

LAN1458 – Açúcar e Álcool

## Concentração do Caldo de cana

Evaporação e cozimento

### CONCENTRAÇÃO DO CALDO

caldo misto decantado - solução diluída (13 a 15°Brix)  
 – massa cozida (solução super concentrada - 90 - 95°Brix)

Remover água - 2 fases -

- evaporação - sistema de múltiplos efeitos (xarope 55-65°Brix)
- cozimento - sistema de simples efeito

Evaporação contínuo

- Pré-evaporação - caldeira - vapor vegetal
- Evaporação p.p.d.

cozimento

- em batelada ou intermitente
- contínuo

temperatura caldo decantado → mais próxima da temperatura da caixa.

Prof Sandra H Cruz - 2017 2

### CONCENTRAÇÃO DO CALDO

Justificativas:

- a) maior consumo de vapor;
- b) difícil manuseio da massa cozida;
- c) necessidade de maior número de equipamentos;
- d) necessidade de maior número de operações.

Prof Sandra H Cruz - 2017

3

### 1. EVAPORAÇÃO

#### FUNDAMENTOS DA EVAPORAÇÃO

- 1ª fase - **Pré-evaporação** - 13 a 15°Brix → 20 - 25°Brix -  
 condição operação { temperatura — 115 -120°C  
 pressão — 0,69 - 0,99 Kg/cm²
- 2ª fase - **Evaporação** - 20 a 25°Brix → 55-65°Brix  
 temperaturas — 107° < 55°C  
 pressão mono. — 0,37 Kg/cm² < 64 cmHg

Prof Sandra H Cruz - 2017

4

## EVAPORAÇÃO

### Fatores limitantes - concentração pela evaporação

#### a) xarope diluído

- maior consumo de vapor no cozimento;
- maior tempo de cozimento;
- necessidade de maior número de equipamentos;
- escurecimento da massa cozida e,
- maior cor do açúcar.

#### b) xarope muito concentrado

- maior dificuldade na produção do pé de cozimento;
- dificulta a condução do cozimento;
- dificulta o controle de crescimento dos cristais;
- facilita a formação de falsos cristais.

Prof Sandra H Cruz - 2017

5

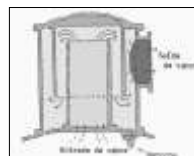
### CONSTRUÇÃO DE UM MÚLTIPLO-EFEITO

Facilidade de construção  
- corpos do sistema  
(forma, altura, capacidade)

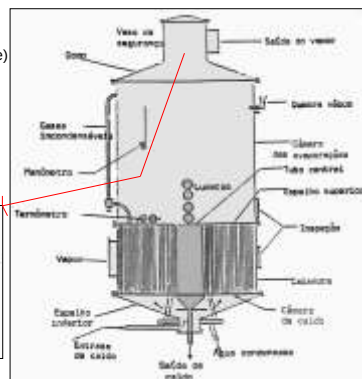
Aparelho

4 partes

- Fundo
- calandria
- corpo cilíndrico
- cabeça



Detalhe da cabeça



[http://sh-beyond.en.alibaba.com/product/725484105-215880855/automatic\\_multi\\_effect\\_forced\\_circulation\\_evaporator.html](http://sh-beyond.en.alibaba.com/product/725484105-215880855/automatic_multi_effect_forced_circulation_evaporator.html)

