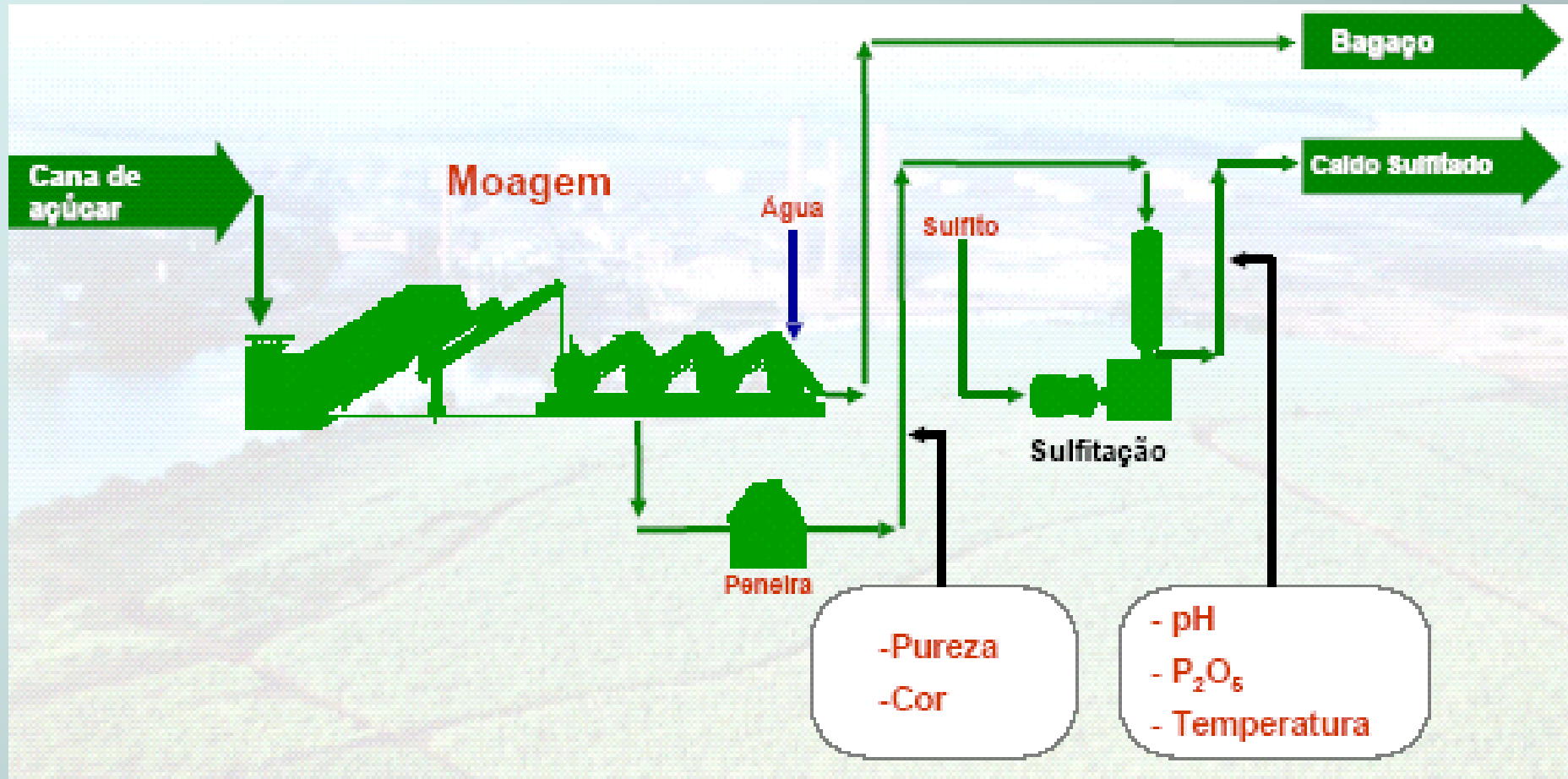


LAN1458 – Açúcar e Álcool

# Concentração do Caldo de cana

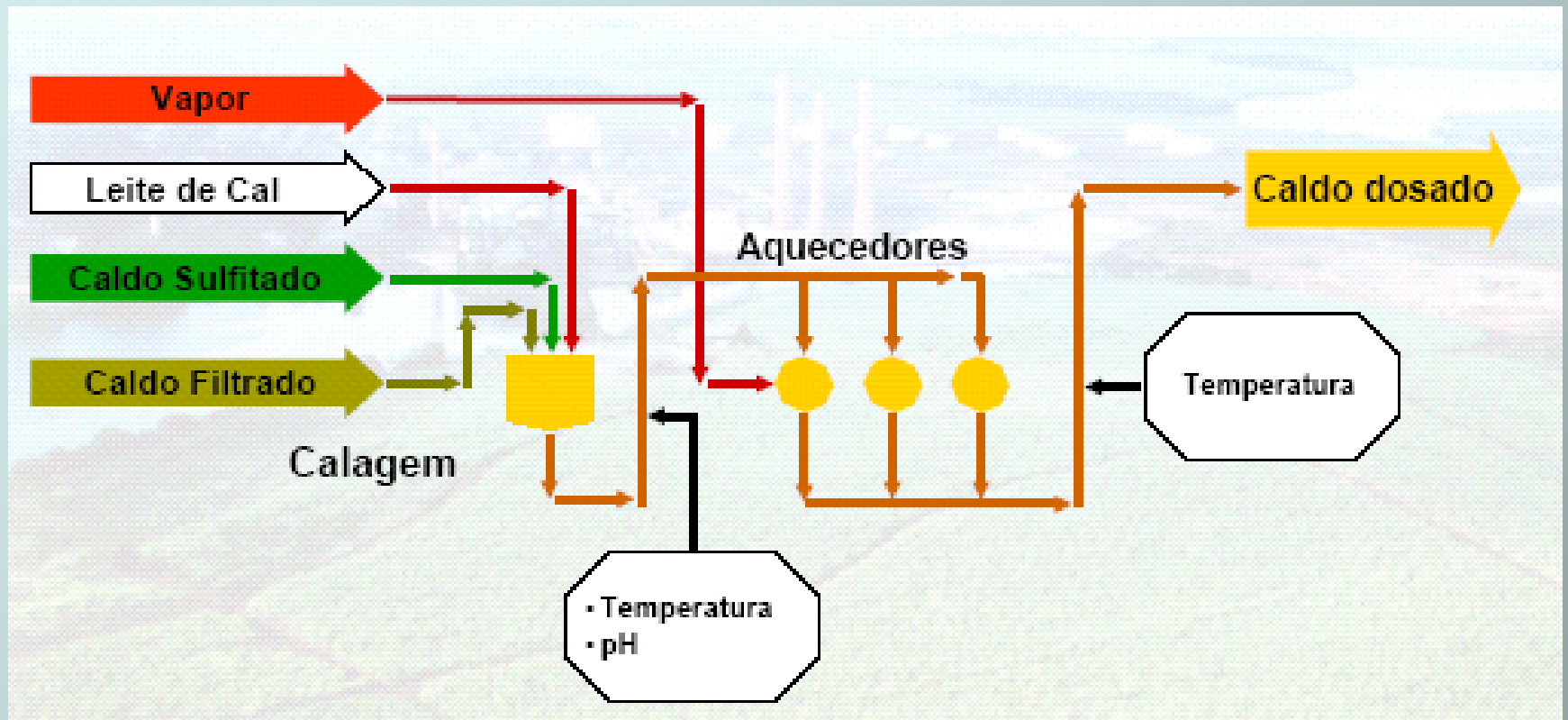
Evaporação e cozimento

## Preparo da cana, moagem e sulfitação

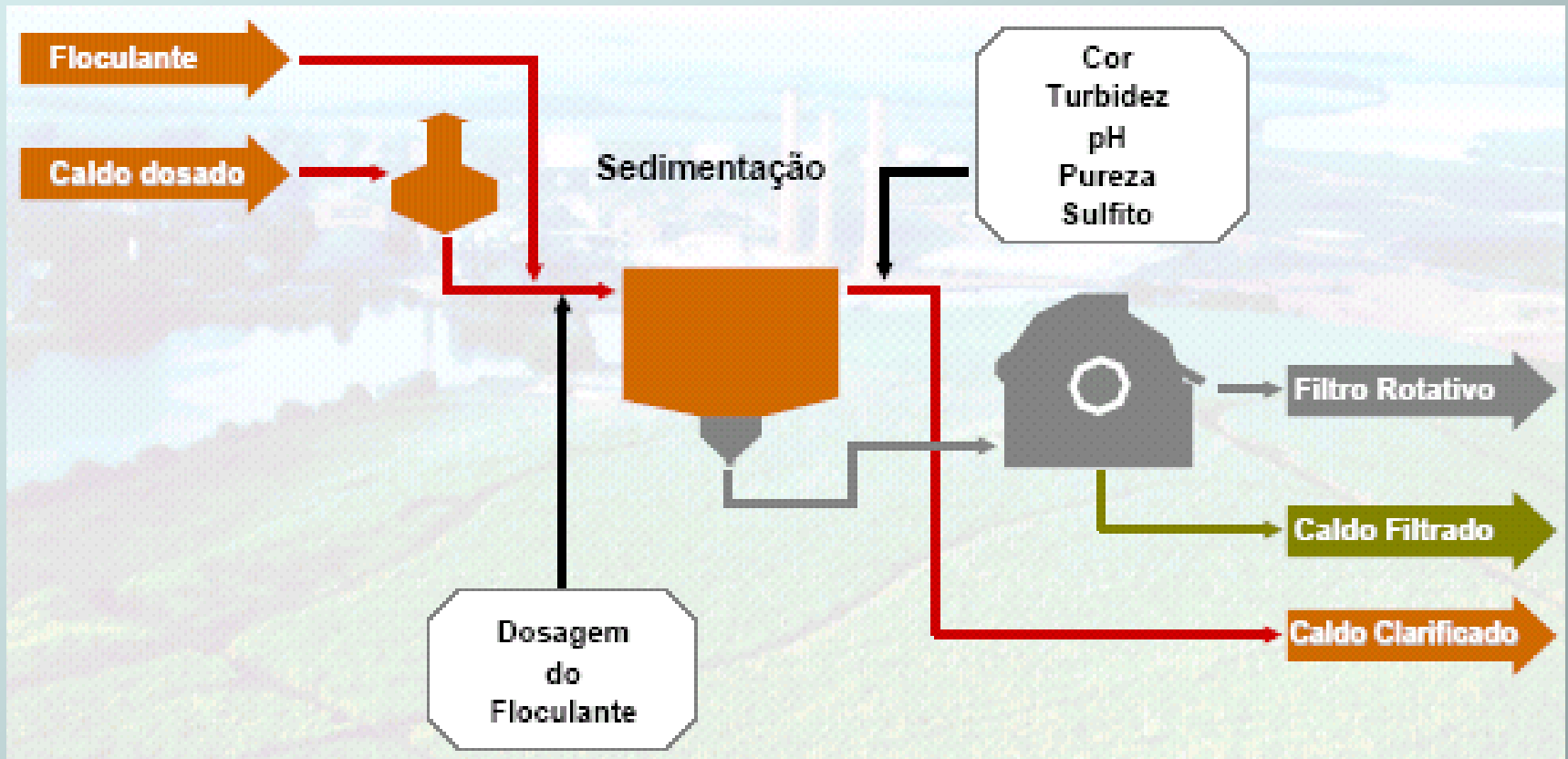


<http://www.mandu.com.br/producaoacucar.htm>

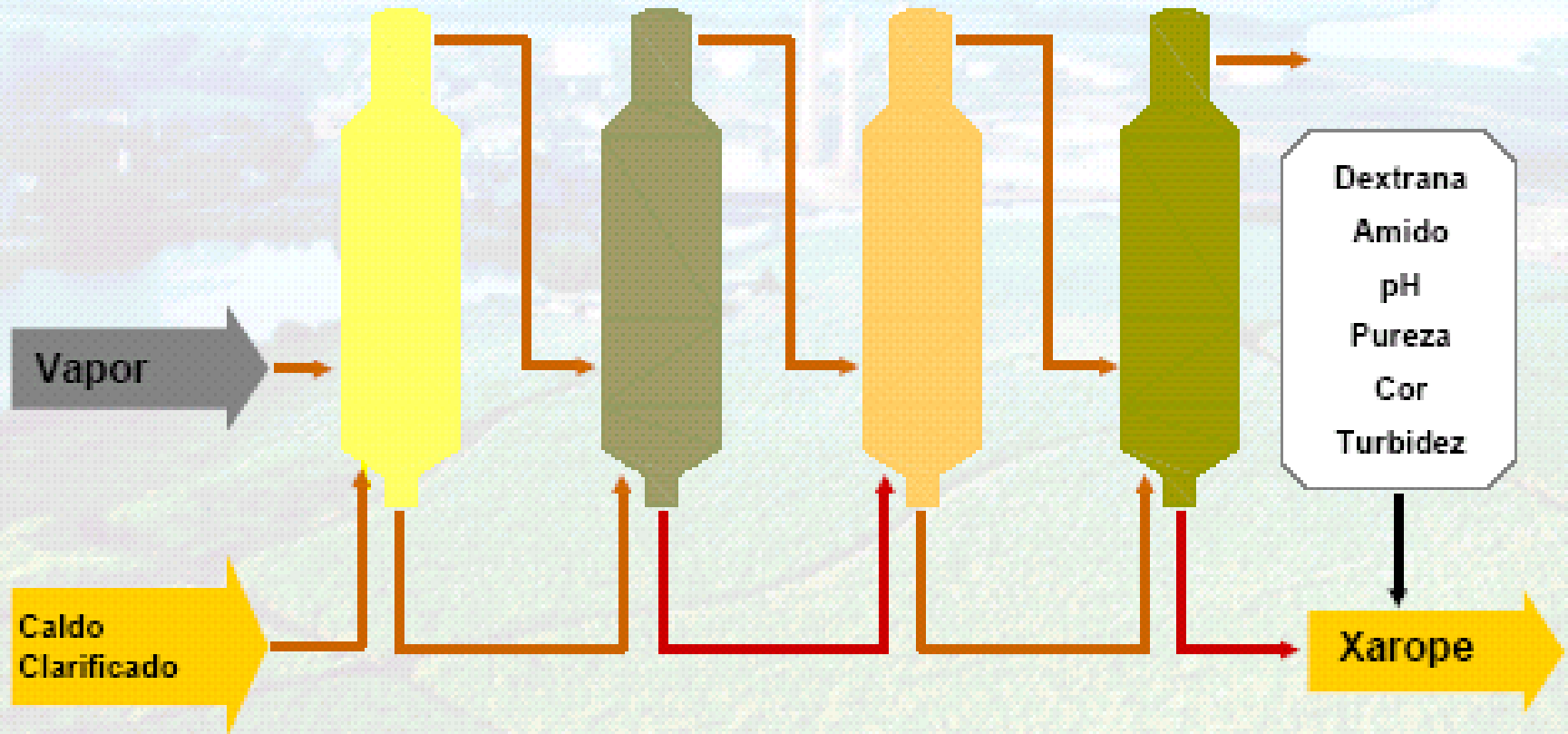
