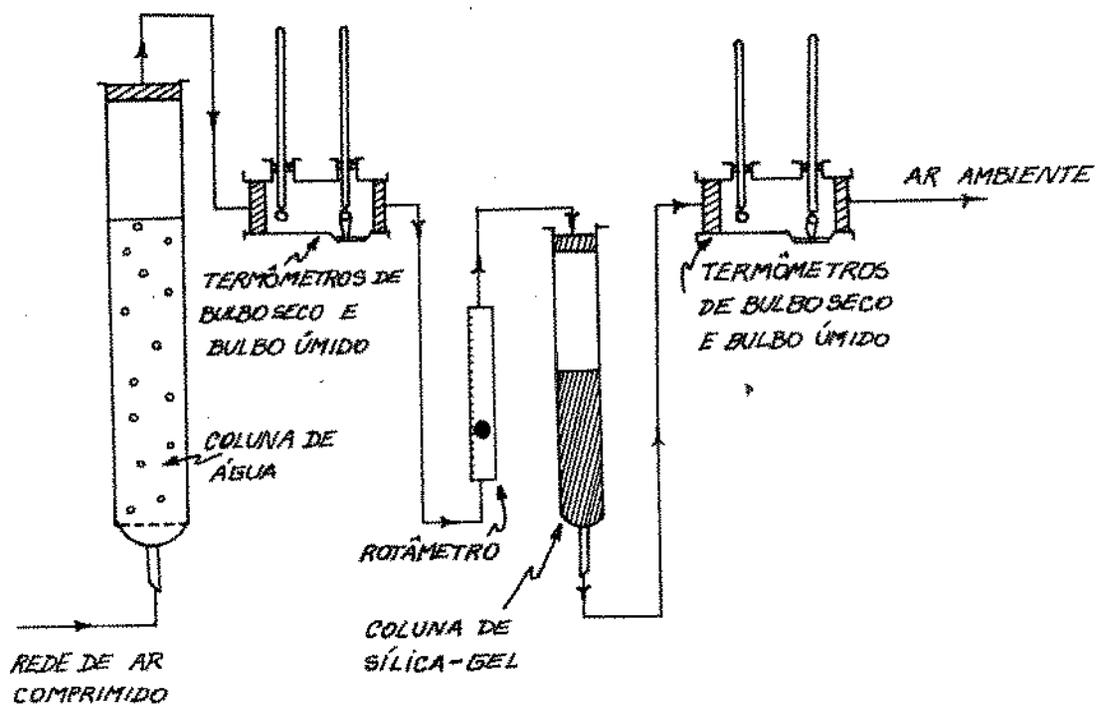


FIGURA 1. - Equipamento para hidratação da sílica-gel.

Após a coluna destinada à sílica-gel, encontra-se outro conjunto de termômetros de bulbo seco e bulbo úmido. As ligações entre cada peça são feitas com mangueira plástica de 8 mm de diâmetro.

### 3.1.2. Equipamento para concentração por secagem, utilizando ar na forma de bolhas em coluna de vidro, com recuperação de aromas

Seguindo o esquema da Figura 2, foi montado o seguinte sistema de evaporação: uma coluna de vidro de cerca de  $4 \text{ cm}^2$  de área interna da secção transversal e completamente cheia de sílica-gel seca, está conectada à rede de ar comprimido e a uma segunda coluna de vidro, de cerca de 70 cm de comprimento e  $33 \text{ cm}^2$  de área interna da secção transversa, contendo um septo de vidro sinterizado, e destinada a conter suco de laranja para concentração. A essa segunda coluna encontra-se adaptado um conjunto de termômetros de bulbo seco e bulbo úmido e um rotâmetro de 1-10 l/min. Após o rotâmetro, no sentido do fluxo de ar dentro do sistema, encontra-se uma segunda coluna destinada a conter sílica-gel, de cerca de  $4 \text{ cm}^2$  de área interna da secção transversal e 20 cm de comprimento. A essa coluna encontra-se conectado outro conjunto de termômetros de bulbo seco e bulbo úmido, cuja saída de ar está conectada a uma serpentina de vidro, de aproximadamente 7 cm de diâmetro,  $0,5 \text{ cm}^2$  de secção transversa do tubo e de cerca de 10 voltas. A serpentina e kitasato encontram-se mergulhados em uma solução hidro-alcoó

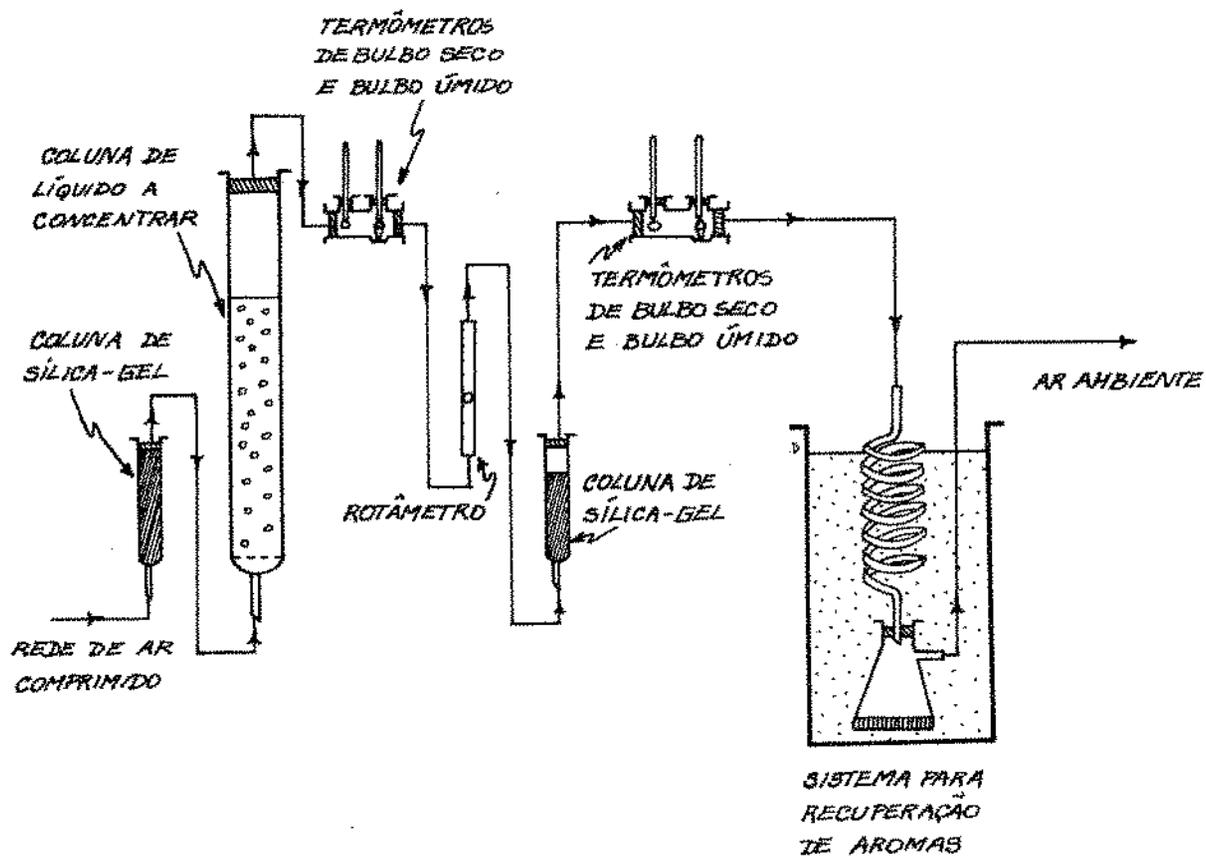


FIGURA 2. - Equipamento para concentração por secagem, utilizando ar na forma de bolhas em coluna de vidro, com recuperação de aromas.

lica 50% mantida à temperatura de  $-15$  a  $-20^{\circ}\text{C}$ . Um tubo plástico, ligado à haste lateral do kitasato assegura a saída livre do ar acima do nível do líquido. Esse sistema de evaporação opera de duas formas: com a coluna de suco e a segunda coluna - de sílica-gel revestidas de lã de vidro, ou com as colunas não revestidas de lã de vidro. As ligações entre cada peça do equipamento são feitas de mangueira plástica de 8 mm de diâmetro.

### 3.1.3. Equipamento para concentração por secagem, utilizando ar na forma de bolhas em cilindro metálico

Seguindo o esquema da Figura 3, foi montado o seguinte sistema de evaporação: um cilindro metálico de cerca de 17 cm de diâmetro e 57 cm de comprimento, e contendo cerca de 10 kg de sílica-gel seca, está conectado a um compressor de ar de motor de 0,33 CV, de forma que o fluxo de ar dentro do leito de sílica, seja de baixo para cima. Entre o compressor e o cilindro encontra-se um conjunto de termômetros de bulbo seco e bulbo úmido. A saída de ar do cilindro de sílica-gel está conectado um filtro de ar, de lã de vidro, e um conjunto de termômetros de bulbo seco e úmido, de modo que o sentido do fluxo de ar seja do termômetro de bulbo seco ao úmido. Após esse conjunto encontra-se um segundo cilindro metálico, de cerca de 22 cm de diâmetro e 50 cm de comprimento, de aproximadamente 20 litros de capacidade e confeccionado em aço inox. A mangueira plástica que conduz o ar até o interior do cilindro encontram-se -

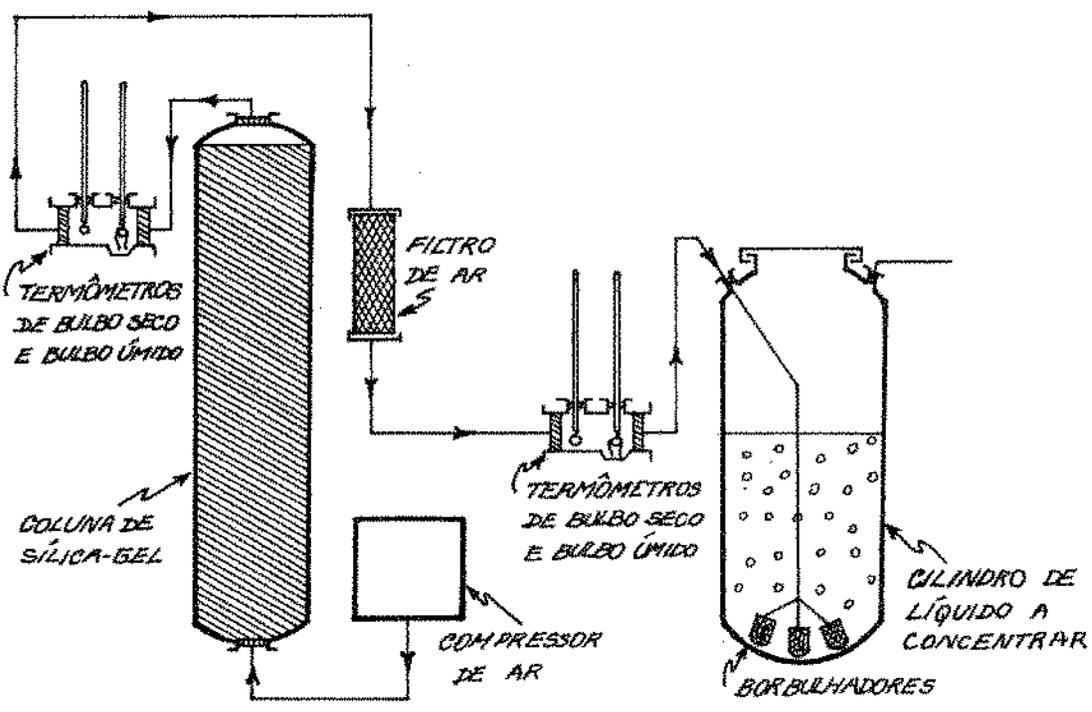


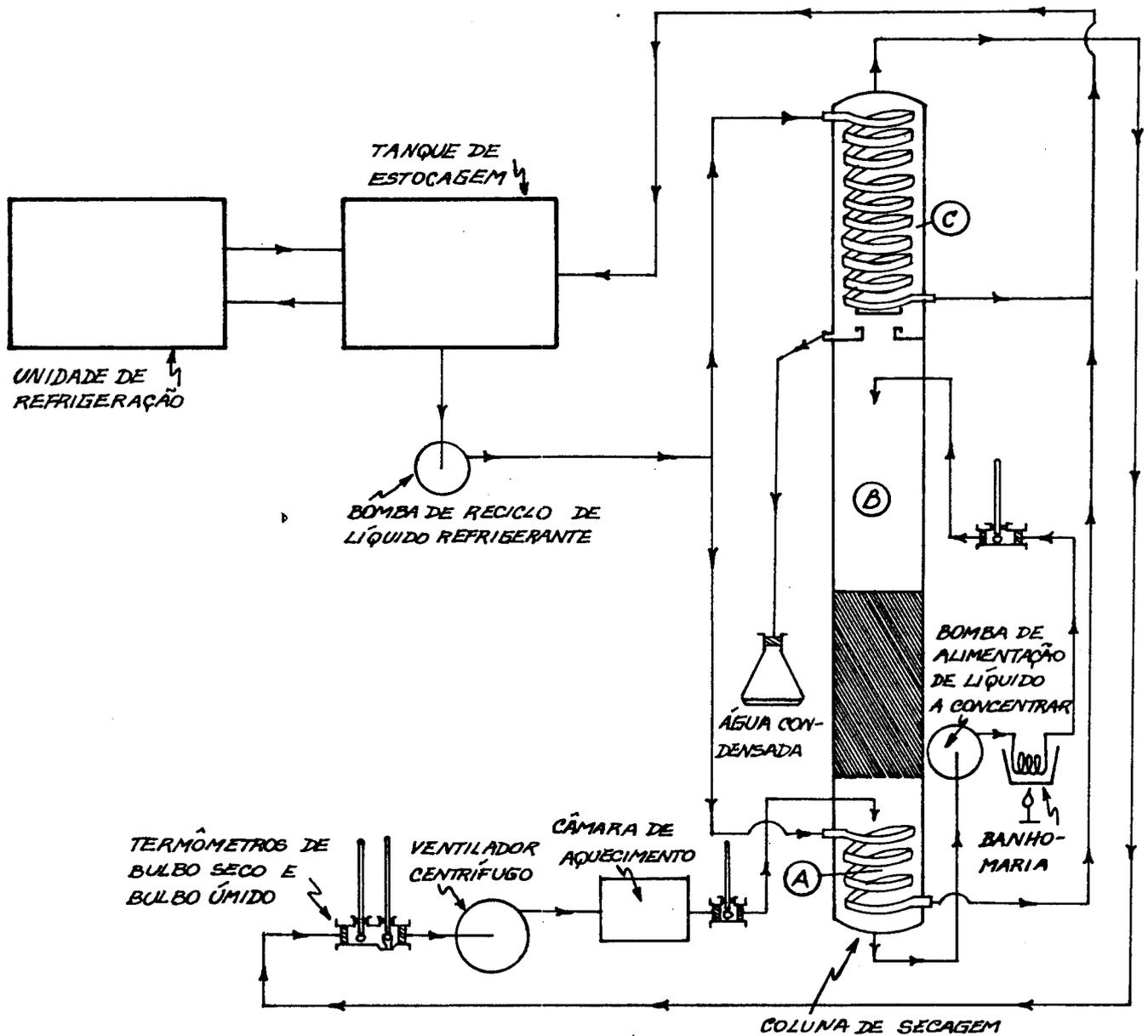
FIGURA 3. - Equipamento para concentração por secagem, utilizando ar na forma de bolhas em cilindro metálico.

adaptados 3 borbulhadores confeccionados em pedra porosa e colocados no interior do cilindro de forma que tocam o fundo do mesmo. O cilindro é ainda provido de mais duas aberturas, uma para a saída do ar e outra, dotada de tampa, por onde é feita a introdução da solução a concentrar. A saída de ar do cilindro está conectado um rotâmetro de 10-60 l/min. As ligações entre cada peça do equipamento são feitas em mangueira plástica de 8 mm de diâmetro.

#### 3.1.4. Equipamento para concentração por secagem, com ar seco em coluna com enchimento

Conforme esquema da Figura 4, foi utilizada uma coluna confeccionada inteiramente em vidro, com 18 cm de diâmetro e 207 cm de altura. Essa coluna é composta de 3 secções:

- a) câmara de estocagem de 18 cm de diâmetro e 53 cm de altura, contendo em seu interior uma espiral de vidro para circulação de líquido refrigerante e, acima da qual, acha-se um tubo de vidro de 2,5 cm de diâmetro, em forma de cotovelo, com a boca virada para baixo, por onde é feita a admissão de ar na coluna;
- b) câmara de secagem, de cerca de 18 cm de diâmetro e 140 cm de altura, contendo em seu interior um prato perfurado, colocado a aproximadamente 20 cm acima do cotovelo de vidro da câmara de estocagem e, sobre o qual, descansa uma camada de pequenas espirais de vidro de cerca de 1,5 cm de compri-



- Ⓐ CÂMARA DE ESTOCAGEM
- Ⓑ CÂMARA DE SECAGEM
- Ⓒ CONDENSADOR 1

**FIGURA 4.** - Equipamento para concentração por secagem com ar seco em coluna com enchimento.

mento e cerca de 0,8 cm de diâmetro, que servem de enchimento à coluna. A camada apresenta cerca de 30 cm de altura.- Nessa câmara encontra-se um orifício para a entrada da mangueira de alimentação do líquido, situada a aproximadamente 120 cm acima do prato perfurado;

- c) condensador, denominado condensador 1, de cerca de 12 cm de diâmetro e 104 cm de altura, contendo em seu interior uma espiral de vidro com a finalidade de circular líquido refrigerante. Abaixo da espiral, encontra-se um septo que separa o condensador da câmara de secagem, o qual é constituído por um anel de vidro em cujo centro encontra-se um "T" de aproximadamente 2,5 cm de diâmetro do tubo e por onde entra o ar no condensador. Ao nível desse anel, a coluna apresenta um orifício para a saída da água condensada, a qual é recolhida em erlenmeyer de 1000 ml, conectado através de tubo plástico a essa saída da coluna.