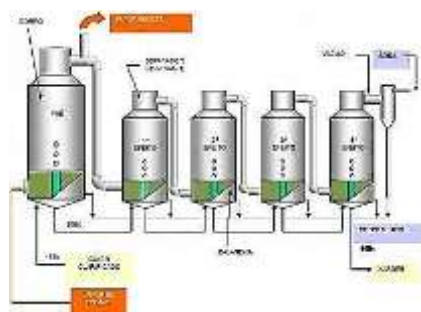
Prof Sandra H Cruz - 2017 7

### EVAPORAÇÃO EM MÚLTIPLO-EFEITO



Prof Sandra H Cruz - 2017

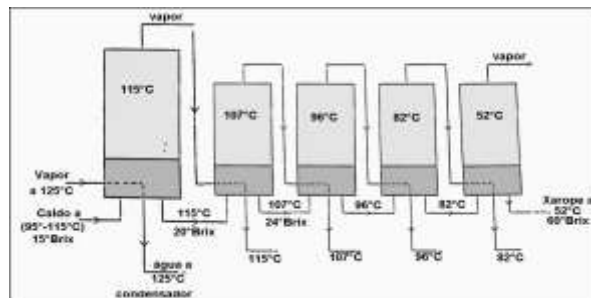
8



<http://pimartins.weebly.com/evaporaccedilatideo.html>

Prof Sandra H Cruz - 2017 9

## EVAPORAÇÃO EM MÚLTIPLO-EFEITO



Prof Sandra H Cruz - 2017

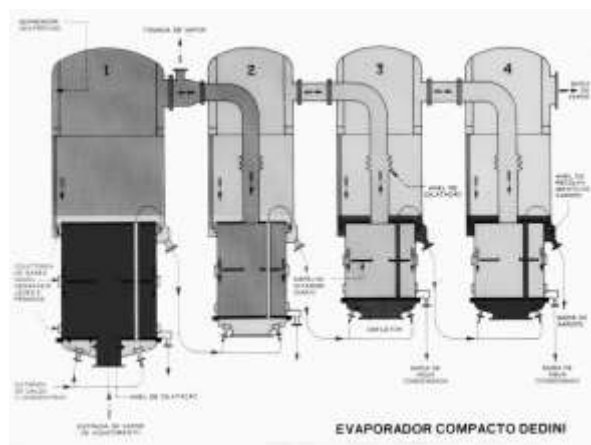
10

## TIPOS ESPECIAIS DE EVAPORADORES

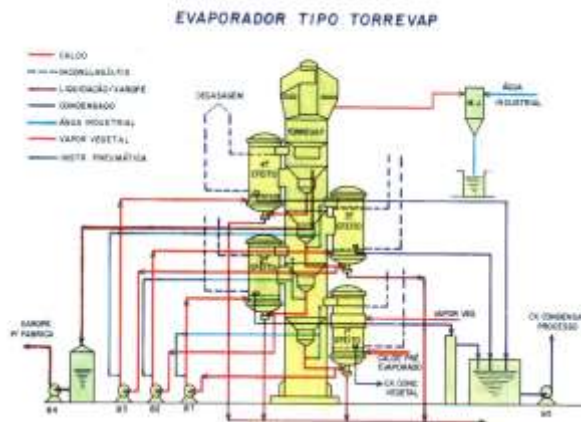
- ✓ Evaporador tipo Robert
- ✓ Evaporador de calandria flutuante com recirculação
- ✓ Evaporador Kestner
- ✓ Evaporador Compacto
- ✓ Evaporador de película fina descendente
- ✓ Evaporador típico torre

Prof Sandra H Cruz - 2017

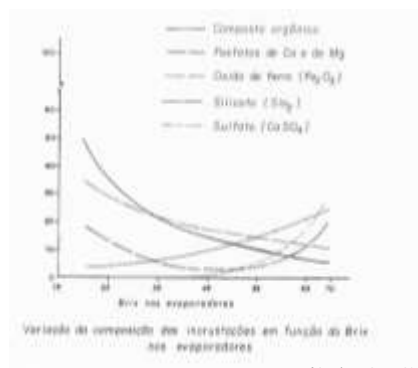
11



EVAPORADOR COMPACTO DEDINI



### Incrustações nos evaporadores



Prof Sandra H Cruz - 2017

14

### Processos de Limpeza

#### (a) Mecânico:

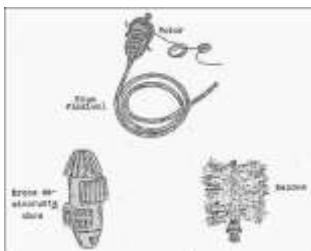
→ tipos: rasquete e chicote flexível

#### (b) Químico:

→ produtos: NaOH e HCl de 1 a 2% (2 a 5h)

#### (c) Biológico:

→ Solução diluída de melaço de 15 a 20° Bx até cobrir o espelho (fermentação - 15 a 20 dias)



Prof Sandra H Cruz - 2017

15

## 2. COZIMENTO DO XAROPE

Prof Sandra H Cruz - 2017

16

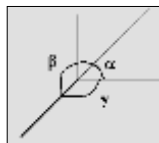
**INTRODUÇÃO**

Sacarose cristaliza

- sistema monoclinico
- 3 eixos: a, b e c e 3 ângulos  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$