## Caleagem e aquecimento



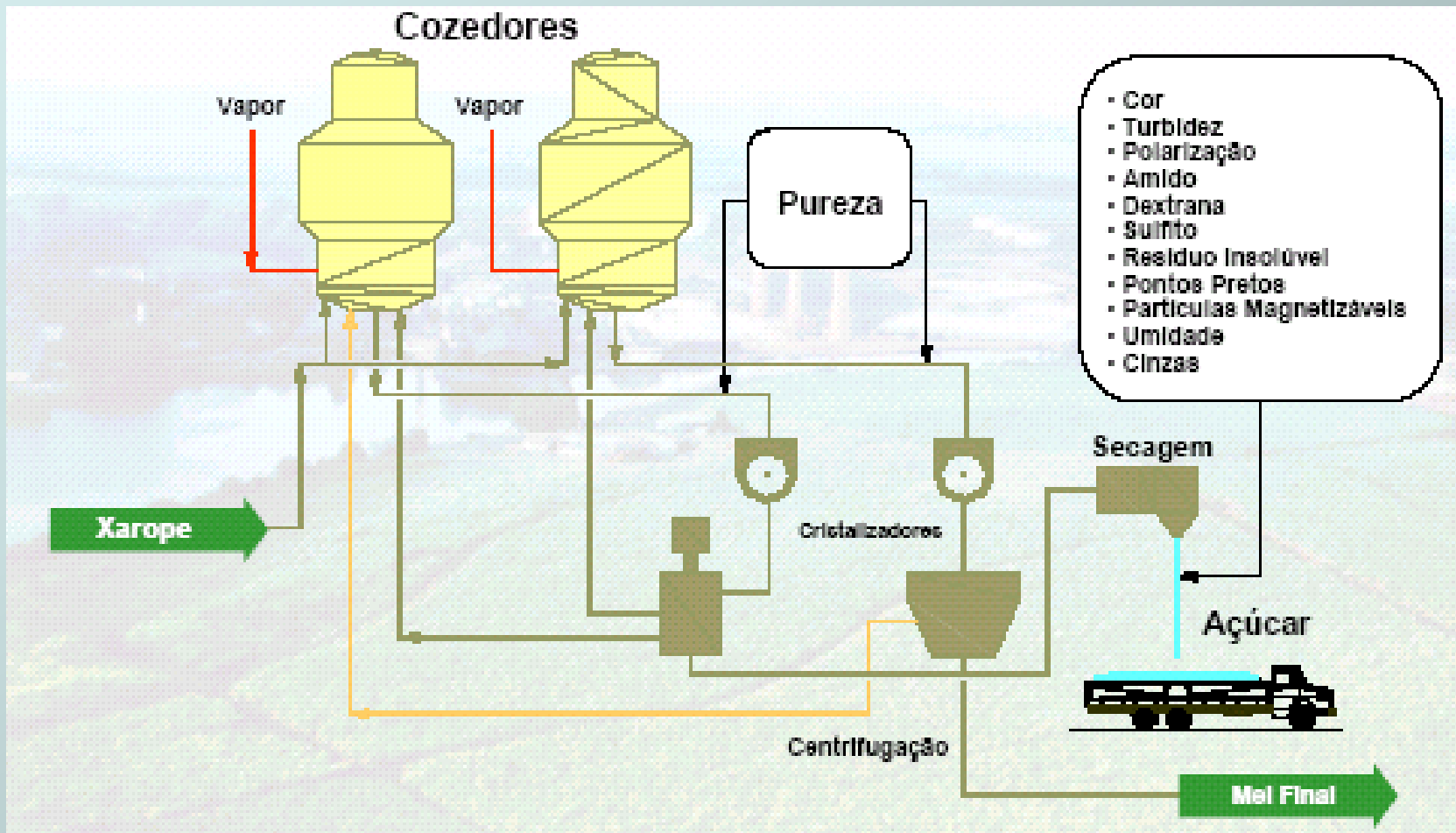
## Sedimentação e filtração



# Evaporadores



## Cristalização / Centrifugação e secagem



# 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.

# 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.



# 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/cm<sup>2</sup>

- 2ª fase - **Evaporação** - 20 a 25°Brix → 55-65°Brix