Por meio de mangueira plástica de 3,5 cm de diâmetro, o topo do condensador 1 está conectado à boca de aspiração do ventilador centrífugo de 0,75 CV. Nessa mangueira, junto à boca de aspiração do ventilador, encontra-se adaptado um conjunto de termômetros de bulbo seco e bulbo úmido, de modo que o sentido de fluxo de ar seja do termômetro de bulbo seco ao úmido. A boca de ejeção de ar do ventilador está conectada a uma câmara de aquecimento do ar, que utiliza como resistências, quatro lâmpadas elétricas de 200 W cada, comandadas por termostato, com

a finalidade de aquecer o ar à temperatura desejada. Uma lâmpada no exterior da câmara e conectada ao circuito do termostato-lâmpadas, indica quando as mesmas estão ligadas. Na linha do ar, logo após o aquecimento, encontra-se um termômetro de 0-100°C, para registro da temperatura do mesmo. O ar aquecido é dirigido à coluna, entrando pelo cotovelo de vidro da câmara de estocagem, por meio de mangueira plástica de 3,5 cm de diâmetro. Mangueiras plásticas, de cerca de 1 cm de diâmetro, e resistentes à temperatura, conectam a saída de líquido de uma bomba centrífuga de 0,75 CV a um trocador de calor, constituído por uma serpentina metálica de tubo de diâmetro semelhante ao plástico e mergulhada em banho-maria aquecido por bico-de-Bunsen. O mesmo tipo de mangueira também conecta o trocador de calor com a entrada de líquido da coluna e a saída de líquido da mesma coluna à bomba centrífuga. Nessa mangueira, entre a entrada de líquido da coluna e a saída de líquido da bomba, encontra-se adaptado um termômetro de 0-120°C para registro de temperatura do líquido. Uma unidade de refrigeração com motor de 3 CV resfria cerca de 100 litros de solução hidroalcoólica 50%, colocada em um tanque de estocagem. Uma bomba centrífuga de 0,33 CV envia líquido refrigerante às serpentinas do condensador 1 e da câmara de estocagem. Assim, o líquido a concentrar entra em contato com ar em contra-corrente sobre as espirais do enchimento, sendo recolhido na câmara de estocagem, onde sofre resfriamento ou não. É então captado pela bomba centrífuga, passa pelo trocador de calor, onde é aqueci-

do ou não, sendo enviado à entrada de líquido da coluna de onde é jogado sobre o enchimento. O ar, impulsionado pelo ventilador, sendo ou não aquecido na câmara de aquecimento, é conduzido à coluna, entrando pelo cotovelo de vidro da câmara de estocagem. Ascende pela coluna, umedece-se ao entrar em contato com o líquido sobre o enchimento e é desidratado no condensador por resfriamento. Pela sucção do ventilador, o ar seco é captado e novamente enviado à coluna para secagem.

### 3.1.5. Equipamento para concentração por secagem com ar ambiente em coluna com "spray"

Seguindo o esquema da Figura 5, foi utilizada uma coluna confeccionada inteiramente em vidro, de 18 cm de diâmetro e 193 cm de altura, contendo as seguintes seções principais:

- a) câmara de estocagem, de cerca de 18 cm de diâmetro e 53 cm de altura, apresentando uma abertura lateral de cerca de 2,5 cm de diâmetro, à qual está fixo, internamente, um tubo de igual dimensão e em forma de cotovelo com a boca voltada para baixo, por onde é feita a admissão de ar na coluna.
- b) câmara de secagem, de 18 cm de diâmetro e 140 cm de altura, tendo fixo à extremidade superior, um "spray" de líquido.

Uma bomba centrífuga de 0,75 CV promove a circulação do líquido, da câmara de estocagem, passando através de um intercambiador de calor para a câmara de secagem, onde o mesmo é borrifado na forma de "spray", sendo novamente coletado na câmara de

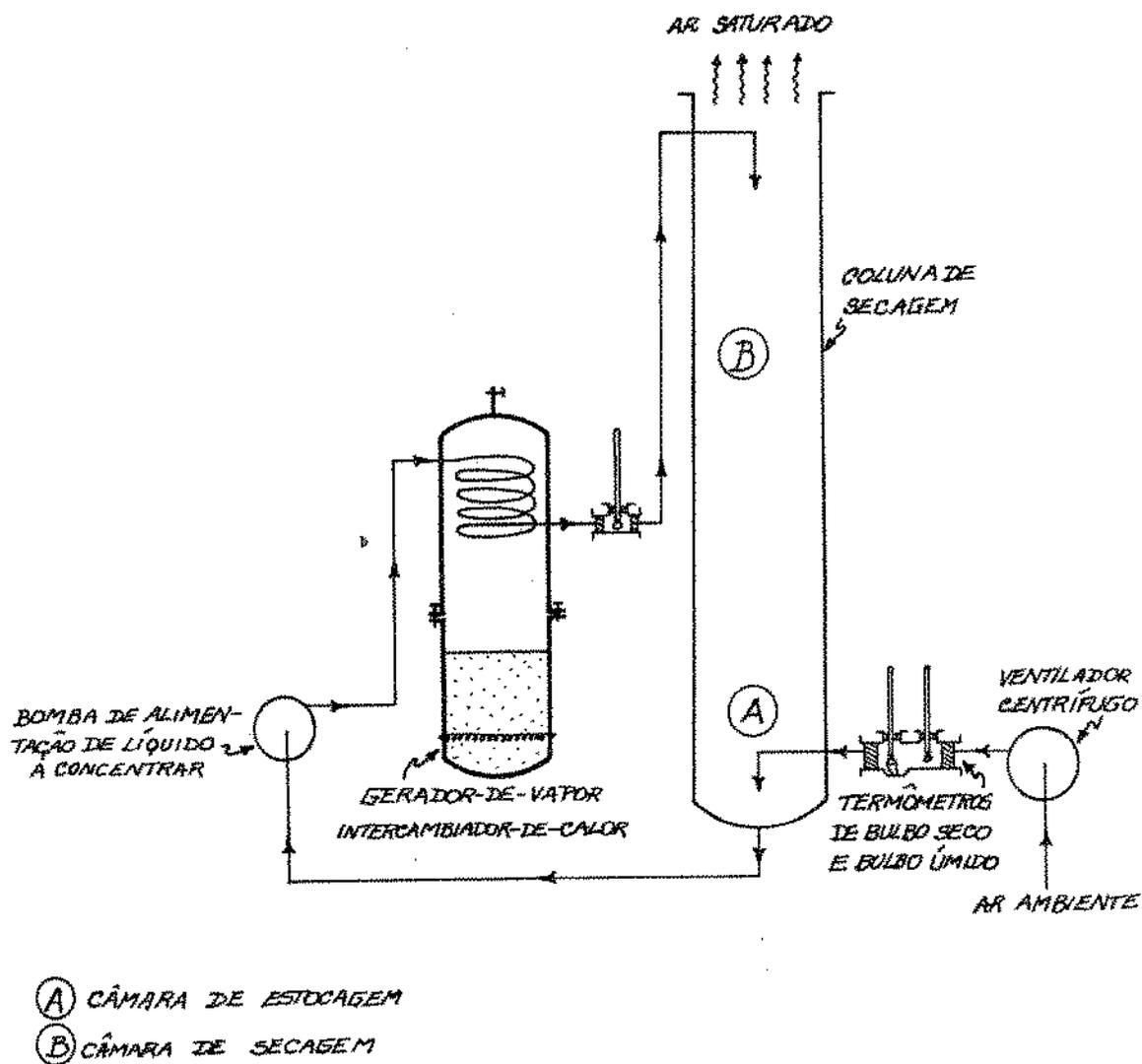


FIGURA 5. - Equipamento para concentração por secagem com ar ambiente em coluna com "spray".

estocagem. O intercambiador de calor é constituído por uma carcaça cilíndrica de 44 cm de diâmetro e 115 cm de altura, - contendo em seu interior três resistências elétricas de 6000 W cada, operando em 220 V, ligadas por cabo trifásico a uma chave magnética. Acima das resistências encontra-se uma serpentina metálica por onde circula o líquido a aquecer. As resistências estão mergulhadas em água e um termostato regula a quantidade de vapor d'água formado, o qual irá aquecer o produto - que circula na serpentina. O termostato liga e desliga a chave magnética, controlando, dessa forma, a temperatura do líquido que passa pelo intercambiador. Uma lâmpada elétrica, ligada ao circuito, indica quando a chave magnética está ligada. - No topo do cilindro encontra-se uma válvula para a exaustão do ar. Mangueiras plásticas resistentes à temperatura e de diâmetro semelhante ao da serpentina do intercambiador de calor, fazem conexões entre a bomba centrífuga, intercambiador de calor e "spray" de líquido. Entre o aquecimento e a entrada na coluna, há um termômetro na linha do líquido para a determinação - de sua temperatura quando entra na coluna. A boca de ejeção - de um ventilador centrífugo de 0,75 CV está conectada com mangueira plástica de 3,5 cm de diâmetro à entrada de ar da coluna. Nessa mangueira, junto à entrada de ar da coluna, encontra-se adaptado um conjunto de termômetros de bulbo seco e úmido para registro da umidade do ar que nele passa.

### 3.1.6. Condensador 2

Constituído por um tubo metálico, de cerca de 4 cm de diâmetro e 95 cm de comprimento, ao redor do qual encontra-se fixa uma serpentina metálica por onde circula líquido refrigerante. Uma carcaça metálica de cerca de 18 cm de diâmetro e 90 cm de comprimento, envolve esse conjunto, de modo que a extremidade superior do tubo central permaneça alguns centímetros para fora da carcaça e a outra extremidade não toque o fundo da mesma. A carcaça apresenta duas saídas, uma para o ar desidratado, localizada na extremidade lateral superior, e outra para a água condensada, localizada no fundo da mesma. Assim, o ar é admitido pela extremidade superior do tubo central, é liberado pela extremidade inferior do mesmo para dentro da câmara formada entre ele e a carcaça, por onde ascende, saindo do condensador pela abertura lateral localizada na parte superior. Nesse trajeto, o ar entra em contato com a superfície refrigerada do condensador, condensa umidade, tornando-se à saída do condensador em ar seco. A umidade condensada escorre pelas paredes do condensador, sendo recolhida no fundo do mesmo, por onde a água condensada sai do condensador, sendo coletada no erlenmeyer que se encontra ligado a essa saída com mangueira plástica.

## 3.2. MÉTODOS

### 3.2.1. Preparação da sílica-gel

Foram colocados cerca de 10 kg de sílica-gel 4-8 mesh em estufa durante 2 horas, a 120°C, resfriados após em dessecador e guardados em frasco fechado.

### 3.2.2. Determinação do tempo de hidratação da sílica-gel

Seguindo o esquema da Figura 1, foi utilizado o equipamento - descrito em 3.1.1. Foram pesados aproximadamente 30 g de sílica-gel, preparada conforme 3.2.1., e colocados na coluna a ela destinada. Colocou-se, aproximadamente, 1000 ml de água na coluna contendo o septo de vidro sinterizado e abriu-se a torneira da rede de ar comprimido. Foram testadas as seguintes vazões de ar: 0,5 l/min; 1 l/min; 1,5 l/min; 2 l/min; 3 l/min; 4 l/min; 5 l/min e 10 l/min, substituindo a sílica-gel por outra seca em cada teste. Em intervalos de 15 minutos foram lidas as temperaturas dos termômetros de bulbo seco e bulbo úmido dos conuuntos colocados antes e após a coluna de sílica. O tempo de hidratação da sílica-gel em relação à vazão de ar é aquele em que a leitura da temperatura dos termômetros após a coluna de sílica-gel acusar, aproximadamente, 60% de umidade relativa do ar.

### 3.2.3. Determinação da quantidade de água adsorvida pela sílica-gel

Procedeu-se conforme o método 3.2.2. e o esquema da Figura 1, utilizando uma vazão de ar de 2 l/min e pesando a coluna nos mesmos intervalos de tempo em que são feitas as leituras de temperaturas dos termômetros de bulbo seco e úmido. A diferença de peso da coluna entre a primeira e a última leitura dá o total de água adsorvida pela sílica-gel naquele tempo.

#### 3.2.4. Determinação do tempo de secagem da sílica-gel

Foram pesadas três amostras de sílica-gel de aproximadamente 30 g cada e colocadas em tamis de malha 12 mesh, colocado sobre banho-maria fervente. As amostras foram deixadas em hidratação por 5, 10 e 15 minutos, respectivamente. Cada amostra foi então colocada em cadinho de porcelana, previamente tarado e pesada. As amostras foram secas em estufa a 120°C até peso constante, pesando-as após cada meia hora de secagem, tendo previamente permitido que atingissem a temperatura ambiente em dessecador. A umidade de cada amostra em cada intervalo de tempo é expressa por:

$$\% \text{ umidade} = \frac{S_2 - S_1}{S_1} \times 100$$

onde:

$S_1$  = peso da amostra de sílica-gel antes da hidratação

$S_2$  = peso da amostra de sílica-gel após determinado intervalo de tempo de secagem.

### 3.2.5. Determinação da densidade aparente da sílica-gel

Foi determinada exatamente a área interna de secção transversa de uma coluna de vidro de aproximadamente  $4 \text{ cm}^2$  de área e 20 cm de comprimento. A coluna foi pesada e a ela adicionada aproximadamente, 90 g de sílica-gel, preparada conforme o método - 3.2.1., e novamente pesada. Mediu-se a altura da coluna de sílica-gel no interior da coluna de vidro e calculou-se o volume da mesma. A determinação do peso e volume da sílica-gel foi efetuada pelo menos cinco vezes. A densidade aparente é a média obtida na divisão do peso pelo volume de sílica-gel e expressa em  $\text{g/cm}^3$ .

### 3.2.6. Concentração de suco de laranja por desidratação com ar seco e recuperação de aroma

a) adsorção adiabática: seguindo o esquema da Figura 2, e utilizando o equipamento descrito em 3.1.2., tendo as colunas de suco e sílica-gel sido revestidas com lã de vidro, foram adicionados cerca de 1000 ml de suco de laranja  $12^{\circ}\text{Brix}$  contendo 1 ml de solução anti-espumante 1%, a coluna contendo septo de vidro sinterizado. Foram colocados cerca de 90 g de sílica-gel, preparada conforme o método 3.2.1., na coluna que se encontra após o suco de laranja, sendo a coluna então pesada. Abriu-se a torneira da rede de ar comprimido de modo a obter a 6 l/min na leitura do rotâmetro. A cada meia hora pesou-se a coluna de sílica-gel que se encontra -

após a coluna de suco. Foi determinada a concentração do suco a cada duas horas de concentração, substituindo ao mesmo tempo a sílica-gel da coluna após o suco, tendo seu peso sido previamente determinado. Encerrou-se o experimento após o suco de laranja atingir 13<sup>o</sup>Brix.

- b) adsorção isotérmica: seguiu-se o método para a adsorção adiabática, com exceção de que as colunas de suco e sílica-gel não foram revestidas de lã de vidro.

### 3.2.7. Concentração de solução de sacarose 10<sup>o</sup>Brix

- a) sem reposição de amostra: seguindo o esquema da Figura 3 e utilizando o equipamento descrito em 3.1.3., foram colocados no recipiente, provido de borbulhadores, 2 kg de solução de sacarose 10<sup>o</sup>Brix. Ligou-se o compressor de ar e abriu-se sua torneira até obter 24 l/min na leitura do rotâmetro. Em intervalos de 8 horas leram-se as temperaturas de bulbo seco e úmido de ambos os conjuntos de termômetros, bem como determinou-se a temperatura da solução e a concentração da mesma. A solução foi concentrada até atingir aproximadamente 23<sup>o</sup>Brix.

- b) com reposição de amostra para manter constante o nível de líquido: seguindo o esquema da Figura 3, utilizando o equipamento descrito em 3.1.3., foram colocados 5 kg de solução de sacarose 10<sup>o</sup>Brix no recipiente provido de borbulhadores. Foi colocada uma balança de 0-20 kg sob o vasilhame conten-

do a solução e registrado seu peso. Ligou-se o compressor de ar e abriu-se sua torneira até obter 24 l/min na leitura do rotâmetro. Em intervalos de 8 horas foram lidas as temperaturas dos termômetros de bulbo seco e úmido de ambos os conjuntos, determinou-se a temperatura e concentração da solução e registrou-se a diferença de peso do vasilhame que contém a solução. Nesse momento também foi adicionada solução de sacarose 10<sup>o</sup>Brix em quantidade semelhante àquela de água evaporada no intervalo de tempo anterior. A solução foi concentrada até atingir 13<sup>o</sup>Brix.