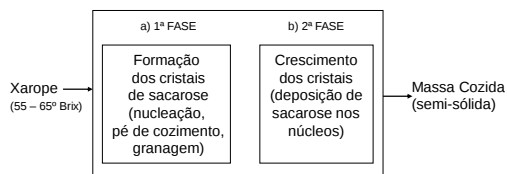


<http://portalatual.com.br/portal/2011/08/03/cuidado-embalagens-do-acucar-cristal-tem-particulas-de-ferro/>



Prof Sandra H Cruz - 2017

17

**COZIMENTO DO XAROPE**Aparelho simples-efeito:

Duas fases de cozimento

- Fase inicial - granagem, nucleação ou formação de pé de cozimento.
- Fase final - crescimento de cristais

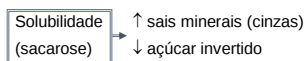
Prof Sandra H Cruz - 2017

18

**(1) Solubilidade da sacarose**

Sacarose → caldo de cana

(água, açúcar invertido e sais minerais)



Prof Sandra H Cruz - 2017

19

**(2) Solubilidade da sacarose em soluções impuras**FÓRMULA - Coeficiente de solubilidade da sacarose em solução impura ( $C_s$ ):

$$C_s = S^0 / S' \quad , \text{ onde}$$

 $C_s$  = coeficiente de solubilidade da solução impura; $S^0$  = massa de sacarose, dissolvida em 100 partes de água, de uma solução saturada impura, pureza R, e temperatura  $t^\circ\text{C}$ . $S'$  = massa de sacarose, dissolvida em 100 partes de água, de uma solução saturada pura, pureza 100, a temperatura  $t^\circ\text{C}$ .

Caldo solução impura { Açúcar redutor  
Sais minerais

açúcar redutor - diminui solução - reduz a formação de melaço produzindo mais açúcar cristalizado. (melassigênico negativo)

Sais minerais (cinzas) aumentam a solubilidade da sacarose incrementando a produção de melaço reduzindo a produção de açúcar. (melassigênico positivo)  
Relação ⇒ açúcar redutor/ cinzas → interfere na recuperação de açúcar.

Prof Sandra H Cruz - 2017

20

## SOLUBILIDADE DA SACAROSE – soluções impuras

Solução diluída x Solução saturada x Solução supersaturada

- Diluída, instável ou não saturada
- Concentrada, estável ou saturada
- Super concentrada, instável ou super-saturada

- caldo cana, xarope e méis - soluções diluídas
- cristalização - ocorre - solução super-saturadas

## COEFICIENTE DE SOLUBILIDADE

$$CS = \frac{\text{massa de sacarose dissolvida em uma solução diluída}}{\text{massa de sacarose dissolvida em uma solução saturada}}$$

Prof Sandra H Cruz - 2017

21

## Soluções supersaturadas

## COEFICIENTE DE SUPERSATURAÇÃO (C.S.S.)

$$CSS = \frac{\text{massa de sacarose dissolvida em uma solução supersaturada}}{\text{massa de sacarose dissolvida em uma solução saturada}}$$

| Valor da C.S.S. | Interpretação                   |
|-----------------|---------------------------------|
| 1               | solução saturada                |
| <1              | solução não saturada ou diluída |
| >1              | solução supersaturada           |

Prof Sandra H Cruz - 2017

22

**(3) Soluções Supersaturadas de Sacarose**

(C1) Coeficiente de supersaturação (C.S.S.)

$$C.S.S. = S'' / S' \quad , \text{ onde:}$$

$S''$  = peso da sacarose (partes), dissolvidas em 100 partes de água, de uma solução supersaturada, de pureza R e a temperatura  $t^{\circ}\text{C}$

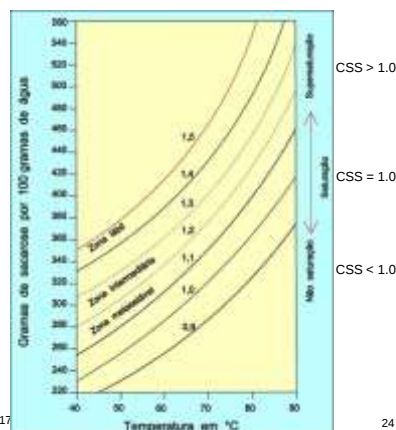
$S'$  = peso da sacarose (partes), dissolvidas em 100 partes de água, de uma solução saturada, pura e a temperatura  $t^{\circ}\text{C}$

| Valor da C.S.S. | Interpretação                   |
|-----------------|---------------------------------|
| 1               | solução saturada                |
| <1              | solução não saturada ou diluída |
| >1              | solução supersaturada           |