temperaturas — 107° < 55°C

pressão mono. — 0,37 Kg/cm<sup>2</sup> < 64 cmHg

# 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

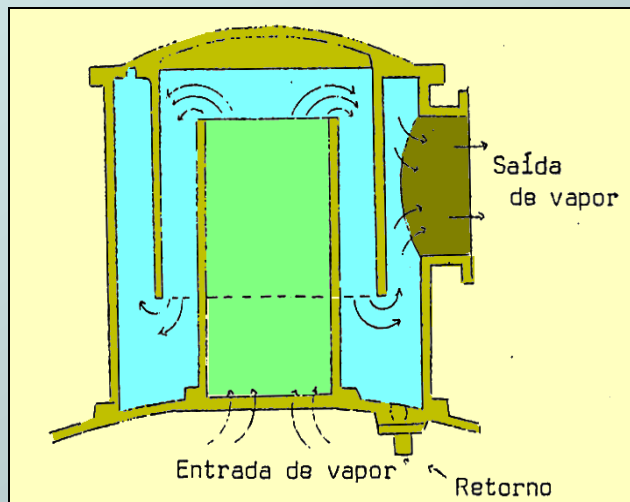
- maior dificuldade na produção do pé de cozimento;
- dificulta a condução do cozimento;
- dificulta o controle de crescimento dos cristais;
- facilita a formação de falsos cristais.