### 3.2.8. Secagem de líquido com ar seco

#### 3.2.8.1. Líquido frio e ar quente

a) Coluna com 30 cm de altura da camada de enchimento: seguindo o esquema da Figura 4, utilizando o equipamento descrito em 3.1.4., denominou-se de ciclo fechado do ar ao seguinte ciclo: ventilador centrífugo → câmara de aquecimento → câmara de estocagem → câmara de secagem → condensador 1 → ventilador centrífugo. Denominou-se ciclo aberto do ar ao seguinte ciclo: ar ambiente → ventilador centrífugo → câmara de aquecimento → câmara de secagem → ar ambiente. Ligou-se a unidade de refrigeração de líquido refrigerante com algumas horas de antecedência ao início do teste, de forma que o líquido atingisse cerca de -10<sup>o</sup>C. Na câmara de estocagem foram colocados cerca de 4 kg de solução de sacarose 11<sup>o</sup>

Brix e ligada a respectiva bomba de re-circulação de forma a obter uma vazão de cerca de 40 l/h de solução de sacarose. A bomba centrífuga do líquido refrigerante foi ligada e obtida uma vazão de cerca de 220 l/h. O banho-maria não foi ligado. O ar foi mantido em ciclo fechado. Foi ligado o ventilador centrífugo e o aquecimento do ar e regulado o termostato para que se obtivesse uma temperatura média de 45°C no ar a uma vazão de cerca de 45 kg/h. Quando a solução de sacarose na câmara de estocagem atingiu 13-15°C, foi iniciada a contagem do tempo e esvaziado o erlenmeyer destinado a recolher a água condensada. Em intervalos de cerca de meia hora foram registradas as temperaturas do líquido refrigerante tanto de ida quanto de volta da coluna, bem como o tempo no qual a câmara de aquecimento permanece ligada e desligada, determinado por cronômetro. Em intervalos de exatamente uma hora foi medido o volume de água condensada. Encerrou-se o experimento após 4 horas.

b) Coluna com 15 cm de altura da camada de enchimento

b.1.) água a 18°C: seguindo o esquema da Figura 4, e o método descrito em a), diminuiu-se a altura da camada de enchimento para 15 cm. O ar foi mantido em ciclo aberto com vazão de cerca de 37 kg/h e o aquecimento foi ligado para obter uma temperatura média de 60°C. Colocou-se cerca de 4 kg de água na câmara de estocagem e ligou-se a

bomba de re-circulação. Quando a água atingiu  $15^{\circ}\text{C}$ , foi iniciada a contagem do tempo. Testou-se duas vazões de água: 60 e 100 l/h, seguindo as condições abaixo: após 15 min de operação com a primeira vazão, foi determinada a umidade do ar ambiente e do ar de saída da coluna com o auxílio de um conjunto de termômetros de bulbo seco e bulbo úmido. Aumentou-se, então, a vazão de água e após 15 min de operação, novamente foram registradas as umidades do ar ambiente e de saída da coluna.

b.2.) água a  $32^{\circ}\text{C}$ : repetiu-se o teste acima, utilizando água a  $32^{\circ}\text{C}$ , e testou-se vazões de 20 e 70 l/h de água.

### 3.2.8.2. Líquido quente e ar quente

#### a) Coluna com 15 cm de altura da camada de enchimento

a.1.) testes com água: seguindo o esquema da Figura 4, foi adicionado ao sistema de evaporação utilizado em 3.2.8.1., - um segundo condensador, denominado condensador 2, descrito em 3.1.6. O topo do condensador 1 foi conectado ao topo do condensador 2 através de uma mangueira de plástico. O ar circula através desse condensador entrando pelo topo do tubo central, sendo liberado pela parte inferior do mesmo para dentro da câmara formada pelo tubo e carcaça, por onde ascende, saindo pela abertura lateral da carcaça. Essa abertura foi ligada com tubo plástico

à boca de aspiração do ventilador centrífugo. Nesse tubo, pouco antes do ventilador, encontra-se adaptado um conjunto de termômetros de bulbo seco e úmido. A água condensada foi recolhida em erlenmeyer de 500 ml conectado com mangueira plástica à saída do fundo do condensador 2. Foi utilizada uma camada de enchimento na câmara de secagem de 15 cm de altura. O ar foi mantido em ciclo fechado a uma vazão de 44 kg/h e à temperatura média de 60°C. Foi interrompida a circulação do líquido refrigerante na serpentina localizada na câmara de estocagem. Foi ligada a bomba de re-circulação do líquido refrigerante e obtida uma vazão de 170 l/h à temperatura de -10°C. Ligou-se o banho-maria e a bomba de re-circulação da água, utilizando uma vazão de cerca de 55 l/h. Foram testadas as temperaturas de 30, 40 e 50°C na água, seguindo as condições abaixo: quando a água atingiu a temperatura desejada, iniciou-se a contagem do tempo, esvaziou-se os erlenmeyers dos condensadores. Em intervalos de cerca de meia hora, foi determinada a temperatura do líquido refrigerante, tanto de ida como de volta dos condensadores e a umidade do ar de saída do condensador 2. Determinou-se com crômetro o tempo no qual o aquecimento de ar permanece ligado e desligado. Após exatamente uma hora, foi determinado com proveta o volume de água condensada em cada temperatura de água testada.

a.2.) concentração de vinhoto  $10^{\circ}$ Brix: seguiu-se o esquema da Figura 4, utilizando o equipamento descrito no método anterior, porém, mantendo o ar em ciclo aberto, sem usar os condensadores nem a serpentina de resfriamento da câmara de estocagem. Colocou-se cerca de 6 kg de vinhoto  $10^{\circ}$ Brix, contendo cerca de 35 ppm de anti-espumante, na câmara de estocagem. Foi ligado o ventilador centrífugo e o aquecimento do ar, sendo obtida uma vazão de cerca de 35 kg/h à temperatura de  $80^{\circ}$ C. Determinou-se, com cronômetro, o tempo no qual o aquecimento do ar permanece ligado e desligado. Foi ligado o banho-maria e a bomba de re-circulação do líquido. Foi necessário ajustar a vazão de vinhoto durante a concentração em função de sua viscosidade, de modo que todo o enchimento sempre estivesse umedecido. Quando a temperatura do vinhoto atingiu  $40^{\circ}$ C, marcou-se o nível de líquido na coluna e iniciou-se a contagem do tempo. Em intervalos de cerca de meia-hora, foram determinadas as umidades do ar de entrada do ventilador e saída da coluna com o auxílio de termômetros de bulbo seco e úmido. Após intervalos de exatamente uma hora, marcou-se novamente o nível de líquido na coluna, e determinou-se a concentração do vinhoto. Após 6 horas de concentração foram adicionados 5 kg de vinhoto  $3^{\circ}$ Brix, determinou-se a concentração da mistura e concentrou-se por 2 horas. Para determinar o volume de água evaporada em cada hora de concentração, foi retira-

do o vinhoto concentrado da coluna e colocada água na câmara de estocagem até que o nível ficasse acima da primeira marca e ligou-se a bomba de re-circulação da água. Descartou-se a água até que o nível atingisse a primeira marca, coletou-se a água liberada pela bomba até que o nível atingisse a segunda marca, e novamente descartou-se a água. O volume de água coletada foi medido com proveta.

b) Coluna com 7,5 cm de altura da camada de enchimento: seguindo o esquema da Figura 4, empregando o sistema de evaporação utilizado em a), diminuiu-se a camada de enchimento para 7,5 cm, fixando sobre a mesma um disco de material plástico de cerca de 6 cm de diâmetro, sobre o qual cai o jato de alimentação de líquido no interior da coluna. Na rolha de borracha que fixa a mangueira de alimentação do líquido à coluna, adaptou-se um conjunto de termômetros de bulbo seco e úmido, de modo que os bulbos encontra-se no interior da coluna e as hastes no exterior, para a determinação da umidade do ar de entrada dos condensadores.

b.1.) Influência da temperatura do ar na vazão de condensado, mantendo constante a temperatura do líquido:

- água à temperatura constante de  $30^{\circ}\text{C}$ : foram colocados cerca de 6 litros de água na câmara de estocagem. Ligou-se a bomba centrífuga e o banho-maria de modo a ob

ter uma vazão de água de cerca de 50 l/h à temperatura de 30°C. Ligou-se a bomba de re-circulação do líquido refrigerante de modo a obter uma vazão de 160 l/h à temperatura de cerca de -10°C. O ar foi mantido em ciclo fechado. Ligou-se o ventilador centrífugo e o aquecimento do ar, obtendo-se uma vazão de cerca de 45-47 kg/h. Testou-se ar nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60°C. Quando a temperatura da água atingiu 30°C foi iniciada a contagem do tempo, esvaziaram-se os erlenmeyers dos condensadores e testou-se cada temperatura do ar durante duas horas, determinando o volume de condensado após intervalos de exatamente uma hora. Em intervalos de meia hora foram determinadas as umidades do ar de entrada e saída dos condensadores, a temperatura do líquido refrigerante na ida e volta dos condensadores, bem como o tempo em que o aquecimento do ar permanece ligado e desligado, determinado por cronômetro.

- água à temperatura constante de 50°C: repetiu-se o teste descrito acima, utilizando água à temperatura de 50°C e testando o ar nas temperaturas de 50, 60 e 75°C.
- água à temperatura constante de 83°C: cerca de 6 litros de água foram colocados na câmara de estocagem. - Ligou-se a bomba centrífuga e o banho-maria, de modo a obter uma vazão de água de cerca de 50 l/h à tempera

tura de  $83^{\circ}\text{C}$ . O ar foi mantido em ciclo aberto, ligando o ventilador centrífugo e o aquecimento do mesmo, obtendo-se uma vazão de cerca de 38-42 kg/h. Testou-se as seguintes temperaturas de ar: 30, 50 e  $70^{\circ}\text{C}$ . Quando a temperatura da água atingiu  $83^{\circ}\text{C}$ , iniciou-se a contagem do tempo e foi marcado o nível do líquido na coluna. Testou-se cada temperatura do ar por exatamente uma hora, ao final da qual, novamente foi marcado o nível de líquido da coluna. Em intervalos de cerca de meia hora, foram determinados a umidade do ar de entrada e saída da coluna, bem como o tempo em que o aquecimento permanece ligado e desligado, determinado por cronômetro. Quando necessário, adicionou-se mais água à câmara de estocagem durante o intervalo entre cada teste, esperou-se a água atingir novamente a temperatura de  $83^{\circ}\text{C}$  e reiniciaram-se os testes. Para determinar o volume de água evaporada pelo ar em cada temperatura testada, procedeu-se como em a.2.).

b.2.) Influência da temperatura do líquido e ar na vazão de condensado: seguindo o esquema da Figura 4, utilizou-se o mesmo equipamento empregado em b). Colocou-se cerca de 6 litros de água na câmara de estocagem. Ligou-se a bomba centrífuga e o banho-maria de modo a obter uma vazão de cerca de 50 l/h. Ligou-se a bomba de re-circulação - do líquido refrigerante de modo a obter uma vazão de

aproximadamente 180 l/h a uma temperatura ao redor de  $-10^{\circ}\text{C}$ . O ar foi mantido em ciclo fechado. Ligou-se o ventilador centrífugo e o aquecimento do ar, sendo obtida uma vazão de cerca de 45-47 kg/h. Utilizou-se 30, 40, 50 e  $60^{\circ}\text{C}$  como temperaturas de ar e água, testando ambos à mesma temperatura durante exatamente uma hora. Iniciou-se a contagem do tempo quando ar e água atingiram a temperatura desejada, quando então foram esvaziados os erlenmeyers dos condensadores e, em intervalos de cerca de meia hora, foram determinadas as umidades do ar de entrada e saída dos condensadores, a temperatura do líquido refrigerante na ida e volta dos condensadores, bem como o tempo em que o aquecimento do ar permaneceu ligado e desligado. Após exatamente uma hora foi medido com proveta o volume de água condensada em cada teste de temperatura de líquido e ar.

b.3.) Influência da temperatura do líquido na vazão de água evaporada, mantendo constante a temperatura do ar: seguindo o esquema da Figura 4, foi empregado o mesmo equipamento utilizado em b).

- ar à temperatura de  $40^{\circ}\text{C}$ : colocou-se cerca de 4 kg de água na câmara de estocagem. Ligou-se o banho-maria e a bomba de re-circulação da água, de modo a obter uma vazão de cerca de 50 l/h. Testou-se a água nas seguintes temperaturas: 30 e  $40^{\circ}\text{C}$ . Foi ligada a bomba de re

ciclo do líquido refrigerante de modo a obter uma vazão de 180 l/h a uma temperatura de cerca  $-10^{\circ}\text{C}$ . O ar foi mantido em ciclo fechado. Ligou-se o ventilador e o aquecimento de ar, sendo obtida uma vazão de cerca de 46 kg/h, à temperatura média de  $40^{\circ}\text{C}$ . Quando a água atingiu a temperatura desejada, iniciou-se a contagem do tempo, esvaziou-se os erlenmeyers dos condensadores e testou-se cada temperatura do líquido por exatamente uma hora, medindo, após, o volume de água condensada. - Em intervalos de cerca de meia hora, foram determinadas a umidade do ar de entrada e saída dos condensadores, a temperatura do líquido refrigerante na ida e volta dos condensadores, bem como o tempo em que o aquecimento do ar permanece ligado e desligado, determinado por cronômetro.

- ar à temperatura de  $50^{\circ}\text{C}$ : procedeu-se como no teste - descrito acima, utilizando ar à temperatura de  $50^{\circ}\text{C}$ . - Testou-se a água nas temperaturas de 30 e  $50^{\circ}\text{C}$ .
- ar à temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$ : procedeu-se como no teste - descrito acima, utilizando ar à temperatura de  $60^{\circ}\text{C}$ . Testou-se a água nas temperaturas de 30, 50 e  $60^{\circ}\text{C}$ .
- ar à temperatura de  $80^{\circ}\text{C}$ : procedeu-se como no teste descrito acima, utilizando ar na temperatura de  $80^{\circ}\text{C}$ , mantendo-o em ciclo aberto, sem utilizar os condensado

res. A água foi testada nas temperaturas de 40 e 50°C, sendo a quantidade de água evaporada determinada como em a.2.).

b.4.) Concentração de solução de sacarose 19,3°Brix contendo 1% de ácido tartárico : seguindo o esquema da Figura 4, utilizou-se o mesmo equipamento empregado em b). Foram colocados cerca de 8 kg de solução de sacarose 19,3°Brix contendo 1% de ácido tartárico, na câmara de estocagem.- Ligou-se a bomba e o banho-maria de modo a obter uma vazão de cerca de 60 l/h à temperatura de 50°C. O ar foi mantido em ciclo fechado. O ventilador e o aquecimento do ar foram ligados e obtida uma vazão de ar de cerca de 43 kg/h à temperatura média de 80°C. Ligou-se a bomba de reciclo do líquido refrigerante para obter uma vazão de cerca de 190 l/h à temperatura de cerca de -10°C. Quando a solução de sacarose atingiu a temperatura de 50°C,- foram esvaziados os erlenmeyers dos condensadores, iniciou-se a contagem do tempo e foi determinada a concentração da solução de sacarose. Após intervalos de cerca de meia hora, foi determinada a umidade do ar de entrada e saída da coluna, a temperatura do líquido refrigerante - tanto na ida quanto na volta aos condensadores, e determinou-se com cronômetro o tempo em que o aquecimento do ar permanece ligado e desligado. Em intervalos de exatamente uma hora, foi determinada a concentração da solu-

ção de sacarose e medido com proveta o volume da água - condensada recolhida em cada condensador. A concentração foi interrompida após 3 horas, foram adicionados cerca de 5 kg de solução de sacarose 19,3<sup>o</sup>Brix e continuou-se a concentrar por mais 3 horas, como descrito anteriormente.

### 3.2.8.3. Líquido quente e ar frio

- a) Teste com água: seguindo o esquema da Figura 5, utilizando o equipamento descrito em 3.1.5., foram colocados cerca de 6 litros de água na câmara de estocagem. Ligou-se a bomba de re-circulação da água e o trocador de calor de modo a obter uma vazão de água de cerca de 120 l/h. Foram testadas as temperaturas de água de 80 e 90<sup>o</sup>C. O ventilador centrífugo foi ligado e obtida uma vazão de cerca de 50 kg/h à temperatura ambiente. Quando a água atingiu a temperatura desejada, foi marcado o nível do líquido na coluna e iniciada a contagem do tempo. Testou-se cada temperatura por exatamente uma hora, após a qual foi novamente marcado o nível do líquido na coluna. Em intervalos de cerca de meia hora, foram determinados a umidade do ar de entrada e saída da coluna, bem como o tempo em que o intercambiador permaneceu ligado e desligado, determinado por cronômetro. Para determinar o volume de água evaporada em cada temperatura, procedeu-se como descrito no item 3.2.8.2.a.2.).

b) Concentração de vinhoto 3,9<sup>o</sup>Brix: seguindo o esquema da Figura 5, empregando o mesmo equipamento utilizado em a), foi utilizada uma vazão de vinhoto de cerca de 140 l/h à temperatura de 90<sup>o</sup>C. A vazão de ar foi de aproximadamente 50 kg/h à temperatura ambiente. Foram colocados 6 kg de vinhoto na câmara de estocagem, adicionando-se 3 kg de vinhoto a cada meia hora até obter um concentrado de cerca de 26<sup>o</sup>Brix. Concentrou-se por mais meia hora sem adição de vinhoto até obter um concentrado de cerca de 53<sup>o</sup>Brix.