Prof Sandra H Cruz - 2017

23

## CURVAS DE SATURAÇÃO E SUPERSATURAÇÃO DE SACAROSE



Prof Sandra H Cruz - 2017

24

## Zonas de Supersaturação e a Cristalização

### 1 - Zona Metaestável (CSS: 1,0 a 1,2)

- apenas crescimento dos núcleos cristalinos existentes;
- não ocorre nucleação ou formação de sacarose como cristal;
- tendência do coeficiente de supersaturação se aproximar do limite inferior.

### 2 - Zona intermediária (CSS: 1,2 a 1,3)

- crescimento dos cristais existentes;
- formação de novos núcleos ou de falsos cristais (falso grão);
- tendência do CSS atingir o limite superior da zona metaestável.

### 3 - Zona lábil (CSS: $\geq 1,3$ )

- ocorrência de nucleação espontânea da sacarose;
- tendência de abaixamento do CSS para limite superior da zona intermediária.

Prof Sandra H Cruz - 2017

25

## CRISTALIZAÇÃO DA SACAROSE E O COZIMENTO (NUCLEAÇÃO)

### Processo de cozimento

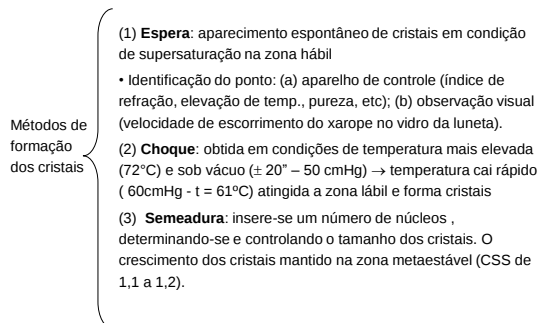
#### a) Concentração inicial do xarope:

- Funcionamento do vácuo (via o condensador e ejetor à vapor, condensador e bomba de vácuo ou simplesmente multijato);
- redução de pressão "aspira" o xarope até cobrir a superfície superior da calandria;
- ajuste da regulagem de pressão à 59 cm Hg ( $\pm 24"$ ) com temperatura de 63°;
- concentração gradual do xarope (perda de água) e compensado pela adição em filete contínuo (suficiente);

Prof Sandra H Cruz - 2017

26

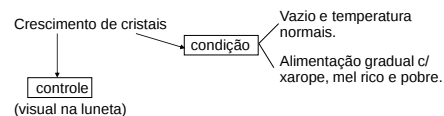
#### b) Formação dos cristais de sacarose (rel. xarope/ pé de cozimento)



Prof Sandra H Cruz - 2017

27

#### c) Crescimento dos cristais e levantamento do cozimento



#### d) Concentração Final

- "Aperto" de massa → máxima concentração (interferem circulação de massa p/ alta viscosidade).

#### e) Descarregamento

Prof Sandra H Cruz - 2017

28

**Cozimento**  
(tipo)

## Intermittente

- vantagens:

- a) custo mais baixo do equipamento;
- b) tecnologia bem conhecida;
- c) recursos requeridos plenamente disponíveis.

Contínuo

- vantagens (Assis & Jais, 1993):

- a) aumento de capacidade (não há tempo "morto");
- b) economia de energia (consumo constante de vapor);
- c) economia de investimento em equipamentos novos (não requer perifericos-condensadores, bombas de água, etc);
- d) domínio sobre o tamanho dos cristais;
- e) controle de supersaturação;
- f) dimensionado por massa;
- g) menores perdas de água (arraste ao condensador);
- h) maiores rendimentos.