# CONSTRUÇÃO DE UM MÚLTIPLO-EFEITO

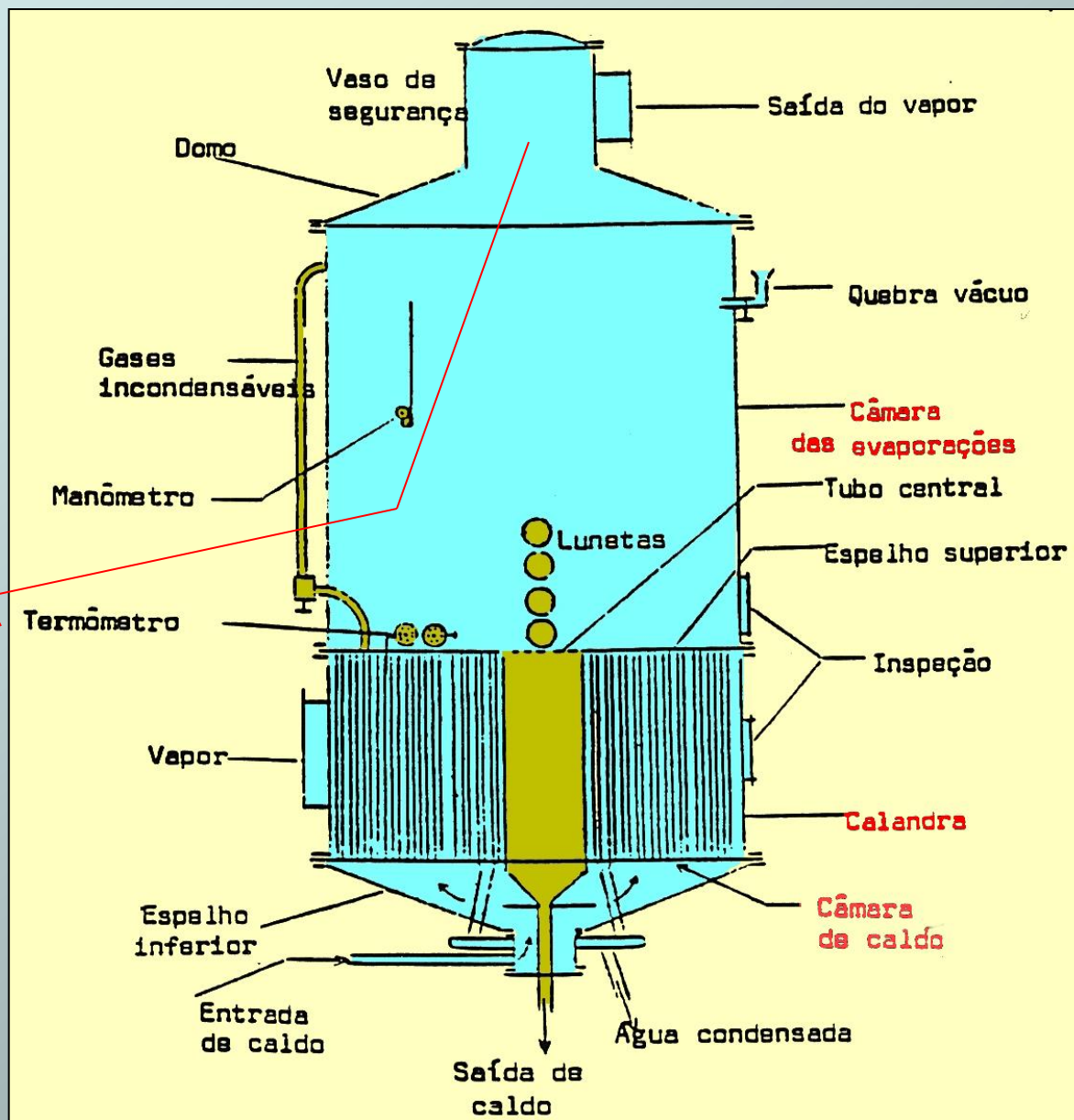
Facilidade de construção  
- corpos do sistema  
(forma, altura, capacidade)