### 3.2.9. Análises do vinhoto concentrado

- a) Determinação de açúcares redutores: efetuada conforme AOAC, 1970, pelo método 31.091 e 31.092.
- b) Determinação de açúcares totais (invertidos): conforme AOAC 1970, pelo métodos 31.083 a 31.089.
- c) Determinação de acidez total titulável: efetuada conforme AOAC, 1970, pelo método 11.035.
- d) Determinação de acidez volátil: efetuada conforme AOAC, 1970 pelo método 11.036 (a) a 11.038 (b).
- e) Determinação de cinzas sulfatadas: efetuada conforme AOAC, 1970, pelo método 31.014.
- f) Determinação de glicerol: efetuada conforme AOAC, 1970, pelo método 11.010.
- g) Determinação de proteína: efetuada conforme AOAC, 1970, pelo método 2.51 e 10.141 (b).

- h) Determinação de sólidos totais: conforme AOAC, 1970) pelo método 31.008.
- i) Determinação de fósforo: efetuada conforme Zeiss, pelo método da determinação de fósforo inorgânico no sangue.
- j) Determinação de potássio: efetuado conforme AOAC, 1970, pelo método 2.008 (b).
- k) Determinação de °Brix: efetuado conforme AOAC, 1970, pelo método 31.011.
- l) Determinação de matéria orgânica: determinada pela diferença entre sólidos totais e cinzas sulfatadas.

#### 3.2.10. Determinação da vazão de ar

No tubo plástico, que une o ventilador centrífugo à coluna, no equipamento utilizado nos testes descritos no método 3.2.8., - foi instalado um tubo de Pitot, de forma que houvesse pelo menos 2 m de tubo em linha reta antes e após o ponto de inserção do tubo de Pitot. Ligou-se a bomba de re-circulação de líquido a concentrar e o ventilador centrífugo. Foi ligado o aquecimento do ar caso a determinação de vazão fosse de ar em temperatura superior à ambiente. Foi determinada a diferença entre pressão estática e dinâmica e determinou-se a vazão de ar com auxílio da régua de cálculo que acompanha o instrumento.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. EVAPORAÇÃO A BAIXA TEMPERATURA

Na concentração de líquidos por secagem a baixa temperatura, o líquido é utilizado à temperatura ambiente, sendo a mesma reduzida durante o processo pelo efeito refrigerante da evaporação. Por se tratar de concentração de alimentos líquidos aromáticos por secagem com ar, o ciclo do mesmo deve ser fechado, de modo que sempre o mesmo ar entre em contato com o líquido, evitando a perda de aromas. Para a regeneração do ar e retirada da umidade, são utilizados leitos de sílica-gel, sendo necessária a determinação de alguns de seus parâmetros para sua utilização eficiente. Para a movimentação do ar, diferentes tipos de equipamentos podem ser utilizados, possibilitando diferentes formas de contato entre o ar e líquido, sendo a economicidade do processo variável com cada equipamento.

#### 4.1.1. Com o uso de compressor

Utilizando um compressor, ar seco é borbulhado em um meio líquido a fim de absorver umidade e concentrar o líquido. O ar seco é obtido por regeneração, com sílica-gel, do ar que deixa o líquido. A quantidade de água adsorvida em sílica-gel depende de inúmeras variáveis, entre elas: natureza do gás que contém a umidade, velocidade, temperatura e grau de umidade do gás, o comprimento do leito, o tamanho das partículas, a densi

dade aparente e a temperatura do dessecante. Considerando o ar ambiente com cerca de 60% de Umidade Relativa (UR) em temperatura de 20-25°C como padrão, a determinação da relação entre vazão de ar e o tempo necessário para que o ar saia de determinada coluna de sílica-gel em condições semelhantes ao ar ambiente, indica o tempo de hidratação da sílica-gel em relação à vazão de ar úmido que por ela passa. Na Tabela 1 - encontram-se os valores de tal teste, utilizando ar à temperatura ambiente e 95-98% UR, que atravessa uma coluna de sílica-gel de cerca de 4 cm<sup>2</sup> e 10 cm de altura, contendo cerca de 30 g de sílica-gel de 4-10 mesh.

TABELA 1. - Determinação do tempo de hidratação de sílica-gel, em relação à vazão de ar. (área coluna: 4 cm<sup>2</sup>; altura coluna: 10 cm; sílica-gel: 30 g).

V A Z Ã O		T E M P O
l/min	m <sup>3</sup> /h	horas
0,6	0,036	10,50
1,0	0,060	7,00
1,5	0,090	5,50
2,0	0,120	3,50
3,0	0,180	3,50
4,0	0,240	3,25
5,0	0,300	3,25
10,0	0,600	3,50

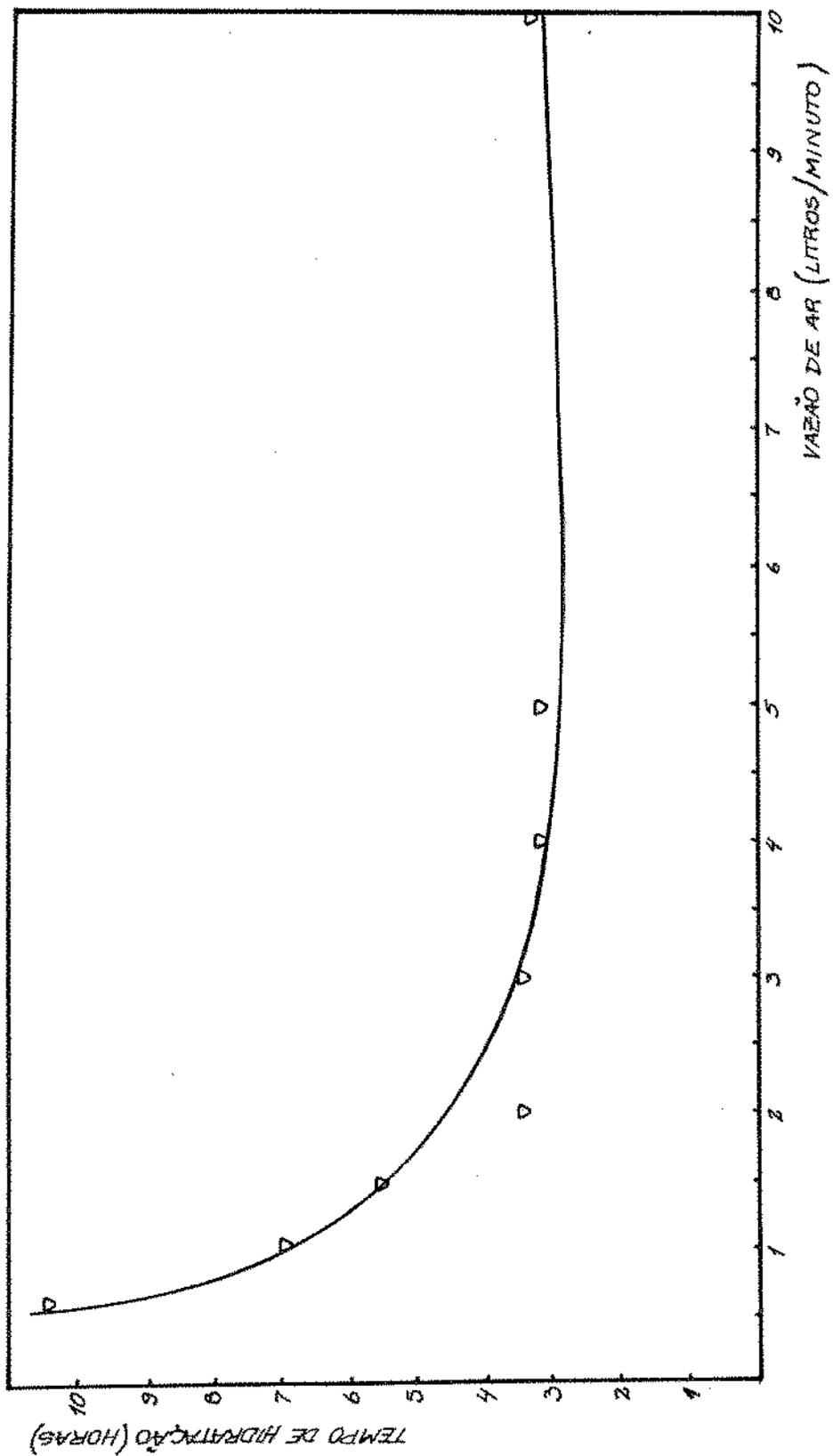


GRÁFICO I. - Tempo de hidratação da sílica-gel em relação à vazão de ar.

Pelo Gráfico I, observa-se que uma vazão de ar superior a 2 l/min não provoca maior diminuição no tempo de hidratação, permanecendo o mesmo fixo em 3,5 horas, por ter sido atingido o máximo de velocidade de adsorção de umidade. A quantidade de água adsorvida em sílica-gel em relação ao tempo, utilizando uma vazão fixa de ar úmido, é apresentada na Tabela 2: a quantidade total de água adsorvida aumenta com o passar do tempo de hidratação, porém, a quantidade adsorvida em cada intervalo de tempo decresce.

TABELA 2. → Determinação da quantidade de água adsorvida em sílica-gel. (área coluna 4 cm<sup>2</sup>; altura coluna: 10 cm; sílica-gel: 30 g; vazão: 2 l/min).

TEMPO	Á G U A	A D S O R V I D A
horas	g água	% acréscimo
0,25	0,62	-
0,50	1,13	82,0
0,75	1,65	46,0
1,00	2,17	31,0
1,25	2,64	21,0
1,50	3,10	17,0
1,75	3,51	13,0
2,00	3,94	12,0
2,25	4,34	10,0
2,50	4,68	7,8
2,75	5,01	7,0
3,00	5,29	5,6
3,25	5,58	5,5
3,50	5,87	5,2
3,75	6,14	4,6
4,00	6,36	3,6

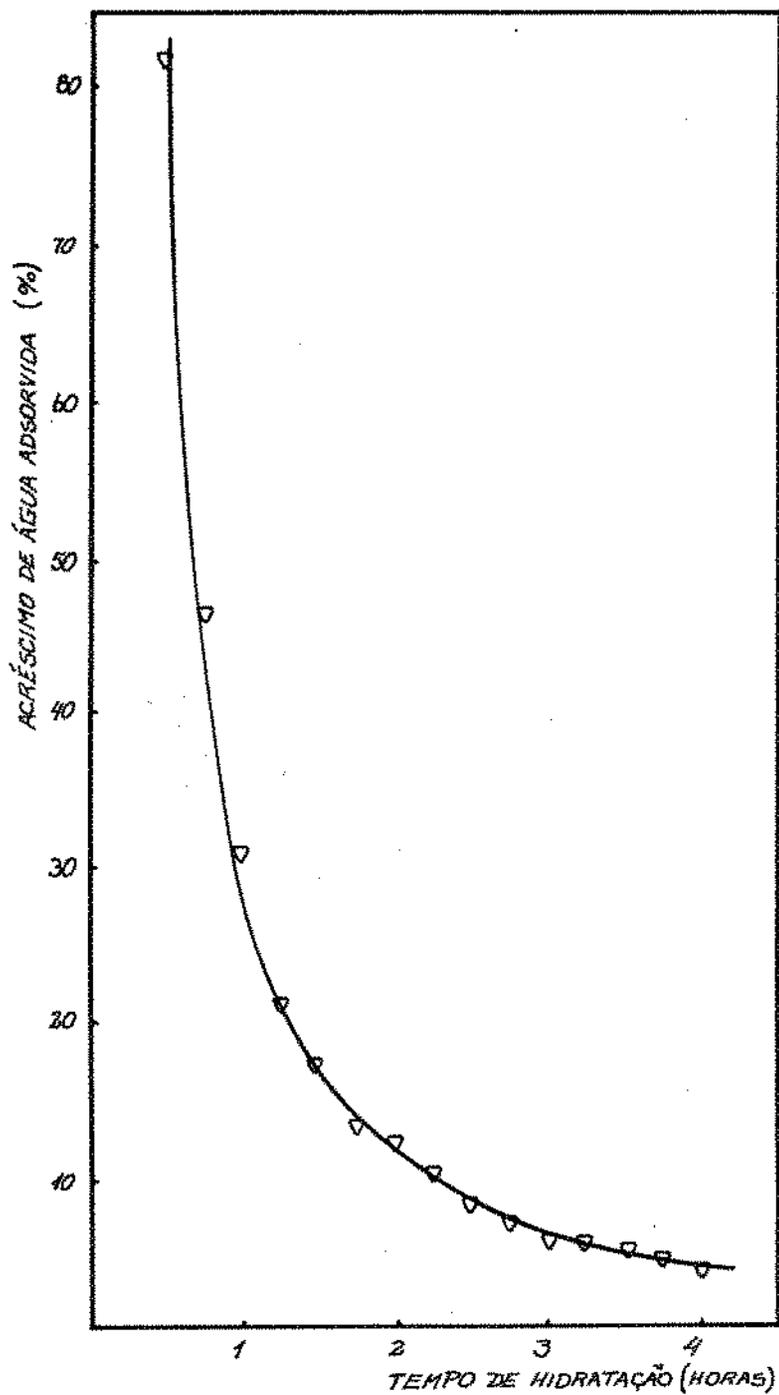


GRÁFICO II. - Acréscimo de água adsorvida em sílica-gel em relação ao tempo de hidratação.

O Gráfico II mostra a porcentagem de acréscimo da água adsorvida em um intervalo de tempo em relação ao intervalo anterior, em função do tempo de hidratação. Observa-se que após 2 horas de hidratação, não há vantagem em continuar com o uso da mesma sílica-gel, pois a porcentagem de água adsorvida após esse período, tende a tornar-se praticamente constante. O custo bastante elevado da sílica-gel torna necessária a regeneração, uma vez que a mesma encontra-se umedecida. Resulta daí, a conveniência da determinação do tempo necessário para a secagem da mesma. Industrialmente, a regeneração é feita em secadores rotativos com insuflagem de ar quente a 120-170°C. Na Tabela 3, encontram-se os dados obtidos com teste de secagem de sílica-gel em três diferentes graus de umidade, realizado em estufa com insuflagem de ar quente a 135°C.

TABELA 3. - Determinação do tempo de secagem de sílica-gel em estufa a 135°C.

TEMPO DE SECAGEM	UMIDADE	UMIDADE	UMIDADE
horas	%	%	%
0,00	11,69	17,30	23,60
0,50	3,89	7,69	3,23
1,00	0,43	1,16	0,00
1,50	0,00	0,26	-
2,00	-	0,00	-

Verifica-se que após 2 horas de secagem com ar a essa temperatura, a sílica está completamente seca, independente de sua umidade inicial, podendo ser novamente utilizada para a desidratação do ar. A densidade aparente da sílica-gel utilizada nos testes de hidratação e secagem, está na Tabela 4, onde a densidade média encontrada, está em torno de  $0,76 \text{ g/cm}^3$ , para uma sílica de 4-10 mesh.

TABELA 4. - Determinação da densidade aparente da sílica-gel.  
(área da coluna:  $3,89 \text{ cm}^2$ ).

Peso de sílica-gel	altura coluna	volume coluna	densidade aparente
g	cm	$\text{cm}^3$	$\text{g/cm}^3$
90,09	29,6	115,14	0,78
90,22	31,8	123,70	0,73
90,24	30,2	117,47	0,77
90,25	31,3	121,75	0,74
90,29	29,7	115,53	0,78
densidade aparente média: $0,76 \text{ g/cm}^3$			

Utilizando sílica-gel seca e um compressor de ar de motor de 0,33 CV, foi obtido ar seco à temperatura ambiente que, a uma vazão de 6 l/min, borbulha em suco de laranja 12<sup>o</sup>Brix. O ar úmido que deixa o suco é conduzido através de uma segunda coluna de sílica-gel, com a finalidade de determinar a quantidade-

de água removida do suco por desidratação com ar seco, sendo a concentração do suco determinada por refratômetro após algumas horas de concentração. A sílica-gel da segunda coluna é renovada a cada duas horas. A sílica da primeira coluna não necessita substituição frequente, pois o ar que sai do compressor já é bastante seco. A desidratação do suco e a adsorção de água na segunda coluna de sílica-gel foi testada de duas formas: adiabática (colunas isoladas termicamente com lã-de-vidro) e isotérmica (colunas não revestidas). Os resultados de água removida e concentração obtidos estão na Tabela 5, Ítens a) e b). O ar seco que deixa a segunda coluna em cada teste sofreu resfriamento com a finalidade de condensar aromas que tenham sido arrastados pelo ar, porém, o condensado obtido não apresentou nenhum odor, tratando-se, provavelmente, só de água condensada da umidade do ar liberado pela coluna de sílica-gel.

Os dados da concentração do suco de laranja mostram que na desidratação e adsorção adiabática há menor retirada de água do que no sistema isotérmico. Quando o sistema é adiabático, o calor retirado do suco para a evaporação causa abaixamento da temperatura do mesmo até a temperatura de bulbo úmido do ar seco que nele borbulha. A partir desse momento, todo o calor necessário à evaporação deve ser suprido pelo ar. Como esse se encontra à temperatura ambiente, não dispõe de muito calor para a evaporação. Além disso, sendo a adsorção de água um processo isotérmico, e a coluna de sílica estando isolada termica

TABELA 5. - Concentração de suco de laranja 12<sup>o</sup>Brix por desidratação com ar seco e recuperação de aroma.

a) desidratação e adsorção adiabática		
TEMPO	ÁGUA ADSORVIDA NA COLUNA 2	CONCENTRAÇÃO DO SUCO
horas	g	<sup>o</sup> Brix
0	0,00	12
2	8,05	12,2
4	9,52	-
6	8,97	-
8	8,58	-
10	9,11	12,5
12	9,27	-
14	8,73	-
16	8,72	-
18	8,26	13
água adsorvida média: 8,0 g/2h		
b) desidratação e adsorção isotérmica		
0	0,00	12
2	10,18	-
4	10,30	12,3
água adsorvida média: 10,24 g/2h		

mente, ocorre aumento da temperatura da sílica, o que diminui sua capacidade de adsorção. Por outro lado, no sistema isotérmico tanto o suco quanto a sílica trocam calor com o meio ambiente, o suco retirando calor para a evaporação e a sílica - fornecendo calor pela adsorção exotérmica, tendendo ambos a manter suas temperaturas em equilíbrio com o meio ambiente. O suco, dispondo não só do calor do ar que nele borbulha, mas - também do calor que recebe do meio ambiente, permite que haja maior evaporação no sistema isotérmico.