Prof Sandra H Cruz - 2017

29

## SISTEMAS DE COZIMENTO

Diferentes sistemas visam

- a) obter cristais de tamanho médio e uniforme
- b) esgotamento do mel
- c) maior recuperação de açúcar

recirculação de méis causam {

- maior recuperação
- menor pureza do mel
- maior viscosidade

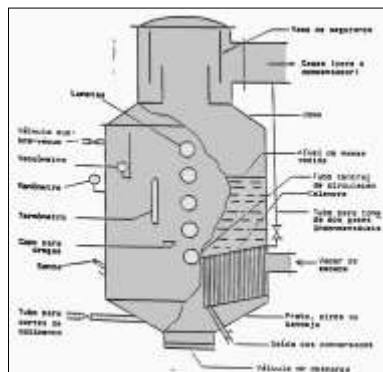
## CONDUÇÃO DE UM COZIMENTO

Prof Sandra H Cruz - 2017

30

## EQUIPAMENTOS DE COZIMENTO

### DESCRIÇÃO DE UM COZEDOR INTERMITENTE CLÁSSICO



Usina Bom Retiro



31



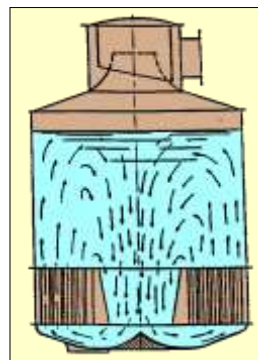
PUB. SAILING: 11-07-2017 12:00

## EQUIPAMENTOS DE COZIMENTO CLASSIFICAÇÃO

- a) quanto a elementos de aquecimento { serpentina (A)  
calandria (B)  
placas (retas e circulares) (E-F)
- b) quanto ao tipo de calandria { fixa (B)  
flutuante (C)  
espelho plástico (B)  
espelho inclinado  
diametral (D)  
anel (H)
- c) quanto a condução { Intermitentes  
contínuos (I)
- d) quanto a circulação { Material  
Forçada (D)
- e) quanto a configuração { Vertical  
Horizontal (G)

Prof Sandra H Cruz - 2017 33

## Sistema de circulação da massa no cozedor



B) calandria fixa

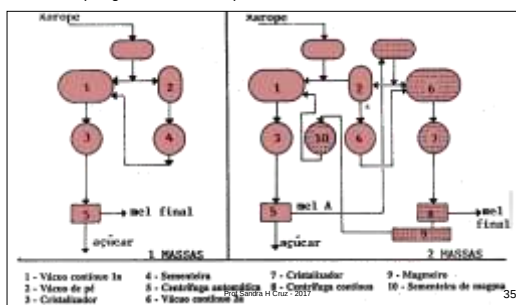
2017

34

## Esquema de cozimento

(Prática: 2, 3 e 4 massas)

→ pouco retorno de méis p/ cozimento → fabricação do álcool  
(↓esgotamento ↓custo)



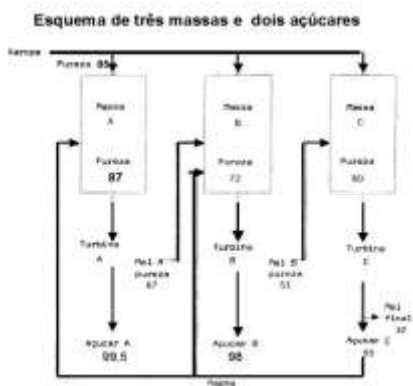
35

## ESQUEMA DE DUAS MASSAS COM RECICLURAÇÃO DE MÉIS



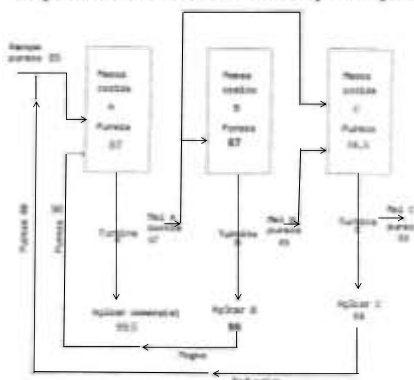
Prof Sandra H Cruz - 2017

36



Prof Sandra H Cruz - 2017

37

**Esquema de três massas e um só tipo de açúcar**

Prof Sandra H Cruz - 2017

38

### 3. CRISTALIZAÇÃO COMPLEMENTAR

#### FUNDAMENTOS E OBJETIVOS, CONDUÇÃO OPERACIONAL DOS CRISTALIZADORES

##### CRISTALIZAÇÃO POR RESFRIAMENTO E MOVIMENTO

Como funciona a cristalização complementar? Por que se faz isso?