Aparelho  
4 partes

- Fundo
- calandria
- corpo cilíndrico
- cabeça



Detalhe da cabeça

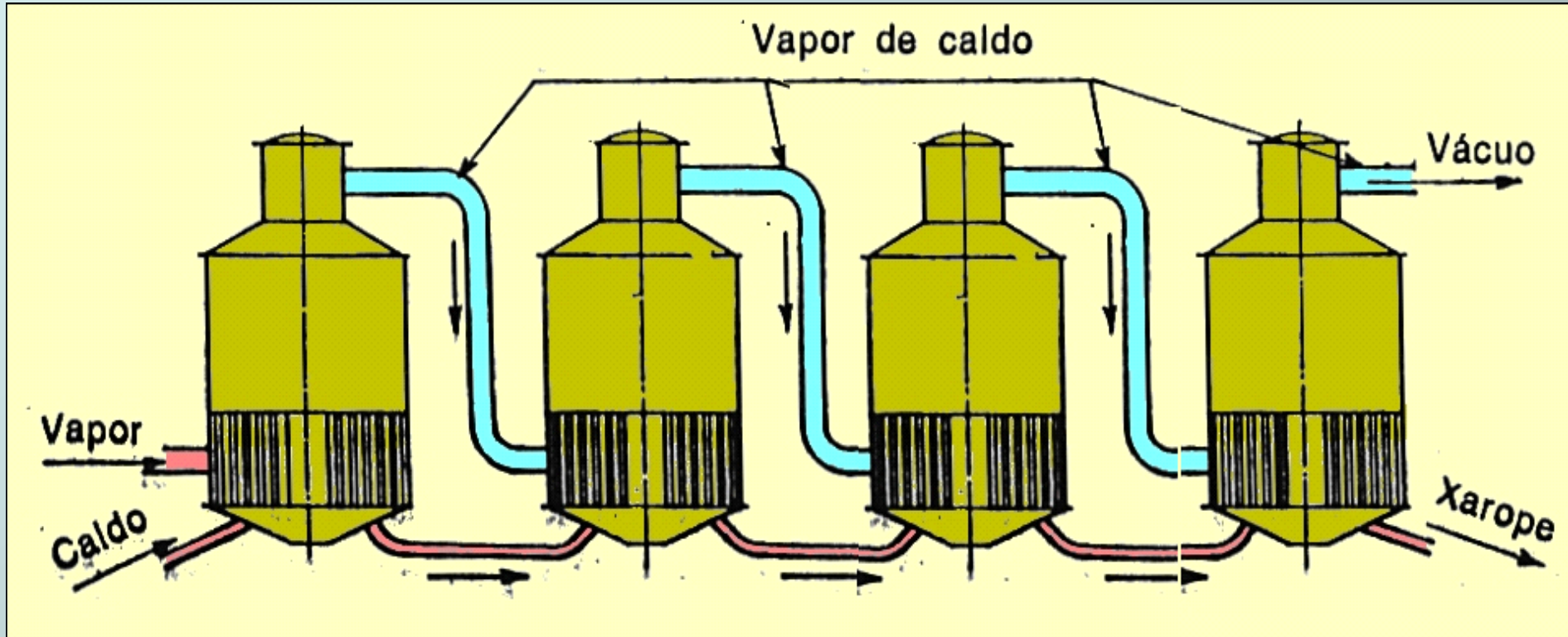


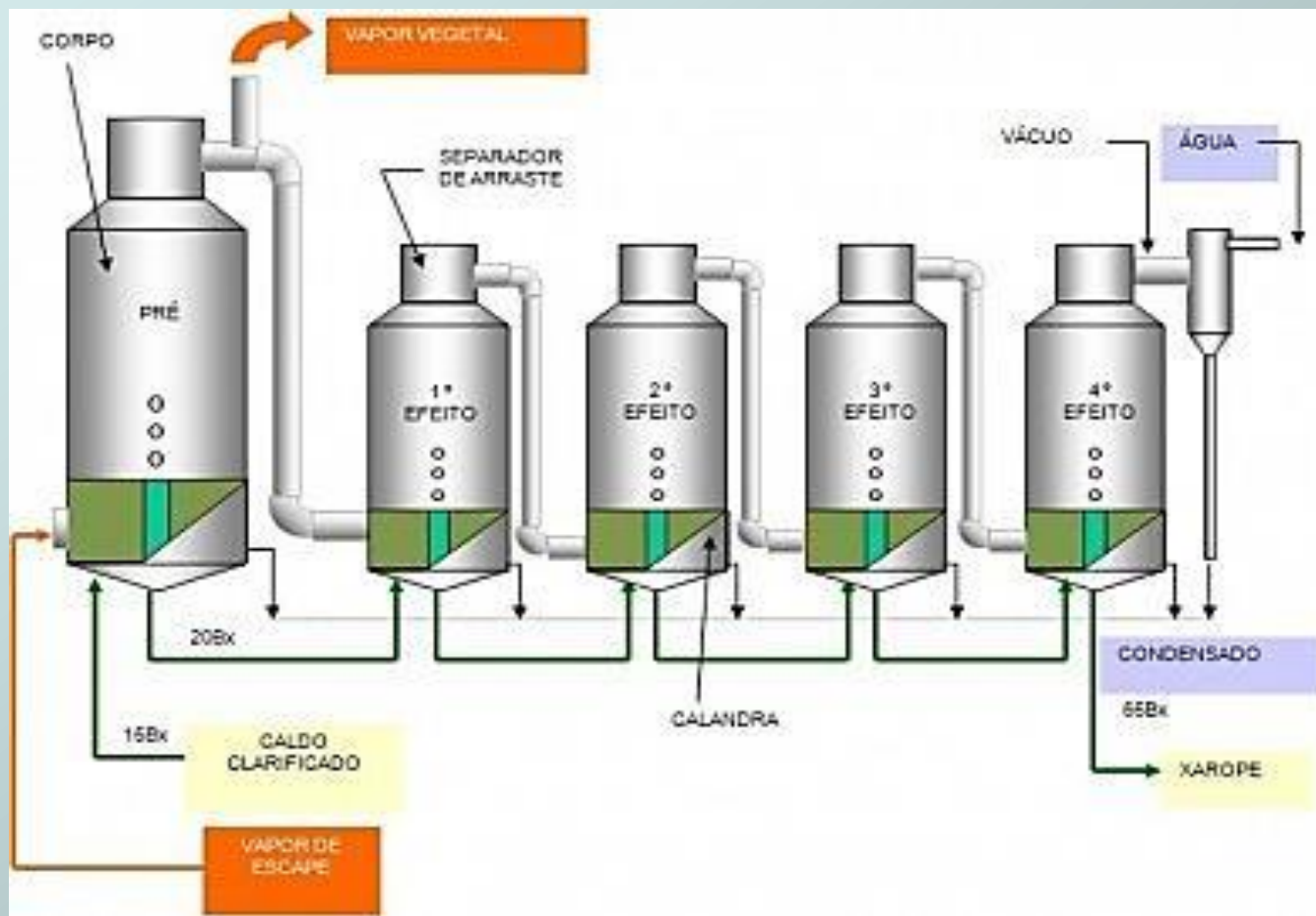


sh-beyond.en.alibaba.com

[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)