A pequena velocidade de evaporação obtida na concentração de suco de laranja, determinou a necessidade do aumento da vazão de ar e do volume de líquido no qual esse borbulha. Teste efetuado com cerca de 2 kg de solução de sacarose 10<sup>o</sup>Brix, através da qual borbulha ar previamente seco em coluna de sílica-gel e a uma vazão de 24 l/min, apresentou os resultados da Tabela 6, ítem a). Note-se que há uma única adição de sacarose.

A quantidade de água evaporada em cada intervalo de tempo é determinada pela concentração da solução. Observa-se que a velocidade de concentração foi superior àquela obtida no teste com suco de laranja, apesar de ser decrescente com o passar do tempo de concentração. Esse decréscimo é devido a dois fatores. O primeiro refere-se à diminuição da temperatura da solução, bem abaixo da temperatura ambiente, e que é devido à evaporação de água causada pelo ar seco. A velocidade de troca de calor, da

TABELA 6. - Concentração de solução de sacarose 10° Brix.

a) sem reposição de amostra										
condições do ar										
antes sol.		após sol.		temperatura ambiente		temperatura sol. sacarose		concentração sol. sacarose		velocidade
sacarose	sacarose	tempo	temperatura ambiente	sol. sacarose	concentração sol. sacarose	temperatura sol. sacarose	concentração sol. sacarose	temperatura sol. sacarose	concentração sol. sacarose	velocidade
UR*	UA*	UR*	UA*	horas	°C	°C	°C	°C	°Brix	g H <sub>2</sub> O/h
10	2,5	-	-	19	27	-	-	-	12,7	22,4
12	3,0	-	-	45	27	16	16	16	16,3	17,2
12	3,0	55	12,5	62	26	14	14	14	20,4	16,4
8	2,0	52	12,5	70	29	15	15	15	23,0	16,1
b) com reposição de amostra para manter constante o nível de líquido										
15	3,0	79	18,5	0	27	27	27	27	10,2	-
14	3,0	65	15	4,5	27	27	18	18	10,3	-
15	3,5	66	16	19,5	27	27	17	17	10,9	23,6
14	3,0	65	15	26,5	27	27	-	-	-	22,3
13	3,0	62	14	42,5	26	26	16	16	-	20,7
11	2,7	63	14,5	52,5	26,5	26,5	-	-	12,2	20,2
13	3,0	63	15	68	26,5	26,5	-	-	-	19,5
10	3,0	65	15	72	26,5	26,5	17	17	13,2	19,6
TOTAL DE ÁGUA EVAPORADA: 1410 g										

\* UR expresso em % e UA em g água/kg de ar seco.

solução com o meio ambiente é bem menor do que a velocidade de retirada de calor causada pela evaporação, diminuindo dessa forma, o calor disponível pelo líquido para a evaporação. Na evaporação de água em uma corrente gasosa, tanto o líquido quanto o ar, cedem calor para que ocorra a evaporação. O segundo fator refere-se à diminuição da altura da coluna de líquido pela qual o ar atravessa. A diminuição da altura causa diminuição do tempo de contato entre ar e líquido, não permitindo que o ar se sature completamente de umidade, como se observa pela umidade relativa apresentada pelo ar, após a solução de sacarose nos diversos tempos.

Porém, efetuando a concentração mantendo constante a altura da coluna de solução de sacarose, por adição de solução em quantidade semelhante àquela de água evaporada, em certo intervalo de tempo, obtêm-se os valores apresentados na Tabela 6, item b. A quantidade de água evaporada em cada intervalo de tempo, é determinada pela diferença de peso do recipiente que contém a solução. Observa-se que a velocidade de concentração, determinada entre a quantidade total de água evaporada até o intervalo considerado e o tempo total até o mesmo intervalo, apresenta valores maiores do que aqueles obtidos no teste com adição única de amostra. Porém, também são decrescentes, apesar de ter sido mantido o nível do líquido.

Tendo a vazão de ar de 24 l/min sido a máxima capaz de ser obtida nesse sistema, foi necessário determinar o custo da água evaporada no mesmo. O compressor permaneceu ligado 65% do tempo para manter essa vazão de ar. O custo em cruzeiros por kg de água evaporada, está na Tabela 7, onde foram utilizados os seguintes valores: CV = hp; kW/hp = 0,7457; Cr\$/kWh = 3,50 (industrial).

TABELA 7. - Custo da água evaporada na concentração por secagem utilizando compressor para a movimentação do ar.

POTÊNCIA			tempo total	tempo ligado	energia gasta	custo	água evap.	custo da água evaporada
CV	hp	kW	horas	horas	kWh	Cr\$	kg	Cr\$/kg água evap.
1/3	0,33	0,246	72	46,8	11,51	40,28	1,41	28,57

Observa-se que o custo por kg de água evaporada é alto, não podendo competir com outros processos de concentração a baixa temperatura, conforme Thijssen (1974):

MÉTODO	Cr\$/kg água evap.	consumo
osmose reversa	0,025	0,007 kWh/kg água permeada
crio-concentração	0,082	0,020 kWh/kg água removida
evaporação simples efeito	0,806	1,100 kg vapor/kg água ev.

onde: 1 kWh = Cr\$ 3,50; 1 kg óleo comb. = Cr\$ 8,80 e 1 kg óleo combustível = 13 kg vapor.

#### 4.1.2. Com o uso de turbina

Outra forma de distribuir o ar como bolhas em um líquido é utilizando uma turbina, que gira em alta rotação mergulhada no líquido. A turbina succiona o ar seco através de um tubo fixado ao eixo central da mesma e cuja extremidade superior permanece acima do nível do líquido, ligado ao sistema de desidratação do ar. O ar seco succionado é jogado para dentro do líquido na forma de pequenas bolhas, que arrastam umidade e concentram o líquido. O ar úmido é novamente dirigido ao sistema de regeneração para a retirada da umidade, de onde é succionada pela turbina, mantendo assim, o ciclo fechado. Comparando a potência necessária para que uma turbina e um compressor produzam a mesma vazão de ar, verifica-se que a turbina é mais econômica por necessitar menos potência. Porém, mostra-se anti-econômica quando comparada a um ventilador centrífugo, que produz uma vazão de ar muito superior com a mesma potência da turbina. O ventilador centrífugo joga o ar com menor pressão, enquanto que a turbina precisa lançar ar no sistema a uma pressão superior àquela da coluna de líquido que está sobre ela, resultando, daí, o maior gasto de potência.

#### 4.1.3. Com o uso de ventilador centrífugo

A vazão de água evaporada por desidratação com ar seco é diretamente proporcional à vazão de ar seco que entra em contato com o líquido. O uso de um ventilador centrífugo permite ob-

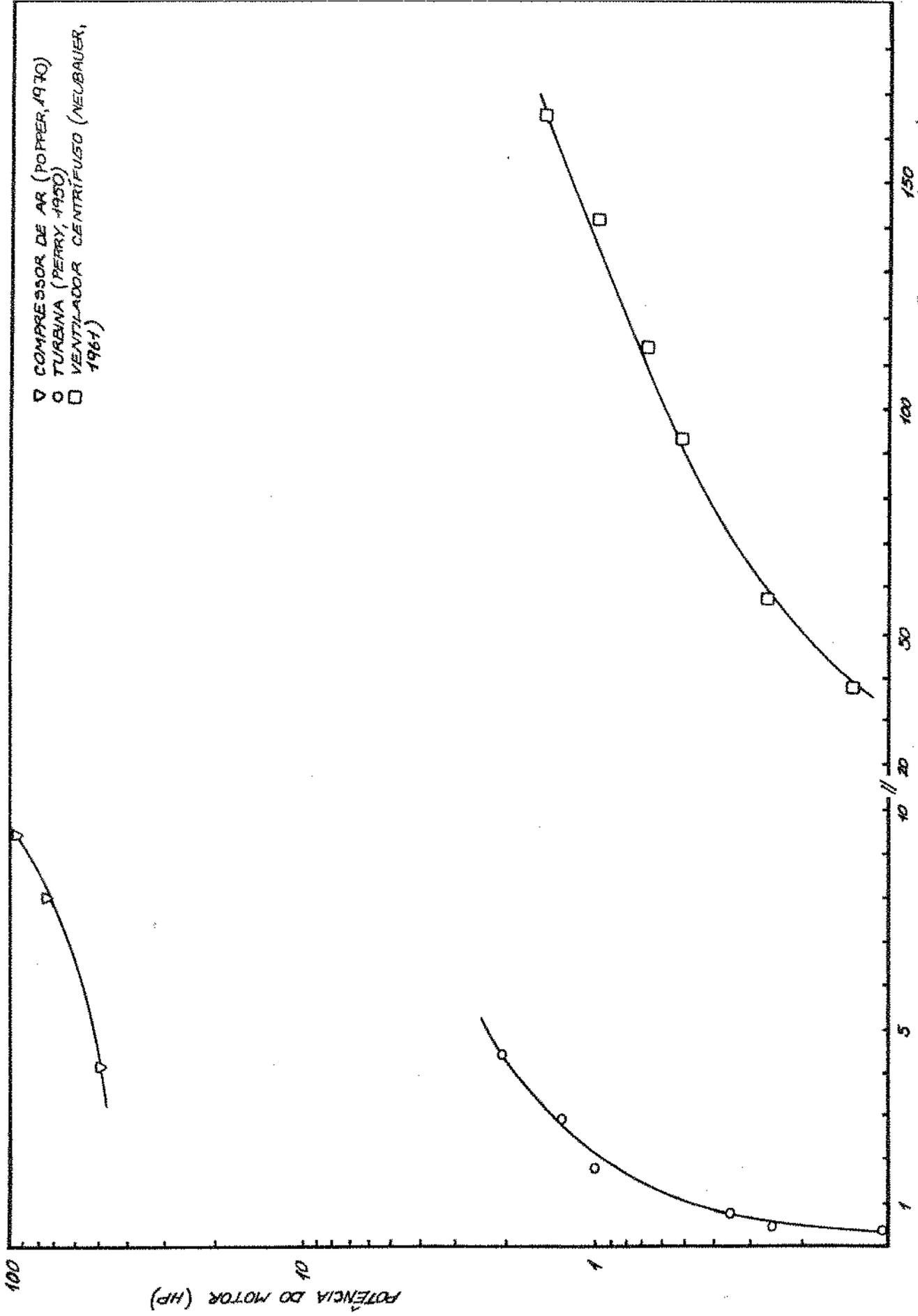


GRÁFICO III. - Vazão de ar obtida em relação à potência de motor de compressor, turbina e

ter uma vazão de ar muito superior àquela obtida em compressor ou turbina com a mesma potência, como se observa no Gráfico III.

Em coluna, que contém em seu interior algum tipo de material - como enchimento, e utilizando um ventilador centrífugo como - meio de movimentar o ar, líquido entra em contato com o ar sobre o enchimento, ocorrendo secagem sem que haja perda de carga apreciável na vazão do ar por causa do enchimento. Dessa forma evita-se a perda de carga ocasionada pela resistência - que a coluna de água oferece à passagem do ar, como ocorre quando se utiliza turbina ou compressor.

Além disso, segundo Popper (1970), o custo de investimento que cada equipamento representa, decresce na seguinte ordem: compressor → turbina → ventilador.

#### 4.1.4. Custo da regeneração da sílica-gel

Na regeneração de sílica-gel é necessário fornecer 1100 kcal a 1400 kcal para a remoção de um kg de água a ela adsorvida. Industrialmente, a secagem é realizada em secadores rotativos - com insuflagem de ar quente, podendo-se expressar o consumo de calorías em consumo de vapor para fins de cálculo de custo de operação:

consumo de vapor : 2,0 a 2,6 kg vapor/kg água removida

custo de operação: Cr\$ 1,50 a Cr\$ 1,90/kg água removida

onde: 1 kg vapor = 540 kcal; 1 kg óleo comb. = 12 kg vapor; -

1 kg óleo combustível = Cr\$ 8,80.

Verifica-se, assim, que, apesar da sílica-gel ser uma matéria-prima relativamente barata, sua utilização na desidratação do ar tornaria o processo de concentração por secagem anti-econômico devido ao alto consumo de energia necessário para sua própria regeneração.

#### 4.1.5. Desidratação do ar por refrigeração

Na regeneração por refrigeração, o ar sofre redução de sua temperatura até abaixo do ponto de orvalho, de forma que ocorre condensação da umidade, resultando em um ar mais seco à saída do equipamento. A condensação tem a vantagem, sobre a secagem do ar com agentes dessecantes, de ser uma operação contínua, além de não necessitar de uma operação secundária de regeneração do dessecante. Perry (1950) indica vários tipos de equipamentos com tal finalidade, podendo-se dividi-los em dois grupos: - aqueles que utilizam água fria como meio de troca de calor e umidade com o ar, e aqueles que utilizam uma superfície seca refrigerada para a troca de calor e condensação da umidade. No primeiro grupo, o ar atravessa uma cortina ou "spray" de água fria, resfria-se e a umidade condensa sobre a água fria com a qual o ar está em contato. Esse tipo de equipamento, porém, não é apropriado para a regeneração do ar no processo de concentração por secagem de alimentos líquidos aromáticos, pois, tal como com os agentes dessecantes líquidos, o ar, contendo aromas que arrastou do alimento, entra em contato com um segundo líquido, o qual,

por sua vez, capta e re-dissolve os aromas. Como o ar circula em ciclo fechado, o teor de aromas do alimento líquido decresce - por arraste dos mesmos pelo ar e posterior absorção na água do equipamento de regeneração. Já nos desumidificadores de superfície refrigerada seca, o ar em contato com a superfície fria condensa umidade e o único líquido com o qual entra em contato no equipamento, é a própria água condensada. Dessa forma, o ar sofre secagem sem praticamente perder aromas.

A energia que necessita ser retirada do ar durante a condensação da umidade, depende das entalpias do ar de entrada e saída do equipamento, bem como da vazão do ar. Testes de desumidificação do ar em condensadores de superfície refrigerada seca, - mostraram os seguintes resultados, para uma vazão de ar de cerca de 50 kg/h:

Ar	t <sup>o</sup> °C	UR* %	entalpia (h) kcal/kg ar seco	UA* (u) g H <sub>2</sub> O/kg ar seco
entrada condensador	42	90	40,5	49,3
saída condensador	16	80	9,3	9,0
d i f e r e n ç a			31,2	40,3

\*UR = umidade relativa e \*UA = umidade absoluta

A quantidade de calor retirada (Q) é:

$$Q = m (h_1 - h_2)$$

$$Q = 50 (31,2)$$

$$Q = 1.560 \text{ kcal/h}$$

onde:

m = vazão mássica do ar (kg ar/hora)

$h_1$  = entalpia do ar de entrada do condensador

$h_2$  = entalpia do ar de saída do condensador.

A quantidade de água condensada (H) é:

$$H = m (u_1 - u_2)$$

$$H = 50 (40,3)$$

$$H = 2,015 \text{ kg água/hora}$$

onde:

$u_1$  = umidade absoluta do ar de entrada do condensador

$u_2$  = umidade absoluta do ar de saída do condensador

A quantidade de calor retirada por kg de água condensada é:

$$\frac{1.560 \text{ kcal/h}}{2,015 \text{ kg/h}} = 774,2 \text{ kcal/kg água condensada}$$

Verifica-se assim, que a desumidificação do ar por refrigeração é bem mais econômica em termos de gasto de energia do que a desidratação com dessecante, onde o gasto é praticamente o dobro daquele com refrigeração.

Segundo Perry (1973), nos equipamentos de refrigeração, tem-se que:

- a) quase todos os gases refrigerantes têm comportamento similar à amônia;
- b) compressores que utilizam amônia apresentam uma eficiência de 84,5%;
- c) cada tonelada comercial de refrigeração equivale a 3.024 kcal por hora;
- d) para compressores que utilizam amônia, cada tonelada comercial de refrigeração, necessita de 0,973 hp a um coeficiente de performance de 4,85.

Na Tabela 8, encontram-se os gastos de um sistema de desumidificação do ar pelo frio para as condições apresentadas acima.

TABELA 8. - Desumidificação do ar por refrigeração: custo da condensação da umidade por compressor que utiliza amônia.

calor retirado	água condensada	potência teórica	potência real	energia*	custo*	custo da H <sub>2</sub> O condensada
kcal/h	kg/h	hp	hp	kWh	Cr\$	Cr\$/kg
1.560	2,015	0,5	0,575	0,43	1,51	0,74

\* 1,341 = hp/kWh

\* kWh industrial \* Cr\$ 3,50

Verifica-se, assim, que a desidratação do ar por refrigeração-

é bem mais econômica do que a desidratação por agentes dessecantes.