⇒ Cristalização complementar: é efetuada nos cristalizadores, após a massa cozida ter sido descarregada dos cozedores.

→ Movimento (sacarose molecular - cristal) e resfriamento da massa  
→ ganhar alguns pontos (solubilidade - t°C) na queda de pureza

⇒ Por quê em movimento?

- calor residual mantido no interior da massa concorre para caramelização do açúcar,
- resfriamento lento, o CSS tende aumentar – soldaria os cristais bloco único,
- licor-mãe próximo do cristal → se esgota (com a paralização do crescimento)

Prof Sandra H Cruz - 2017

39

Prof Sandra H Cruz - 2017

40

Consequências:(1) Conglomerados e geminados:

- retenção de mel entre cristais;
- lavagem p/ atingir a reflectância e a pol do açúcar final;
- mel final no processo;
- umidade no açúcar dificulta secagem ( $\uparrow$ empedramento).

(2) Rendimento:

rendimento na fabricação (cristalização paralizada)

(3) Falsos cristais

Prof Sandra H Cruz - 2017

41

## • Formação do "falso grão"

→ tendência:  $\uparrow$  CSS no licor-mãe

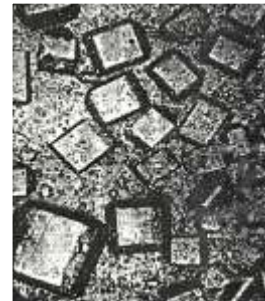
(geração)

→ dificuldades na centrifugação

## (4) Escurecimento da Massa Cozida.

→ dificuldades nas operações posteriores.

→ qualidade do açúcar.



Prof Sandra H Cruz - 2017

42

Objetivo:

- promover um estreito contato entre cristais e o mel: crescimento e esgotamento do mel.

TEMPERATURA FINAL DE RESFRIAMENTO DAS MASSAS COZIDAS

Queda de temperatura massa:  $t^{\circ}\text{C}$  inicial  $\rightarrow$   $t^{\circ}\text{C}$  final  
(65 a 75 $^{\circ}\text{C}$ ) (45 a 38 $^{\circ}\text{C}$ )

Controles - Cuidados Básicos:

- massas de elevada pureza  $\rightarrow$  abaixo de 40 a 38 $^{\circ}\text{C}$   $\rightarrow$  velocidade de deposição  $\rightarrow$  ocorrência de conglomerados;
- massa menor pureza  $\rightarrow$  resfriamento lento  $\rightarrow$  não formar conglomerados e cristais geminados  $\rightarrow$  maior n $^{\circ}$  de cristalizadores.

PAYNE: 3 $^{\circ}\text{C}$  por hora

BAIKOW: 0,6 $^{\circ}\text{C}$  por hora (inicial), passando p/ 1,1 a 1,7 $^{\circ}\text{C}$ /hora.

Prof Sandra H Cruz - 2017

43

QUEDA DE PUREZA DA MASSA COZIDA

Queda de pureza (licor-mãe) pelo movimento e resfriamento

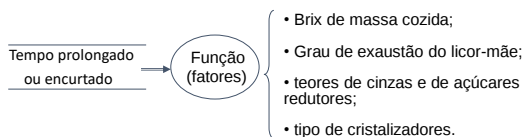
- massa A e B: 6 a 12 pontos
- massa C: 11 a 12 nós cristalizados
- (DAUBERT)

TEMPO NECESSÁRIO PARA A CRISTALIZAÇÃO COMPLEMENTAR

- Tempo de permanência
  - a) tipo de massa cozida
  - b) tipo de cristalizadores
  - c) condições técnicas da usina
- Literatura - tempos médios:
  - massa cozida A - 12h
  - massa cozida B - 24h
  - massa cozida C - 72h
  - massas de baixa pureza: cristalizadores - 48h

Prof Sandra H Cruz - 2017

44



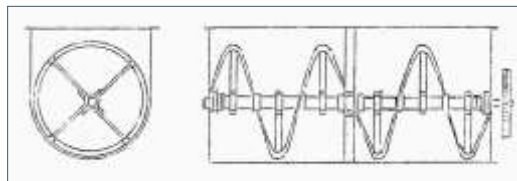
Prof Sandra H Cruz - 2017

45

## TIPOS DE CRISTALIZADORES

### 1. Cristalizadores de Resfriamento Natural

- troca de calor de parede do cristalizador e a superfície de exposição da massa com o cristalizador.