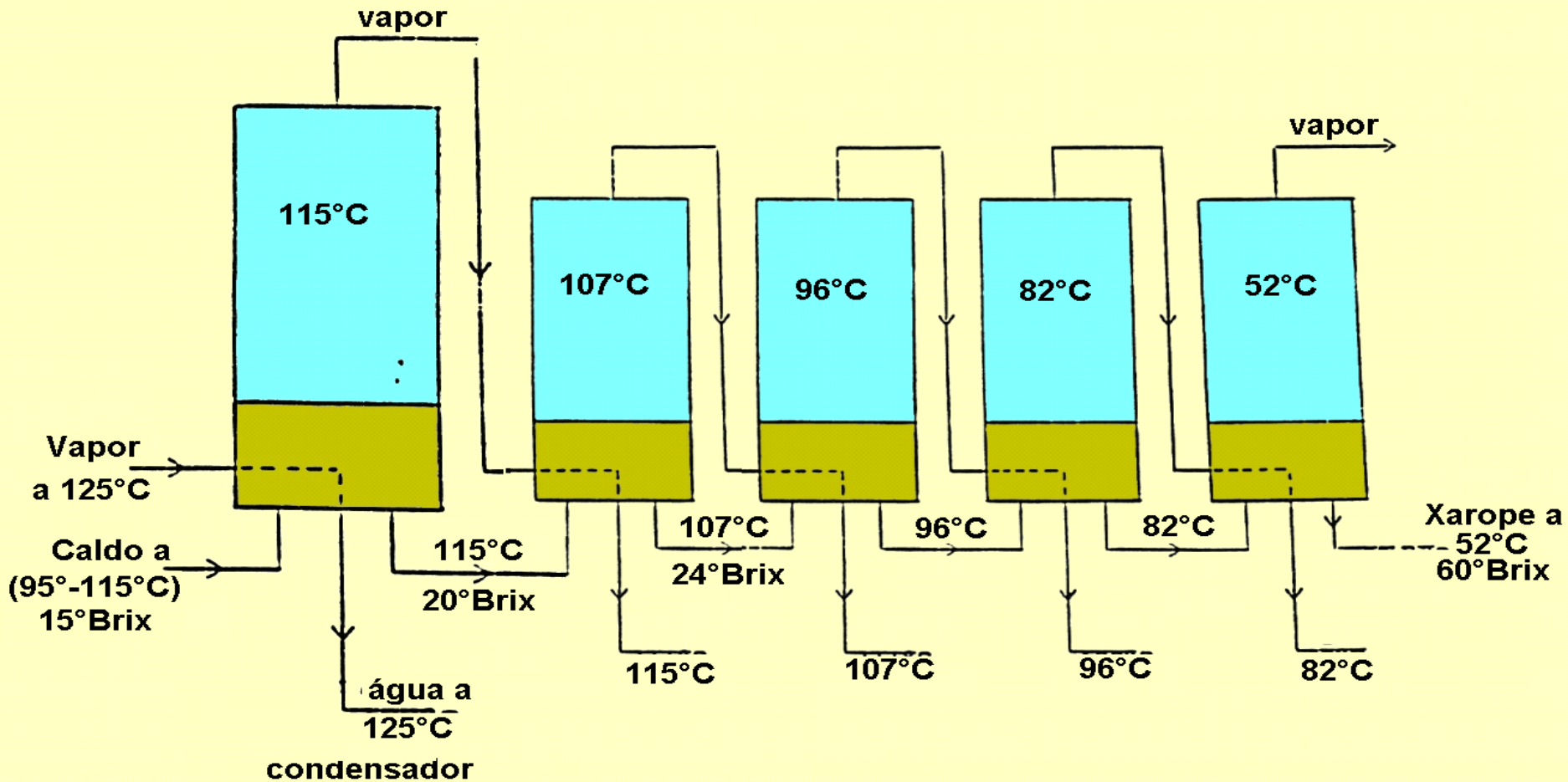
# EVAPORAÇÃO EM MÚLTIPLO-EFEITO





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

# EVAPORAÇÃO EM MÚLTIPLO-EFEITO



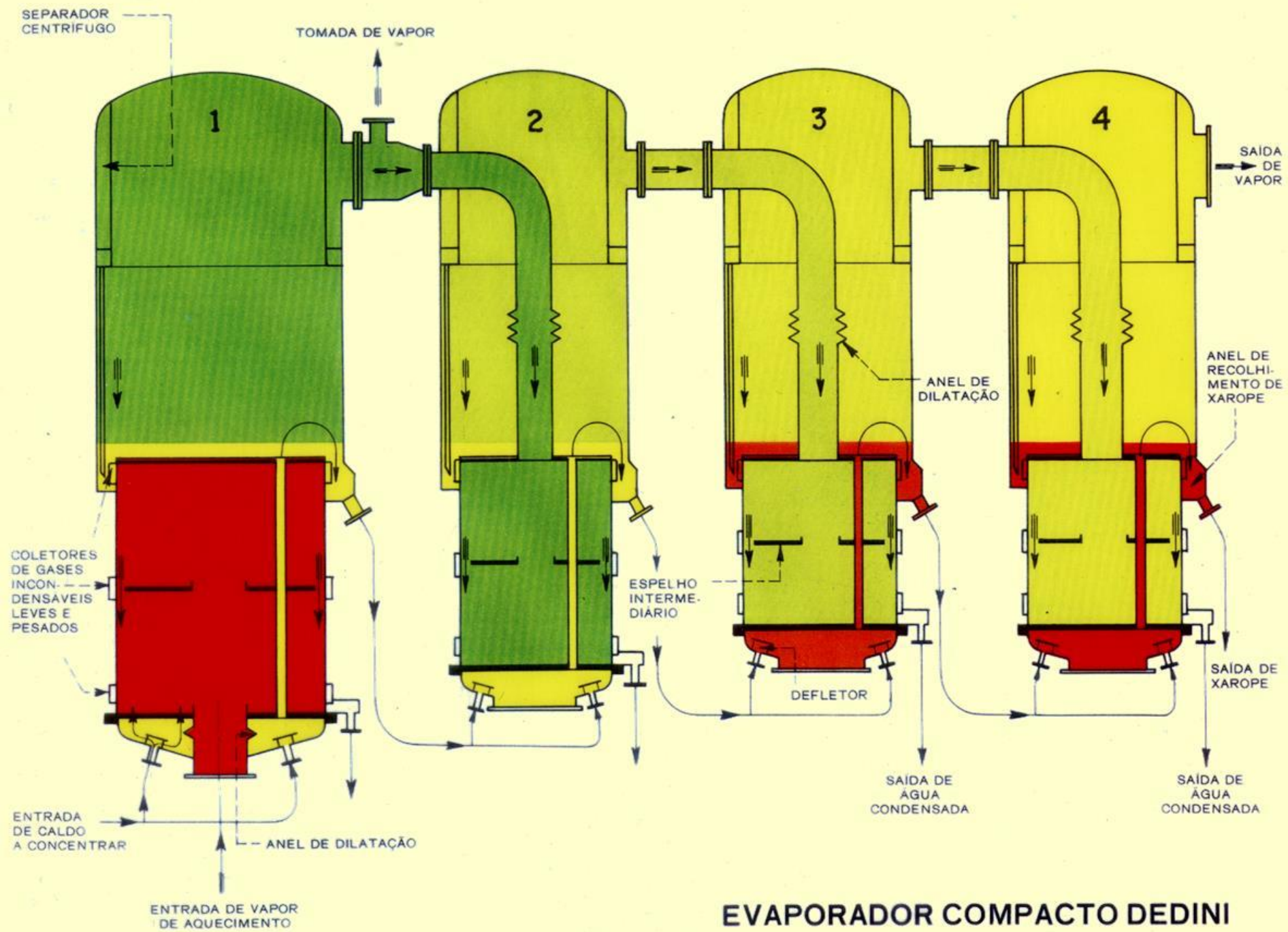
Relações entre pressões, temperaturas e brix.

		Pré	1° V	2° V	3° V	4° V
Calandra	P (Kg/cm <sup>2</sup> )	1,33	0,69	0,28	—	—
	V (cmHg)	—	—	—	10	37
	T (°C)	125	115	107	96	82
Câmara gases	P (Kg/cm <sup>2</sup> )	0,69	0,28	—	—	—
	V (cmHg)	—	—	10	37	66
	T (°C)	115	107	96	82	52
Caldo Brix	Entrada	15	20	24	29	38
	Saída	20	24	29	38	60



# TIPOS ESPECIAIS DE EVAPORADORES

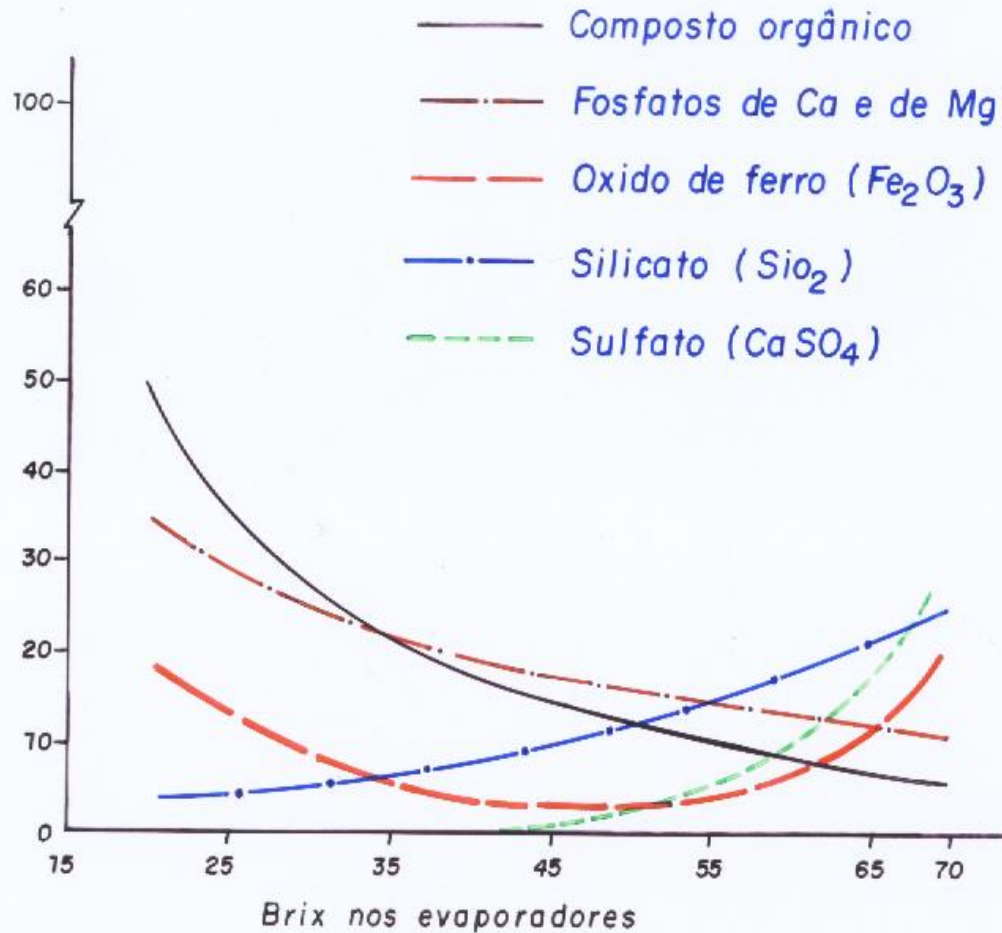
- ✓ Evaporador tipo Robert
- ✓ Evaporador de calandria flutuante com recirculação
- ✓ Evaporador Kestner
- ✓ Evaporador Compacto
- ✓ Evaporador de película fina descendente
- ✓ Evaporador típico torre