## 4.2. SECAGEM DE LÍQUIDO COM AR SECO

### 4.2.1. Líquido frio e ar quente

Segundo Hougen (1967), durante a evaporação de um líquido em um gás, parte da energia necessária à evaporação é fornecida pelo líquido e outra parte pelo gás. O líquido sofre redução de sua temperatura até atingir uma determinada temperatura que a partir de então, permanecerá constante durante todo o processo evaporativo, e chamada de temperatura de bulbo úmido do gás. Segundo van Arsdel (1973), na secagem de alimentos sólidos, o produto é conservado à baixa temperatura pelo efeito de resfriamento que ocorre quando a água no alimento evapora na corrente de ar. E continua: aproximadamente 540 kcal de calor são absorvidas quando 1 kg de água é evaporado. O forte efeito refrigerante resultante é o maior fator na habilidade em secar substâncias alimentícias delicadas em ar a altas temperaturas sem queimar o produto. Enquanto o material ainda está bem úmido, sua temperatura permanecerá abaixo daquela do ar que passa por ele, devido a esse efeito refrigerante, mas, assim que a superfície do material tornar-se parcialmente seca, o efeito refrigerante decresce e a temperatura do material elevar-se-á até perto da temperatura do ar. Como, porém, na concentração por secagem com ar seco se trata apenas de concentrar o

líquido e não de secá-lo completamente, apenas a primeira parte dos efeitos descritos por van Arsdel são aplicáveis. O alimento líquido, durante a concentração por secagem, permanece com sua temperatura bem abaixo daquela do ar aquecido e, segundo Hougen, à temperatura de bulbo úmido do ar com o qual está em contato. E, quanto mais seco o ar, menor sua temperatura de bulbo úmido, como se observa em qualquer diagrama psicométrico.

Em uma coluna contendo como enchimento pequenas espirais de vidro, líquido e ar entram em contato na forma de película de líquido sobre a qual passa o ar. Uma bomba centrífuga promove a circulação do líquido da base da coluna até o topo, onde entra na coluna e escorre pelo enchimento. O ar aquecido é impulsionado por um ventilador centrífugo, entrando pela base da coluna. Umedece-se ao entrar em contato com o líquido sobre o enchimento e, conseqüentemente, concentra o líquido. Pela passagem do ar, os aromas voláteis do alimento são arrastados pelo mesmo e, para não serem perdidos, o ar circula em ciclo fechado. Sua umidade é retirada por condensação em desumidificador de superfície refrigerada seca. O ar frio é aquecido por resistências elétricas e é novamente impulsionado pelo ventilador para dentro da coluna. Dessa forma, ar e líquido circulam em contra-corrente. Segundo Powell & Griffiths (1935), a quantidade de água evaporada de uma superfície úmida é maior quanto maior a velocidade do ar que sobre ela passa. Pela presen-

ça do enchimento na coluna, ocorre perda de carga na vazão do ar. A perda de carga é decorrente da resistência oferecida pelo enchimento, diminuindo a vazão de ar que atravessa o mesmo. A alteração da altura da camada de enchimento determina, assim, diferentes quantidades de água evaporada.

#### 4.2.1.1. Coluna com 30 cm de altura da camada de enchimento

A concentração de sacarose 11<sup>o</sup>Brix, à temperatura de 13<sup>o</sup>C com ar aquecido a 45<sup>o</sup>C, apresentou os resultados da Tabela 9.

TABELA 9. - Concentração por secagem de solução de sacarose 11<sup>o</sup> Brix à temperatura de 13<sup>o</sup>C, com ar a 45<sup>o</sup>C em coluna com 30 cm de altura da camada de enchimento.

TEMPO (h)	VAZÃO CONDENSADO (ml/h)
1	160
2	170
3	170
4	175

Tendo sido o ar mantido em ciclo fechado, não foi possível determinar a umidade do ar após o contato com o líquido. Sabe-se que, para uma umidade inicial fixa, quanto maior a umidade final do ar após o contato com o líquido, maior a quantidade de água evaporada. A pequena quantidade de condensado recolhida, pode ter como uma de suas causas a saturação incompleta do ar

com umidade, durante o contato com o líquido. Outras causas - podem ser:

- a) baixa vazão de ar no circuito;
- b) baixa temperatura do líquido a concentrar;
- c) pequena vazão do líquido a concentrar;
- d) baixa temperatura do ar.

#### 4.2.1.2. Coluna com 15 cm de altura da camada de enchimento

Pela diminuição da camada de enchimento, aumenta a vazão de ar no circuito pela diminuição da perda de carga. Com a vazão de ar aumentada, foi verificada a influência da vazão do líquido a baixa temperatura na hidratação do ar, estando o ar em ciclo aberto, isto é, saindo da coluna diretamente para o ambiente, - com a finalidade de determinar a umidade do mesmo após contato com o líquido. Os resultados de teste efetuado com água a  $18^{\circ}\text{C}$  e ar a  $60^{\circ}\text{C}$ , estão na Tabela 10.

Verifica-se que para água em uma temperatura baixa como  $18^{\circ}\text{C}$ , - no teste com a primeira vazão de água, o ar praticamente não se hidrata, como se observa pela pequena diferença na umidade absoluta do ar de entrada e saída da coluna. Aumentando a vazão de água, teste 2, ocorre secagem do ar, pois o ar de saída da coluna apresenta umidade absoluta menor do que aquela de entrada. Nesse teste a temperatura de bulbo úmido do ar de entrada da coluna encontra-se acima da temperatura do líquido e o contato com o líquido, provoca condensação de umidade e seca

TABELA 10. - Influência da vazão de água a 18°C na hidratação do ar a 60°C, em coluna com 15 cm de altura da camada de enchimento.

	TESTE 1	TESTE 2
vazão água (l/h)	60	107
temperatura água (°C)	18	18
vazão ar (kg/h)	37	37
temperatura ar (°C)	60	60
Umidade entrada UR*	66	73
coluna UA*	16,1	16,2
Umidade ar saída UR*	92	86
coluna UA*	16,7	14,2

\*UR = umidade relativa em %; \*UA = umidade absoluta em g água/kg ar seco.

Obs.: temperatura de bulbo úmido do ar = 22°C.

gem do ar. Para que ocorra hidratação do ar é necessário que a temperatura do líquido seja igual ou superior à temperatura de bulbo úmido do ar que com ele entra em contato. Porém, em ambos os testes da Tabela 10, permanece a dúvida da influência da vazão do líquido na hidratação do ar. A repetição do teste, porém com líquido à temperatura de 32°C, apresentou os resultados da Tabela 11.

TABELA 11. - Influência da vazão de água a 32°C na hidratação do ar a 60°C, em coluna com 15 cm de altura da camada de enchimento.

		TESTE 1	TESTE 2
vazão água (l/h)		22	72
temperatura água (°C)		32	32
vazão ar (kg/h)		37	37
temperatura ar (°C)		60	60
Umidade ar entrada	UR*	66	66
coluna	UA*	16,8	16,8
Umidade ar saída	UR*	98	96
coluna	UA*	28,8	28,5

\*UR = Umidade Relativa em %; \*UA = Umidade Absoluta em g água/kg ar seco

Obs.: temperatura de bulbo úmido do ar de entrada da coluna = 22°C

Pode-se verificar que, para líquido em temperatura superior à de bulbo úmido do ar que com ele entra em contato, a vazão de água não influi na hidratação do ar, como se observa pelas umidades absolutas praticamente iguais do ar de saída da coluna em ambos os testes. Comparando os resultados das Tabelas 10 e 11, verifica-se que o ar de saída da coluna nos testes com líquido em temperatura superior, apresenta umidade mais elevada pela maior evaporação.

#### 4.2.2. Líquido quente e ar quente

##### 4.2.2.1. Coluna com 15 cm de altura da camada de enchimento

A influência da temperatura do líquido na vazão de água condensada, mantendo o ar em ciclo fechado e regenerando-o por condensação da umidade por refrigeração, está na Tabela 12.

TABELA 12. - Influência da temperatura do líquido na vazão de água evaporada, em coluna com 15 cm de altura da camada de enchimento

Temperatura ar °C	Temperatura água °C	Vazão condensado ml/h
60	30	720
60	40	985
60	50	1335

Verifica-se que a cada aumento de temperatura do líquido ocorre aumento da vazão de água condensada.

A observação da grande dependência da vazão de água evaporada, em relação à temperatura do líquido, juntamente com o custo da regeneração do ar por refrigeração (já descrito em 4.1.5.), levou à reconsideração do objetivo do presente estudo: concentrar suco à baixa temperatura mostra-se ineficiente devido à pequena vazão de água evaporada, como mostram os testes efetuados -

com água já descritos anteriormente. Porém, qualquer suco de fruta ou extrato de café, concentrado em temperatura superior a 50-60°C, facilmente sofre alterações de suas características, principalmente no que diz respeito aos aromas. Além disso, a concentração por secagem, para evitar a perda dos aromas arrastados pelo ar, exige uma etapa de regeneração do mesmo por refrigeração, o que torna o processo bastante dispendioso. Por outro lado, essas restrições tornam-se desnecessárias quando o produto concentrado não se destina a seres humanos, e no qual, as características aromáticas não são muito importantes, como é o caso de produtos que se destinam a rações animais, sendo o vinhoto concentrado um exemplo. Não havendo necessidade da preservação dos aromas, o ciclo do ar é aberto e a regeneração do mesmo torna-se desnecessária. Ar ambiente é utilizado para a secagem, entrando em contato com o líquido, sendo novamente jogado no ambiente.

O comportamento do vinhoto durante sua concentração, está na Tabela 13, em comparação a um teste realizado com água nas mesmas condições. O ciclo do ar é aberto e a quantidade de água evaporada é determinada pela diferença do nível de líquido na coluna.

No teste com vinhoto, foi necessário variar a vazão de alimentação do produto conforme o aumento da concentração do mesmo, devido à formação de espuma, dificultando a circulação do líquido através da bomba e sobre as espirais do enchimento. A

TABELA 13. - Concentração de vinhoto 10°Brix a 40°C por secagem com ar a 80°C em coluna com 15 cm de altura da camada de enchimento.

V I N H O T O			Á G U A	
TEMPO	CONCENTRAÇÃO	ÁGUA EVAPORADA	TEMPO	ÁGUA EVAPORADA
horas	°Brix	ml/h	horas	ml/h
1	10	-	1	770
2	11	1280		
3	12,6			
4	14,5	780		
5	16	680		
6	20,6	1070		
7	24,6	-		
8	12,4	560		
9	14	940		
água evaporada média = 758,6 ml/h				

espuma é bastante estável e persistente ao redor de 25°Brix, mesmo com a adição de até 40 ppm de anti-espumante no produto diluído, tornando impossível a determinação do volume de água evaporada por leitura do nível de líquido na coluna. Observa-se uma grande variação na vazão horária de água evaporada, porém, o valor médio obtido é bastante próximo daquele obtido na teste com água (770 ml/h), sugerindo que, pelo menos até 25°Brix, o vinhoto se comporta como a água durante a evaporação. Porém, a baixa vazão de água evaporada obtida (770 ml/h) provavelmente é devida à má distribuição do vinhoto, e também da água sobre as espirais de vidro do enchimento da coluna, por

ser a camada muito espessa e haver um jato único de alimentação sobre a mesma.

#### 4.2.2.2. Coluna com 7,5 cm de altura da camada de enchimento

Diminuindo-se a altura da camada de enchimento e adaptando-se sobre a mesma um disco sobre o qual cai o jato de alimentação do líquido a concentrar, melhora-se a distribuição do líquido na camada de enchimento por divisão do jato, como mostra a Figura 6. Dessa forma se obtém aumento da vazão de ar no circuito e melhor contato entre ar e água, aumentando a vazão de água evaporada.

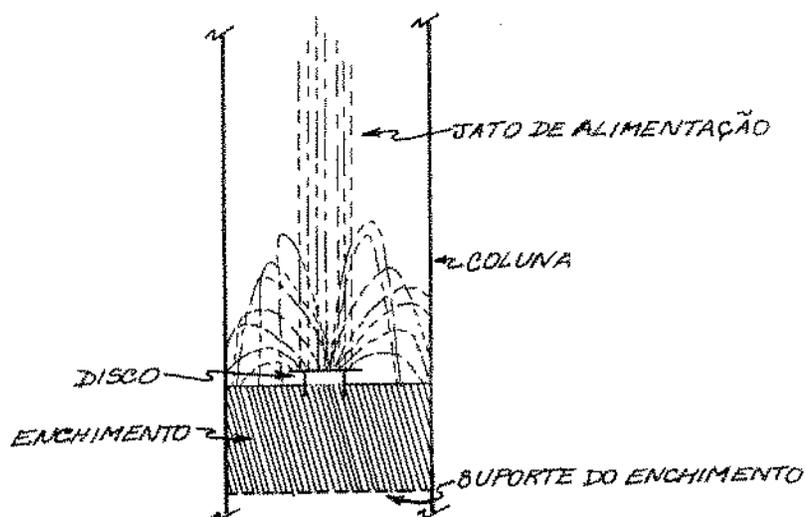


FIGURA 6. - Disco para sub-divisão do jato de alimentação de líquido.

A influência da temperatura do ar na vazão de água condensada, está na Tabela 14, onde o líquido é mantido à temperatura cons

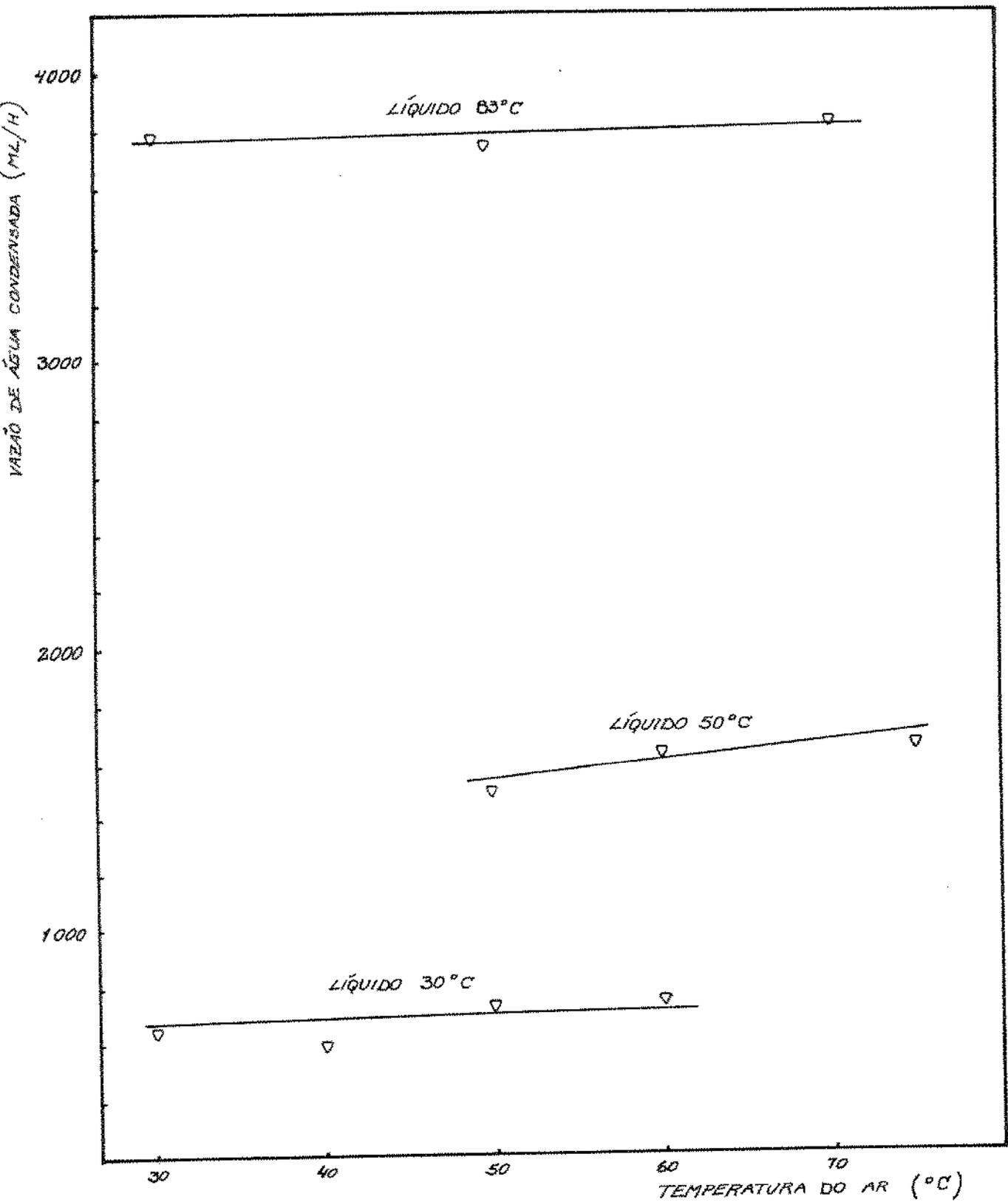


GRÁFICO IV. - Influência da temperatura do ar na vazão de água condensada.

tante e é variada a temperatura do ar. O Gráfico IV, correspondente a esses dados, mostra que para todas as temperaturas de líquido, o aumento da temperatura do ar praticamente não afeta a vazão de condensado, não havendo necessidade da temperatura do ar ser superior à do líquido. Vazões de condensado obtidas em teste onde líquido e ar são mantidos à mesma temperatura, - estão na Tabela 15.

TABELA 14. - Influência da temperatura do ar na vazão de água condensada na secagem em coluna com 7,5 cm de altura da camada de enchimento.