Prof Sandra H Cruz - 2017

46

### 2. Cristalizadores de resfriamento forçado



#### Resfriamento forçado:

→ disposição mecânica das tubulações internas para a circulação de água.

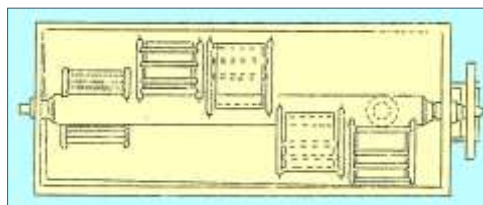
→ Agitadores

Δ tempo de retenção: 70 a 80%

Prof Sandra H Cruz - 2017

47

#### (A) Cristalizador BLANCHARD



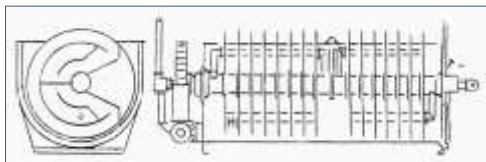
#### Aspectos técnicos:

- coeficiente de transmissão de calor: 2,2 a 2,4 kcal/m<sup>2</sup>/h/°C  
(varia: volume de massa e velocidade de circulação de água)

Prof Sandra H Cruz - 2017

48

## (B) Cristalizador WERKSPOOR



Prof Sandra H Cruz - 2017

49

Detalhes técnicos:

→ 3. Coeficiente de transmissão de calor (K):

 $k = 34 \text{ a } 49 \text{ kcal/m}^2/\text{h}^\circ\text{C}$  (aparelho novo e limpo); $k = 12 \text{ kcal/m}^2/\text{h}^\circ\text{C}$  (aparelho velho, sujo e mal desenhado);

→ 4. Superfície de resfriamento:

- massa cozida - alta pureza -  $S/V = 7 \text{ a } 10 \text{ m}^2/\text{m}^3$  ou  $0,7 \text{ a } 1,0 \text{ m}^2/\text{hl}$ - massa cozida - baixa pureza -  $S/V = 1,0 \text{ m}^2/\text{m}^3$  ou  $0,1 \text{ m}^2/\text{hl}$ Vantagens:

- ocupa menor espaço;

- permitir um resfriamento melhor.

Prof Sandra H Cruz - 2017

50

**4. CENTRIFUGAÇÃO DA MASSA COZIDA**

Condução operacional das centrífugas e  
sistemas de centrifugação

Prof Sandra H Cruz - 2017

51

**CENTRIFUGAÇÃO DA MASSA COZIDA****Massa cozida (MC)** é constituída de duas fases:

a) fase sólida: cristais de sacarose;

b) fase líquida: mel ou licor mãe.

**MC** → semi-sólida, viscosa, escura e que apresenta diferentes graus de pureza em função da riqueza dos materiais empregados na sua elaboração.

→ Separação dos cristais de sacarose do mel

- gravidade
- centrifuga

Centrifugas açucareiras - Weston (séc. XIX)

evoluções

- a) maneira de conduzir a operação de separação dos cristais;
- b) velocidade dos cestos das separadoras;
- c) na forma de descarga;
- d) no sistema de acionamento;
- e) no automatismo.

Prof Sandra H Cruz - 2017 52

## CLASSIFICAÇÃO DAS SEPARADORAS

|                                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                           |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Quanto a função da forma separadora                 | { a) fluxo intermitente (MC de 1º)<br>b) fluxo contínuo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | { manual<br>semi-automático<br>automático |
| Quanto ao grau de automatismo de fluxo intermitente | { a) <u>controle manual</u> → todas as operações acionadas pelo operador (partida, carga, aceleração, velocidade total - lavagem com água e vapor - desaceleração - descarga);<br>b) <u>controle semi-automático</u> → as fases de partida, carga e descarga são manuais, mas as demais operações são automáticas.<br>c) <u>automáticas</u> → todas as operações automáticas; operador da partida e apenas observa o trabalho. |                                           |