**EVAPORADOR COMPACTO DEDINI**



# Incrustações nos evaporadores



Varição da composição das incrustações em função do Brix nos evaporadores

## Processos de Limpeza

### (a) Mecânico:

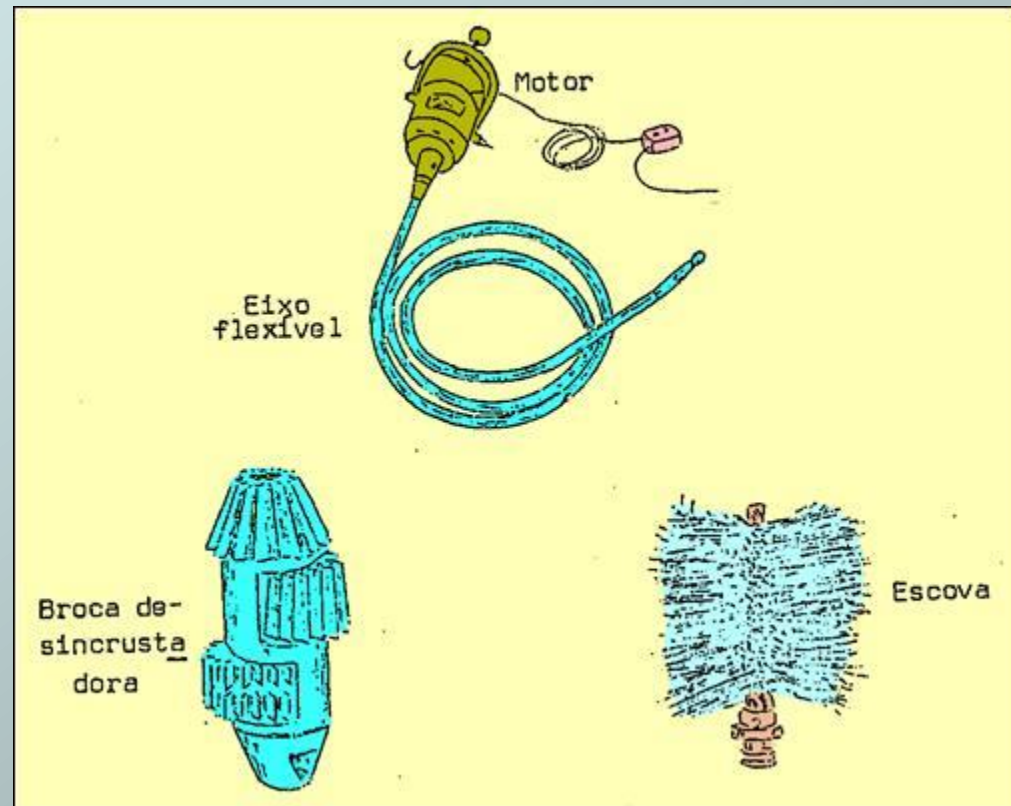
→ tipos: rasquete e chicote flexível

### (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)



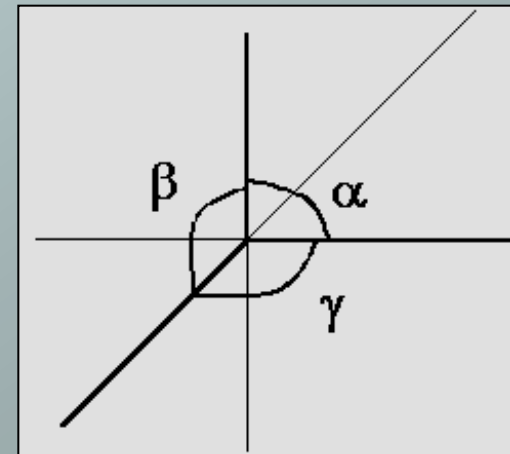
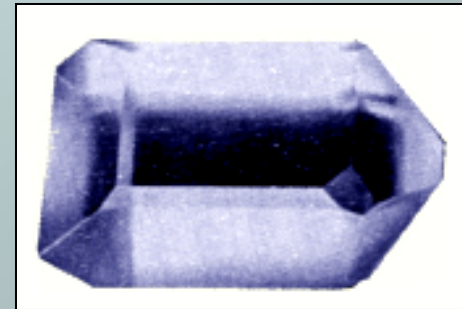
## 2. COZIMENTO DO XAROPE

PRINCÍPIOS, OBJETIVOS E ESQUEMAS

# INTRODUÇÃO

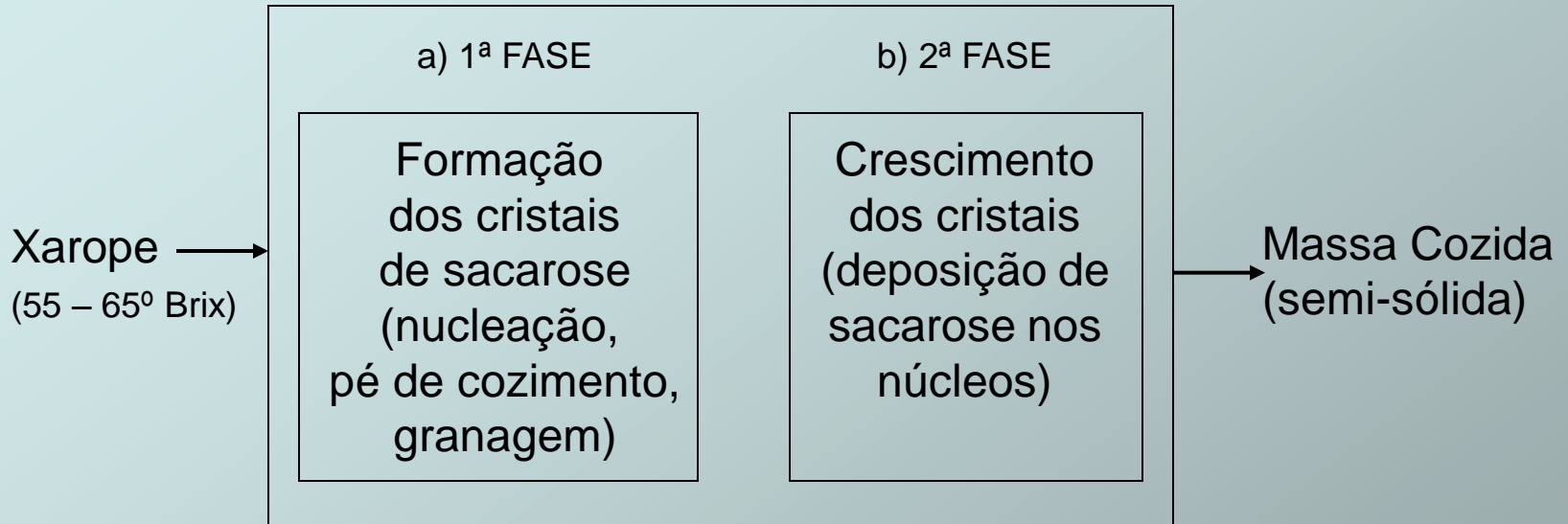
Sacarose cristaliza

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



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

# COZIMENTO DO XAROPE



Aparelho simples-efeito:

Duas fases de cozimento

a) Fase inicial - granagem, nucleação ou formação de pé de cozimento.

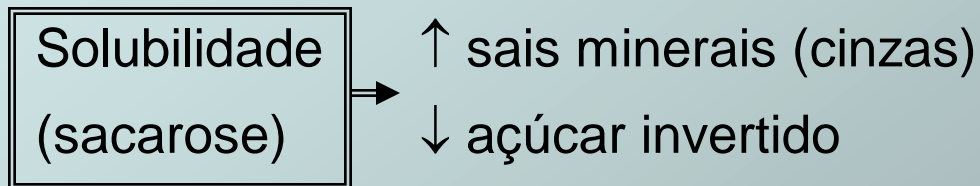
b) Fase final - crescimento de cristais



(1) Solubilidade da sacarose

Sacarose → caldo de cana

(água, açúcar invertido e sais minerais)



## (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  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Açúcar redutor} \\ \text{Sais minerais} \end{array} \right.$

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  $\Rightarrow$  açúcar redutor/ cinzas  $\rightarrow$  interfere na recuperação de açúcar.