$T^{\circ}$ água	$T^{\circ}$ ar	Vazão condensado
$^{\circ}$ C	$^{\circ}$ C	ml/h
30	30	650
	40	600
	50	720
	60	690
50	50	1490
	60	1630
	75	1640
83	30	3780
	50	3740
	70	3820

TABELA 15. - Vazão de água evaporada mantendo ar e líquido à mesma temperatura na secagem em coluna com 7,5 cm de altura da camada de enchimento.

Temperatura do ar	Temperatura água	Vazão condensado
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	ml/h
30	30	655
40	40	1000
50	50	1490
60	60	1910

Observa-se um aumento gradual da vazão de condensado com o aumento das temperaturas do líquido e ar, sugerindo a maior importância da temperatura do líquido na vazão de condensado, já que a temperatura do ar não influencia de maneira significativa.

A influência da temperatura do líquido na vazão de condensado, encontra-se na Tabela 16 e Gráfico V.

Observa-se que, quanto maior a temperatura do líquido, maior é a vazão de condensado, sendo que essa varia muito pouco com o aumento da temperatura do ar. Voltando à Tabela 14, observa-se que, mesmo para líquidos em temperatura elevada, no caso, -  $83^{\circ}\text{C}$ , o uso de ar em temperaturas bem inferiores à do líquido durante a evaporação não prejudica a vazão de condensado. Assim, com o líquido em temperatura o mais elevada possível, sem que o mesmo entre em ebulição, obtém-se as mais elevadas vazões

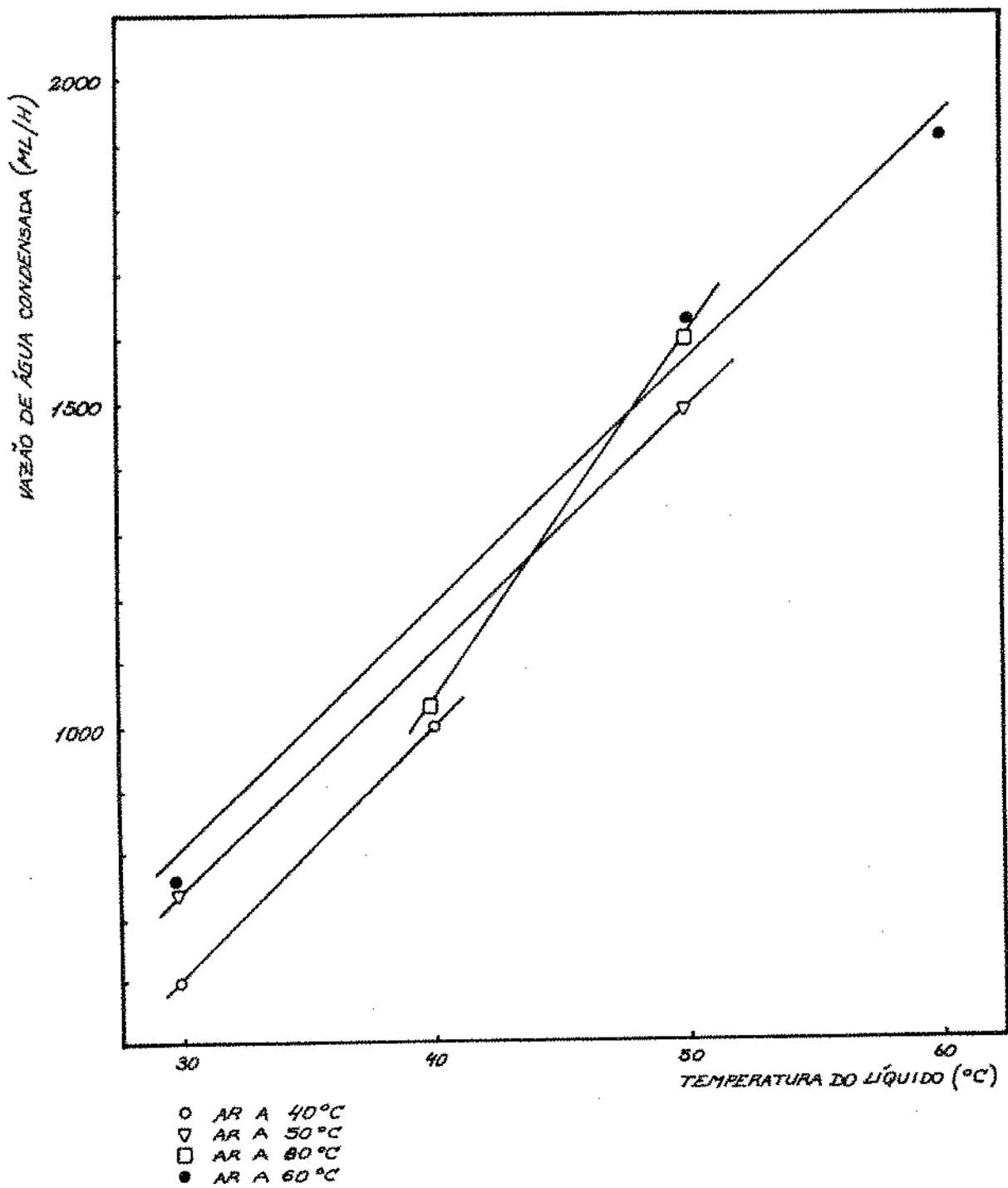


GRÁFICO V. - Influência da temperatura do líquido na vazão de água condensada.

TABELA 16. - Influência da temperatura do líquido na vazão de condensado, na secagem em coluna com 7,5 cm de altura da camada de enchimento.

Temperatura do ar °C	Temperatura água °C	Vazão condensado ml/h
40	30	600
	40	1000
50	30	720
	50	1490
60	30	740
	50	1630
	60	1910
80	40	1030
	50	1600

de água evaporada, mesmo com uso de ar à temperatura ambiente.

Porém, por as Tabelas 14, 15 e 16 se tratarem de testes efetuados com água, foi necessário determinar a influência do aumento da concentração de um produto na vazão de condensado durante a secagem. A concentração de solução de sacarose 20°Brix - em temperatura de 50°C com ar a 80°C, apresentou os resultados da Tabela 17, onde se observa que, até uma concentração próxima de 25°Brix, o produto comporta-se como a água, resultando - em uma vazão de condensado bem próxima àquela obtida em teste semelhante com água e apresentado na Tabela 16 (80°C). Após a

concentração de 25°Brix, a vazão de condensado decresce com o aumento da concentração, efeito semelhante ao que ocorre em qualquer outro processo convencional de concentração.

TABELA 17. - Concentração de solução de sacarose 20°Brix a 50° C por secagem com ar a 80°C, em coluna com 7,5 cm de altura da camada de enchimento.

Tempo horas	Concentração °Brix	V.condensado ml/h	Tempo horas	Concentração °Brix	V.condensado ml/h
0	20	-	0	32,1	-
1	24,2	1555	1	38,9	1300
2	32,3	1500	2	48,5	1375
3	46,5	1415	3	67	1125

#### 4.2.2.3. Líquido quente e ar frio

As espirais do enchimento da coluna, sobre as quais ocorre o contato do líquido com o ar durante a secagem, oferecem resistência à passagem do ar através da coluna. Obtém-se maior vazão de ar quando o enchimento é retirado da coluna e o contato entre líquido e ar é feito na forma "spray" de líquido através do qual passa o ar. Testes realizados com esse sistema, verificando a influência de elevadas temperaturas do líquido na vazão de água evaporada, utilizando ar à temperatura ambiente em ciclo aberto, mostraram os resultados apresentados na Tabela - 18.

TABELA 18. - Influência de elevadas temperaturas de líquido na vazão de água evaporada, utilizando "spray" de líquido numa corrente de ar à temperatura ambiente.

Temperatura ar °C	Temperatura água °C	Vazão água evaporada ml/h
28	80	5200
28	90	6840

O teste indica que há aumento de evaporação com o aumento da temperatura do líquido, tal como ocorre na coluna com enchimento. Porém, a evaporação com líquido na forma de "spray" é muito superior àquela obtida em condições semelhantes de temperatura de ar e líquido em coluna com enchimento, como mostra a Tabela 14 (83°C).

Com os dados acima e outros já descritos anteriormente, foram construídos a Tabela 19 e o Gráfico VI, onde se mostra a variação da evaporação em relação ao tipo de contato entre líquido e ar, e a respectiva vazão de ar no sistema.

Verifica-se que, quanto menor a camada de enchimento e, conseqüentemente, maior a vazão de ar, maior é a evaporação, atingindo os valores mais elevados quando é utilizado um "spray" - de líquido na secagem.

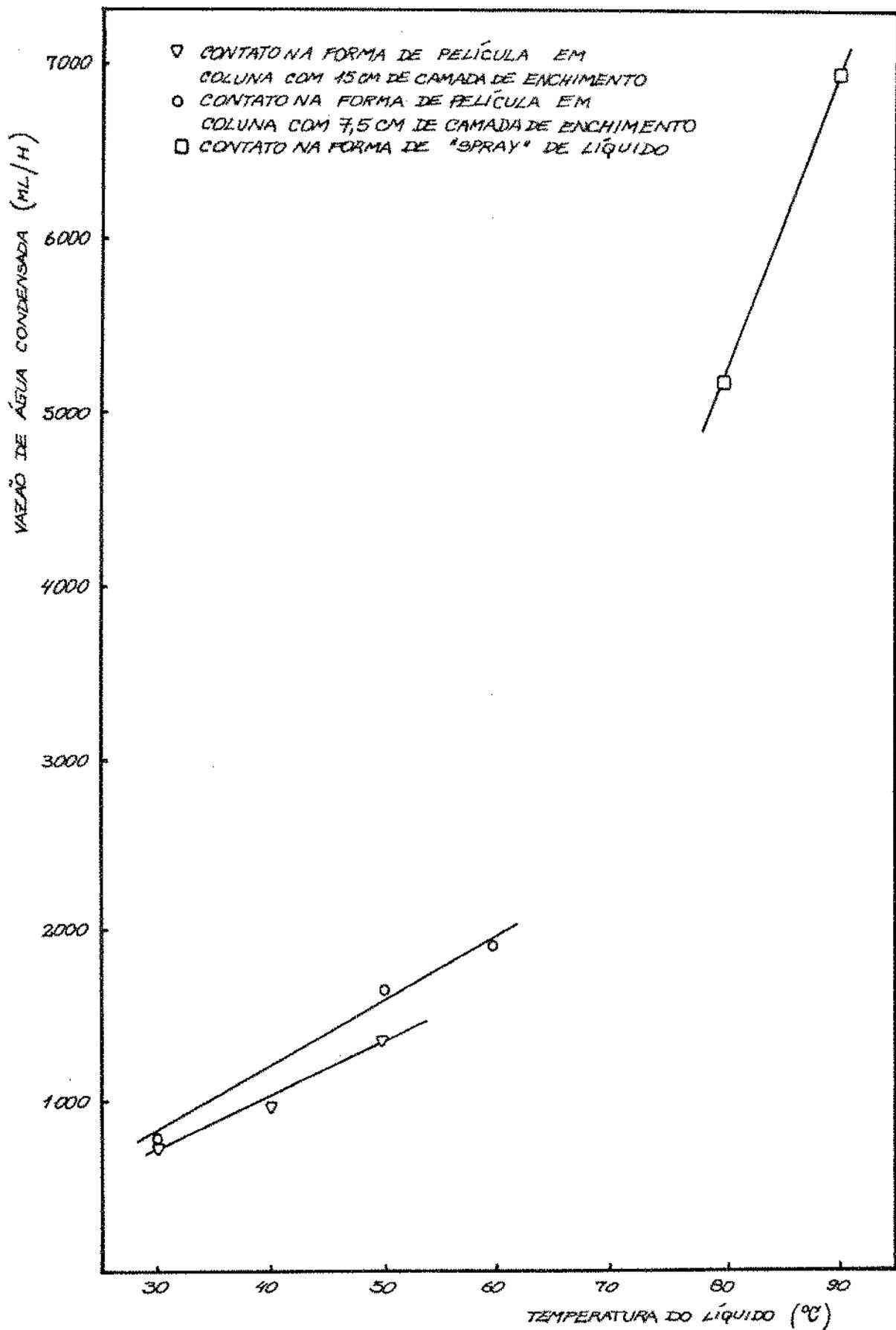


GRÁFICO VI. - Influência da altura da camada de enchimento e do tipo de contato entre líquido e ar na vazão de água evaporada.

TABELA 19. - Influência da altura da camada de enchimento e do tipo de contato entre líquido e ar na vazão de água evaporada durante a secagem.

Tipo de contato	T <sup>o</sup> ar	T <sup>o</sup> água	vazão água evaporada	Vazão ar
	°C	°C	ml/h	kg/h
película (15 cm enchimento)	60	30	720	
		40	985	43
		50	1335	
película (7,5 cm enchimento)	60	30	740	
		50	1630	45
		60	1910	
"spray"	28	80	5200	
		90	6840	50

Na concentração de vinhoto 3,9<sup>o</sup>Brix no sistema de "spray", utilizando vinhoto à temperatura constante de 90<sup>o</sup>C e ar ambiente em temperatura de cerca de 28<sup>o</sup>C, obtiveram-se os dados apresentados na Tabela 20. Após cada meia-hora era determinada a concentração do produto e adicionada uma quantidade conhecida de vinhoto. A quantidade de água evaporada foi determinada pela diferença de concentração em cada meia-hora.

Verifica-se decréscimo da vazão horária de água evaporada com o aumento da concentração, apesar da vazão em cada meia-hora - variar. O decréscimo da vazão de água evaporada deve-se ao au

TABELA 20. - Concentração de vinhoto 3,9<sup>o</sup>Brix a 90<sup>o</sup>C com ar ambiente, por secagem em coluna com "spray".

Tempo de concentração	Concentração	Vinhoto adicionado	Água evaporada	
horas	<sup>o</sup> Brix	kg	kg	kg/h
0	3,9	10	-	
1	8,4	3	5,35	5,35
1,5	11,3	3	3,15	
2	14,4	3	3,15	6,30
2,5	15,7	3	2,61	
3	19,5	3	3,31	5,92
3,5	21,5	3	2,82	
4	23,4	3	2,91	5,73
4,5	24,8	3	2,79	
5	25,5	3	2,67	5,46
5,5	26,4	-	2,73	
6	52,3	-	2,70	5,43

mento na viscosidade do produto, dificultando a transferência da umidade do produto ao ar circulante. Também nesse teste de concentração de vinhoto foi observada a formação de espuma consistente ao redor de 25<sup>o</sup>Brix, que tende porém a desaparecer com o aumento da concentração do produto. Apesar de ser alcançada uma concentração bem elevada, não foi observada nenhuma formação de depósito, incrustação ou cristalização de sais minerais durante a concentração.

Considerando-se todo o vinhoto adicionado como um total inicial, no qual não será adicionada nenhuma quantidade durante a concentração e, determinando-se com o auxílio da quantidade de água evaporada, a concentração atingida pelo vinhoto após cada meia-hora, obtém-se o Gráfico VII, onde se verifica o aumento-exponencial da concentração com o aumento do tempo de evaporação.

Na Tabela 21, encontra-se a composição do vinhoto concentrado. A sacarose foi praticamente toda consumida durante a fermentação, pois no produto concentrado os açúcares totais invertidos pouco diferem dos açúcares redutores. Ravnö (1979) apresenta a análise do vinhoto "in natura" de diferentes origens: de melão e de caldo de cana. Comparando-se o teor de sólidos totais de ambos vinhotos "in natura" com aquele apresentado pelo vinhoto concentrado, determina-se o fator de conversão das concentrações, podendo-se converter os valores da análise do vinhoto concentrado em valores de vinhoto "in natura", o que possibilita a comparação entre as análises, como mostra a Tabela-22. Sendo o potássio o mineral em maior proporção presente no vinhoto, representando cerca de 30-50% do total da matéria mineral nele presente (conforme Kujala (1976)), efetuou-se a comparação das análises com base nesse componente. Verifica-se, assim, que o vinhoto teste, ou seja, o vinhoto concentrado, aproxima-se mais da composição do vinhoto originário do melão.