Prof Sandra H Cruz - 2017

53

## DESCRIÇÃO DA TURBINA CONVENCIONAL

Partes do conjunto: {

- misturador de massa
- centrífuga
- condutor de açúcar
- caixas de mel

## a) Misturador de massa

- objetivo {
  - não deixar os cristais separarem do mel
  - aquecer ou manter aquecida a massa
  - alimentar a centrífuga
- Depósito em U com agitador em serpentina

Aquecimento {

- Água
- vapor

Prof Sandra H Cruz - 2017

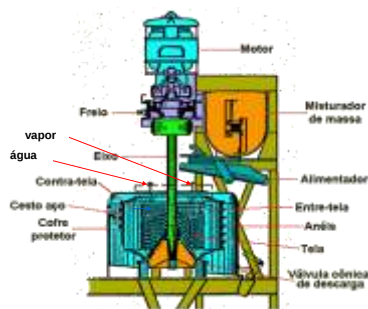
55

## b) Centrífuga

Constituição equipamento {

- mecânico
- pneumático
- elétrico

## Descrição - centrífuga convencional



56

## c) Condutor de açúcar

Tipo {

- calha oscilante (bica de jogo)
- esteira de borracha

componentes bica jogo {

- Mesa retangular
- barra de sustentação
- motor ligado a excêntrico



Descarga de açúcar da centrífuga para o condutor - bica de jogo (Açúcar - VHP)

Condutor de açúcar (bica de jogo) sob a centrífuga

Prof Sandra H Cruz - 2017

57

## D) Caixa de méis

Tipo {  
mel pobre  
mel rico

## CICLO DE CENTRIFUGAÇÃO

- Arranque - início da operação.
- aceleração e carga - 200 → 580 rpm
- velocidade total - 1180 rpm
- lavagem com água - 4 a 7 L de água a  $\approx 90^\circ\text{C}/120\text{kg}$  massa cozida.
- lavagem com vapor - pressão 2 a 5  $\text{kg}/\text{cm}^2$
- desaceleração
- descarga - 50 rpm
- limpeza da tela - água e vapor

Prof Sandra H Cruz - 2017 58

## Ciclo de centrifugação → (fases):

- a) arranque → início da operação (sai da inércia - 50rpm);
- b) carga-aceleração → velocidade de 200rpm, a carga começa a processar até a velocidade de 600rpm.  $t_1 \rightarrow 0,5 \text{ a } 1 \text{ min}$
- c) velocidade total → velocidade plena (1000 a 1800rpm) com lavagem do açúcar com água e vapor;  
 $t_2 \rightarrow 0,5 \text{ a } 1 \text{ min (lavagem c/ água)}$   
 $t_3 \rightarrow 1,0 \text{ a } 2 \text{ min (lavagem c/ vapor)}$
- d) parada → frenagem do cesto e reduz para 200 rpm;  
 $t_4 \rightarrow 0,5 \text{ min}$
- e) descarga → velocidade reduz para 50 rpm e a descarga do açúcar (manual ou mecânica).  
 $t_5 \rightarrow 0,5 \text{ min}$

Σ t = 3 a 5 min

Definições - mel rico  
mel pobre

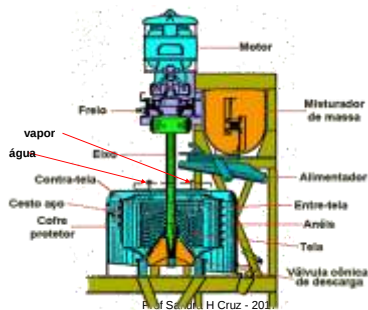
Prof Sandra H Cruz - 2017

59

## Centrífuga

Constituição equipamento {  
mecânico  
pneumático  
elétrico

## Descrição - centrífuga convencional



Prof Sandra H Cruz - 2017

60

## Tempo de centrifugação

## Fatores que influenciam:

- viscosidade da massa;
- concentração da massa;
- tamanho e regularidade dos cristais;
- rapidez da aceleração;
- força centrífuga: velocidade/ diâmetro;
- tempo de freagem e descarga.

## Valores segundo tipo de massa cozida

|         | tempo(min) | nº ciclo/h |
|---------|------------|------------|
| Massa A | — 2 a 6    | — 30 - 10  |
| Massa B | — 4 a 10   | — 15 - 6   |
| Massa C | — 10 a 45  | — 6 - 1,3  |

Prof Sandra H Cruz - 2017

61