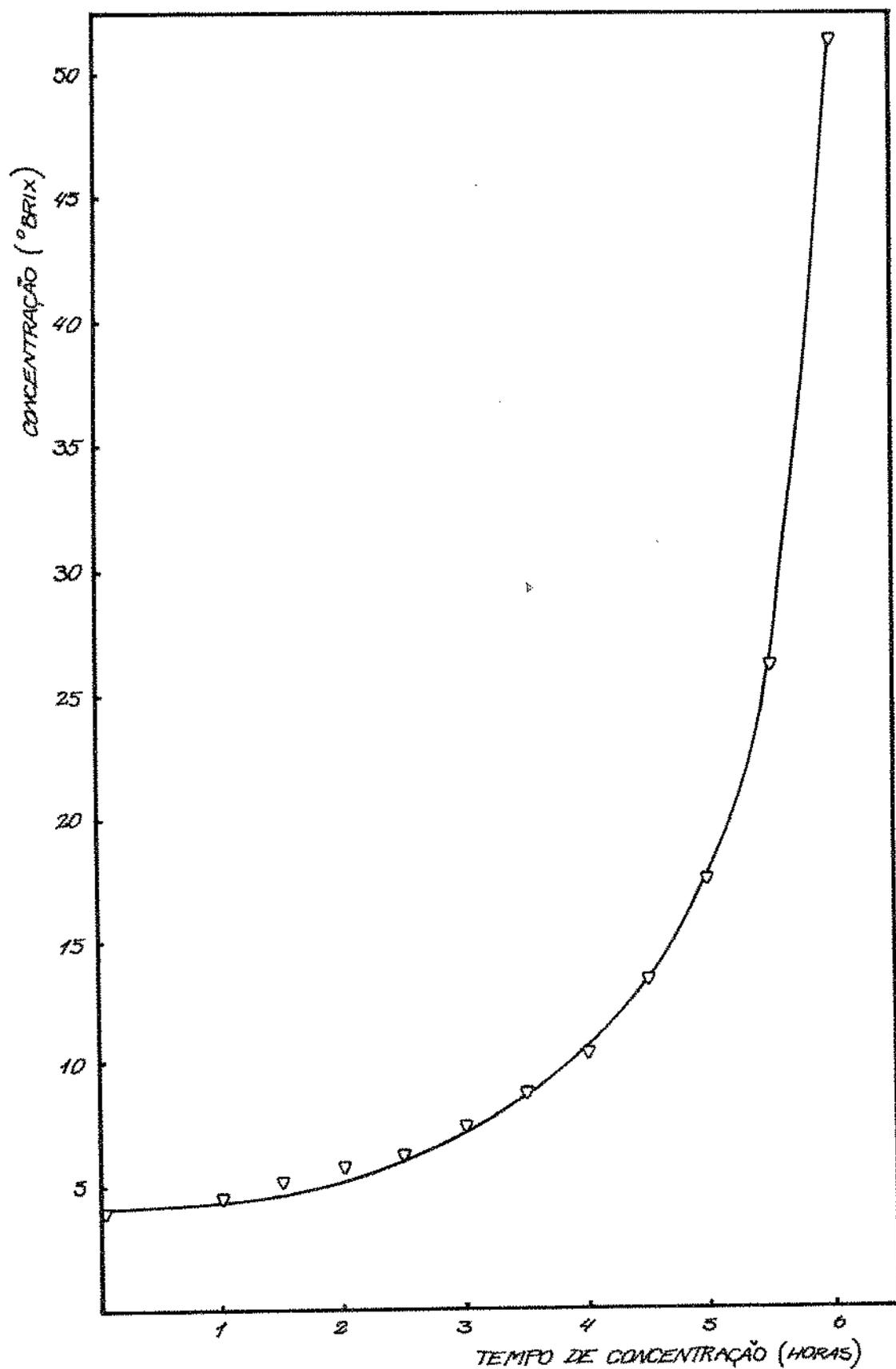


GRÁFICO VII. - Concentração de vinhoto 3,9°Brix a 90°C com ar ambiente por secagem em coluna com "spray".

TABELA 21. Análise do vinhoto concentrado por secagem

I T E M	UNIDADE	VALOR
Concentração	°Brix	53,40
Sólidos totais	%	46,70
Matéria orgânica	%	39,15
Açúcares totais (invertidos)	%	26,20
Açúcares redutores	%	25,40
Nitrogênio	%	0,137
Proteína	%	0,86
Glicerol	%	6,90
Acidez volátil	% ác. acético	0,24
Acidez total titulável	ml NaOH 1N/100 g	36,50
Cinzas sulfatadas	%	7,55
Fósforo	% P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,16
Potássio	% K <sub>2</sub> O	3,73
pH		4,35

TABELA 22. - Comparação da composição de vinhotos "in natura" citados por Ravnö (1979), com a composição do vinhoto concentrado por secagem.

O R I G E M	M E L A Ç O		CALDO-DE CANA	
	literatura	teste*	literatura	teste*
Sólidos totais (%)	6,47	6,47	5,14	5,14
Matéria mineral (%)	1,95	1,05	1,50	0,83
Nitrogênio (%)	0,04	0,019	0,01	0,015
Cálcio (%)	0,07	-	0,04	-
Magnésio (%)	0,02	-	0,01	-
Fósforo (% $P_2O_5$ )	0,01	0,022	0,007	0,017
Potássio (% $K_2O$ )	0,48	0,51	0,17	0,41

\*Fator de conversão de vinhoto concentrado em vinhoto "in natura":

originário do melaço:

$$f_c = \frac{6,47}{46,7} = 0,138$$

originário de caldo-de-cana:

$$f_c = \frac{5,14}{46,7} = 0,11$$

#### 4.3. Custo da secagem do vinhoto

Na Figura 5, observa-se que, para a concentração do vinhoto, - são necessários: um ventilador centrífugo, uma bomba centrífuga e um gerador-intercambiador-de-calor, todos utilizando energia elétrica para a realização do trabalho. O gerador-intercambiador faz uso de três resistências elétricas de 6000W cada, -

operando a 220 V trifásico, controladas por termostato, ligando e desligando, conforme a necessidade de calor. Já a bomba e o ventilador operam em tempo contínuo. Estando, porém, super-dimensionados para o teste em questão, o ventilador opera com apenas 10% de sua capacidade máxima, e a bomba centrífuga, com 1% de sua capacidade máxima. O gasto do sistema está na Tabela 23.

TABELA 23. - Custo total operacional do sistema de concentração de vinhoto por secagem com ar.

	P O T Ê N C I A		Tempo ligado		Energia kWh	Custo*1 Cr\$	Custo*2 Cr\$
	hp	kW	%	h			
ventilador	$0,74 \times 10\% = 0,074$	0,055	100	6	0,33	0,264	1,55
bomba	$0,75 \times 1\% = 0,007$	0,005	100	6	0,03	0,024	0,105
gerador-in tercambiador	-	$9,71 \times 3$	35,8	2,15	20,87	16,69	73,04
T O T A L					21,23	16,97	74,69

\*1 = kWh industrial (alta tensão) = Cr\$ 0,80

\*2 = kWh industrial (baixa tensão) = Cr\$ 3,50

\*3 = kW =  $\sqrt{3}$  x voltagem x amperagem x cos  $\theta$  onde cos  $\theta$  = 0,85

Sendo o total de água evaporada igual a 34,24 kg, o custo do kg de água evaporada é:

$$\frac{\text{Cr\$ } 16,97}{34,24 \text{ kg água evap.}} = \text{Cr\$ } 0,49/\text{kg em alta tensão}$$

$$\frac{\text{Cr\$ } 74,69}{34,24 \text{ kg água evap.}} = \text{Cr\$ } 2,18/\text{kg em baixa tensão}$$

O calor necessário para evaporar a água é:

$$\frac{21,23 \text{ kWh} \times 860 \text{ kcal/kWh}}{34,24 \text{ kg água}} = 533,2 \text{ kcal/kg água evaporada}$$

O calor gasto, expresso em kg de vapor é:

$$\frac{533,2 \text{ kcal/kg água evap.}}{540 \text{ kcal/kg vapor}} = 0,987 \text{ kg vapor/kg água evap.}$$

correspondendo, aproximadamente, ao gasto de um evaporador de simples efeito, cujo consumo de calorías encontra-se em torno de 1,1 kg vapor por kg de água evaporada.

Verifica-se que a maior parte da energia elétrica é consumida no aquecimento do produto e que a bomba centrífuga e o ventilador participam com apenas 2% no custo de operação dessa concentração. Sendo a eletricidade uma energia bastante cara, sua substituição por outra energia mais barata para aquecimento, aumenta a economicidade da operação. Tratando-se a concentração do vinhoto por secagem de uma operação a ser desenvolvida junto a uma destilaria de álcool, o combustível mais barato para aquecimento que tal tipo de indústria dispõe, é o bagaço residual da cana que foi empregada na fabricação do álcool. O bagaço, nas indústrias de álcool, é normalmente utilizado como combustível das caldeiras geradoras de vapor, geralmente sem

sofrer qualquer tipo de pré-tratamento como secagem. A cana-de-açúcar, após a passagem na moenda, produz um bagaço com cerca de 48% de umidade a uma proporção de 270 kg/ton de cana moída. Hugot (1972), apresenta o poder calorífico de diversos constituintes do bagaço úmido:

CONSTITUINTE	PODER CALORÍFICO
fibra	4.600 kcal/kg
açúcar	3.955 kcal/kg
impurezas	4.100 kcal/kg

onde as impurezas e o açúcar perfazem cerca de 2-4% do bagaço úmido. O poder calorífico total do bagaço úmido, porém, depende da proporção entre cada constituinte. Assim, o bagaço completamente seco, produz 4.250 kcal/kg de calor. Já o bagaço úmido, devido à maior proporção em umidade e, conseqüentemente, menor proporção nos componentes caloríficos, além de ainda necessitar parte do calor para vaporizar a umidade nele presente, apresenta poder calorífico bem menor: cerca de 1.900 kcal/kg de bagaço com 48% de umidade. Porém, apenas uma parte desse conteúdo calorífico é transformado em vapor quando o mesmo é queimado nas caldeiras, pois cerca de 290 kcal/kg de bagaço queimado são perdidas pela chaminé na forma de gases quentes. O gerador-intercambiador-de-calor à base de energia elétrica utilizado na concentração do vinhoto como descrito anteriormente, pode substituir as resistências elétricas por queima de bagaço como forma de obtenção de calor. Neste caso, o gera-

gerador-intercambiador é constituído por uma câmara, contendo internamente dois feixes de tubos, como descrito por Moretti (1980), um deles mergulhado em água e por onde passam os gases quentes provenientes da queima do bagaço. Dessa forma, a água se aquece, entra em ebulição, e o vapor gerado aquece o segundo feixe de tubos, por onde circula internamente o vinhoto. Como é um sistema hermeticamente fechado, não há perda de calor, e toda a energia é aproveitada. O vinhoto, após aquecimento, é borrifado na coluna de secagem, onde, entrando em contato com o ar circulante, perde umidade e é concentrado.

Assim, pela queima do bagaço residual da fabricação do álcool, é possível concentrar o vinhoto de forma econômica, já que o bagaço é um resíduo ao qual não está agregado nenhum valor comercial. A quantidade de água evaporada pelo uso do gerador-intercambiador utilizando queima de bagaço é:

$$\frac{\text{calor bagaço disponível p/vapor}}{\text{calor latente vaporização água}} = \frac{1600 \text{ kcal/kg bagaço úmido}}{533,2 \text{ kcal/kg água}} =$$

$$= 3,0 \text{ kg água evaporada/kg bagaço úmido}$$

Conforme dito acima, são perdidos 290 kcal/kg na forma de gases quentes na chaminé das caldeiras, o que também inclui o gerador-intercambiador. Conduzindo os gases quentes até a coluna de secagem, e fazendo-os entrar em contato com o vinhoto para evaporar umidade, é possível retirar 0,5 kg água/kg bagaço-úmido adicional àqueles obtidos com o uso do gerador-intercam-



biador. Como os gases quentes das chaminés saem em temperatura geralmente não inferior a  $200^{\circ}\text{C}$ , é possível aumentar o volume de gases quentes disponíveis para secagem, misturando os gases das chaminés com determinada proporção de ar ambiente, de forma que a mistura atinja cerca de  $100^{\circ}\text{C}$ . O esquema de um equipamento para concentrar vinhoto utilizando um gerador-intercambiador-de-calor junto a uma coluna de secagem com re-aproveitamento dos gases quentes da chaminé da caldeira e do gerador-intercambiador é mostrado na Figura 7.

O uso do gerador-intercambiador-de-calor utilizando bagaço de cana como combustível, tem como vantagens:

- a) por ser hermeticamente fechado e termicamente isolado, não há perda de calor, pois todo o vapor produzido em seu interior é utilizado no aquecimento do produto;
- b) utilizada sempre a mesma água na geração de vapor, não necessita de tratamento e reposição de água;
- c) uma vez que a água em seu interior estiver aquecida, todo o calor consumido é transmitido ao produto que circula em seu interior, havendo pouco consumo de calor para pré-aquecimento da água na geração do vapor;
- d) trabalha a baixa pressão, exigindo paredes menos espessas - do que geradores de vapor comuns, o que torna o equipamento mais barato.

O uso de uma coluna de secagem na concentração do vinhoto, com

re-aproveitamento dos gases quentes da chaminé da caldeira e do gerador-intercambiador, apresenta as seguintes vantagens:

- a) menor espessura das paredes do equipamento de evaporação, - pois trabalha à pressão ambiente, o que torna o equipamento mais barato em comparação com evaporadores convencionais;
- b) não existe superfície de troca de calor no interior do evaporador, não havendo assim o perigo de formação de incrustações;
- c) não necessita condensadores, já que os gases e o vapor são enviados à atmosfera;
- d) torna a operação de concentração bastante econômica já que utiliza como combustível apenas resíduos da indústria de álcool.

6. - BIBLIOGRAFIA

01. A.O.A.C. Official Methods of Analysis, 11th ed. Association of Official Analytical Chemists. 1970.
02. BITTENCOURT, V.C. et al. Composição da Vinhaça. Bras. Açuc. 48, 95(4):25-36, 1980.
03. CAHMI, J.D. Tratamento do Vinhoto, Sub-produto da Destilação do Álcool. Bras.Açuc. 47, 94(1):18-23, 1979.
04. CAMPOS, M.P. A Situação de Campos em Relação ao Vinhoto. Bras.Açuc. 42, 93(6):40-42, 1979.
05. CESAR, M.A.A. et al. Aumento do Nível de Amido e Potássio no Caldo de Cana, Decorrente da Aplicação Sistemática de Vinhaça ao Solo. Bras. Açuc. 46, 91(1):24-29, 1978.
06. CHENU, P. Concentração de Vinhaça. Anais do IV Sem. Copersucar Agroind. Açuc., 1976.
07. COPERSUCAR. Aproveitamento da Vinhaça: Viabilidade Técnico-Econômica, 2<sup>a</sup> ed., 1979.
08. COPERSUCAR. Combate à Poluição: Avaliação do Programa Copersucar, 2<sup>a</sup> ed., 1980.
09. DIRKSMOELLER, H. Ger. Offen. 2,534,902, 1977.

10. HOUGEN, O.A., WATSON, K.M. & RAGATZ, R.A. Chemical Process Principles, 2nd. ed. part I, chap. 5. Wiley & Sons, Inc., USA. 1967.
11. HUGOT, E. Handbook of Cane Sugar Engineering, 2nd ed., chap. 42. Elsevier, 1972.
12. JACKMAN, E.A. Distillery Effluent Treatments in the Brazilian National Alcohol Programme. Chem. Eng., 3:239-242, 1977.
13. KING, C.J. Novel Dehydration Techniques. in Spicer, A. Advances in Pre-Concentration and Dehydration of Foods. Hasted Press Book, USA. 1974.
14. KIRK, R.E. & OTHMER, D.F. Encyclopedia of Chemical Technology, vol. 5. The Intersc. Encyc., Inc. USA. 1950.
15. KUJALA, P. Distillery Fuel Savings by Efficient Molasses Processing and Stillage Utilization. Sugar Az., 74(10):13-16, 1979.
16. KUJALA, P. et al. Alcohol from Molasses as Possible Fuel. Sugar Az., 71(3):28-39, 1976.
17. LEWICKI, W. Introduction into Technology, Application and Commercialization of Evaporated Vinasses from the Cane and Beet Molasses Fermentation Industry. La Suc. Belge, 96(11):421-424, 1977.

18. MANNHEIM, C.H. & PASSY, N. Non-Membrane Concentration. in Spicer. A. Advances in Preconcentration and Dehydration of Foods. Halsted Press Book, USA. 1974.
19. MASTERS, K. Spray Drying. Chap. 8. Int. Text Book Co. Ltd, GB, 1972.
20. MONTEIRO, C.E. Brazilian Experience with the Disposal of Waste Water from the Cane Sugar and Alcohol Industry. Proc. Bioch. (11):33-41, 1975.
21. MORETTI, R.H. Aproveitamento do Vinhoto na Forma Concentrada das Usinas Autônomas e Anexas, Utilizando Bagaço de Cana como Única Fonte de Calor. Simp. sobre Álcool, desde a Plantação da Cana-de-Açúcar até o Consumo do Álcool. Junho 1980. (no prelo).
22. NEUBAUER, L.W. & WALKER, H.B. Farm Building Design. Prentice-Hall, Inc., USA. 1961.
23. PERRY, J.H. Chemical Engineer's Handbook. 3rd ed. Mc-Graw Hill Book Co., USA. 1950.
24. PERRY, J.H. Chemical Engineer's Handbook. 5th ed. McGraw Hill Book Co., USA. 1973.
25. POPPER, H. Modern Cost Engineering Techniques. chap. 3. McGraw-Hill Book Co., USA. 1970.

26. POWEL, R.W. & GRIFFITHS, E. The Evaporation of Water from Plane and Cylindrical Surfaces. Trans. Chem. Eng., 13:175-178, 1935.
27. PUJOL, M.P. Ion, 11:202-205, 1951.
28. SCHUELLER, K.H. Ger. Offen. 2,553,464, 1977.
29. SOURIRAJAN, S. Reverse Osmosis. Academic Press. 1970.
30. THIJSSSEN, H.A.C. Fundamentals of Concentration Processes. in Spicer. A. Advances in Preconcentration and Dehydration of Foods. Halsted Press Book, USA. 1974.
31. THIJSSSEN, H.A.C. Freeze-Concentration of Foods. in Spicer. A. Advances in Preconcentration and Dehydration of Foods. Halsted Press Book, USA. 1974.
32. THIJSSSEN, H.A.C. Concentration Processes for Liquid Foods Containing Volatile Flavours and Aromas. J. Food Techn., 5:211-229, 1970.
33. VAN ARSDEL, W.B. Drying Phenomena. in van Arsdel, Copley & Morgan. Food Dehydration. Avi Publ. Co., USA. 1973.
34. ZEISS, C. Photometric Analysis, Medicine.