## 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

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

# Soluções supersaturadas

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

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

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

### (3) Soluções Supersaturadas de Sacarose

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

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

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

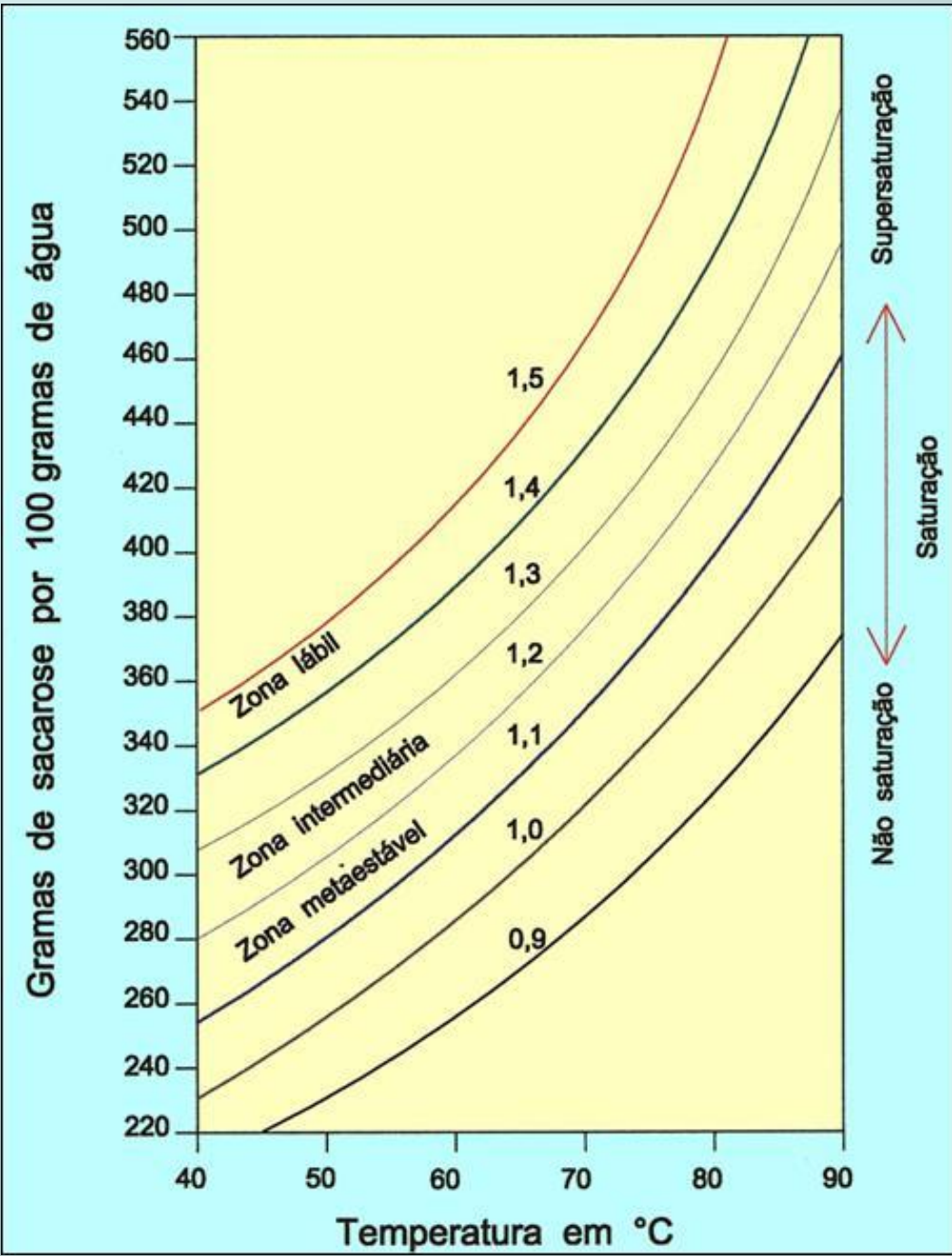
$S'$  = peso da sacarose (partes), dissolvidas em 100 partes de água, de uma solução saturada, pura e a temperatura  $t^{\circ}\text{C}$

Valor da C.S.S.

Interpretação

- 1 solução saturada
- <1 solução não saturada ou diluída
- >1 solução supersaturada

CURVAS DE SATURAÇÃO E SUPERSATURAÇÃO DE SACAROSE



CSS > 1.0

CSS = 1.0

CSS < 1.0

# 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.

# 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);



---

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

---

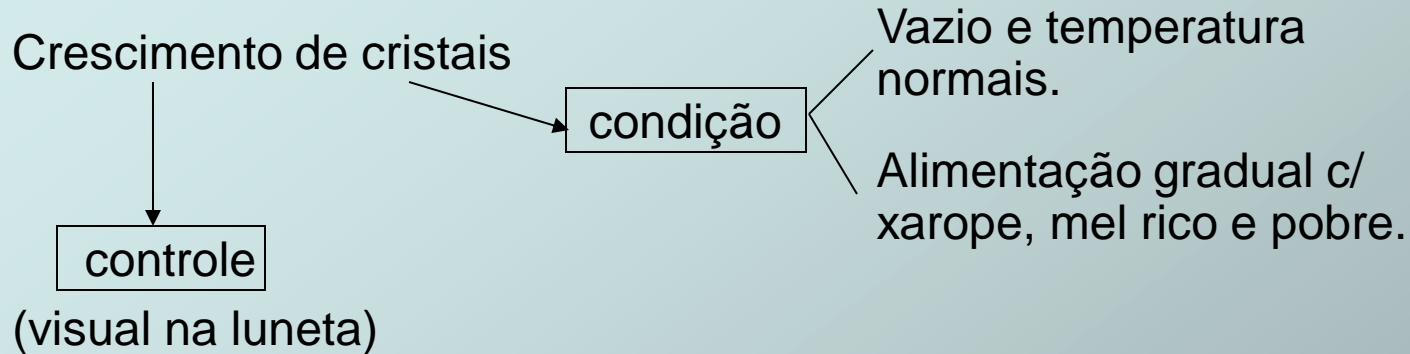
Métodos de  
formação  
dos cristais

- (1) **Espera**: aparecimento espontâneo de cristais em condição de supersaturação na zona hábil
  - Identificação do ponto: (a) aparelho de controle (índice de refração, elevação de temp., pureza, etc); (b) observação visual (velocidade de escorrimento do xarope no vidro da luneta).
- (2) **Choque**: obtida em condições de temperatura mais elevada (72°C) e sob vácuo ( $\pm 20'' - 50$  cmHg)  $\rightarrow$  temperatura cai rápido (60cmHg - t = 61°C) atingida a zona lábil e forma cristais
- (3) **Semeadura**: insere-se um número de núcleos , determinando-se e controlando o tamanho dos cristais. O crescimento dos cristais mantido na zona metaestável (CSS de 1,1 a 1,2).

---

### 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

---

**Cozimento**  
(tipo)

Intermitente

• 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 periféricos-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.

## SISTEMAS DE COZIMENTO

Diferentes sistemas visam {

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

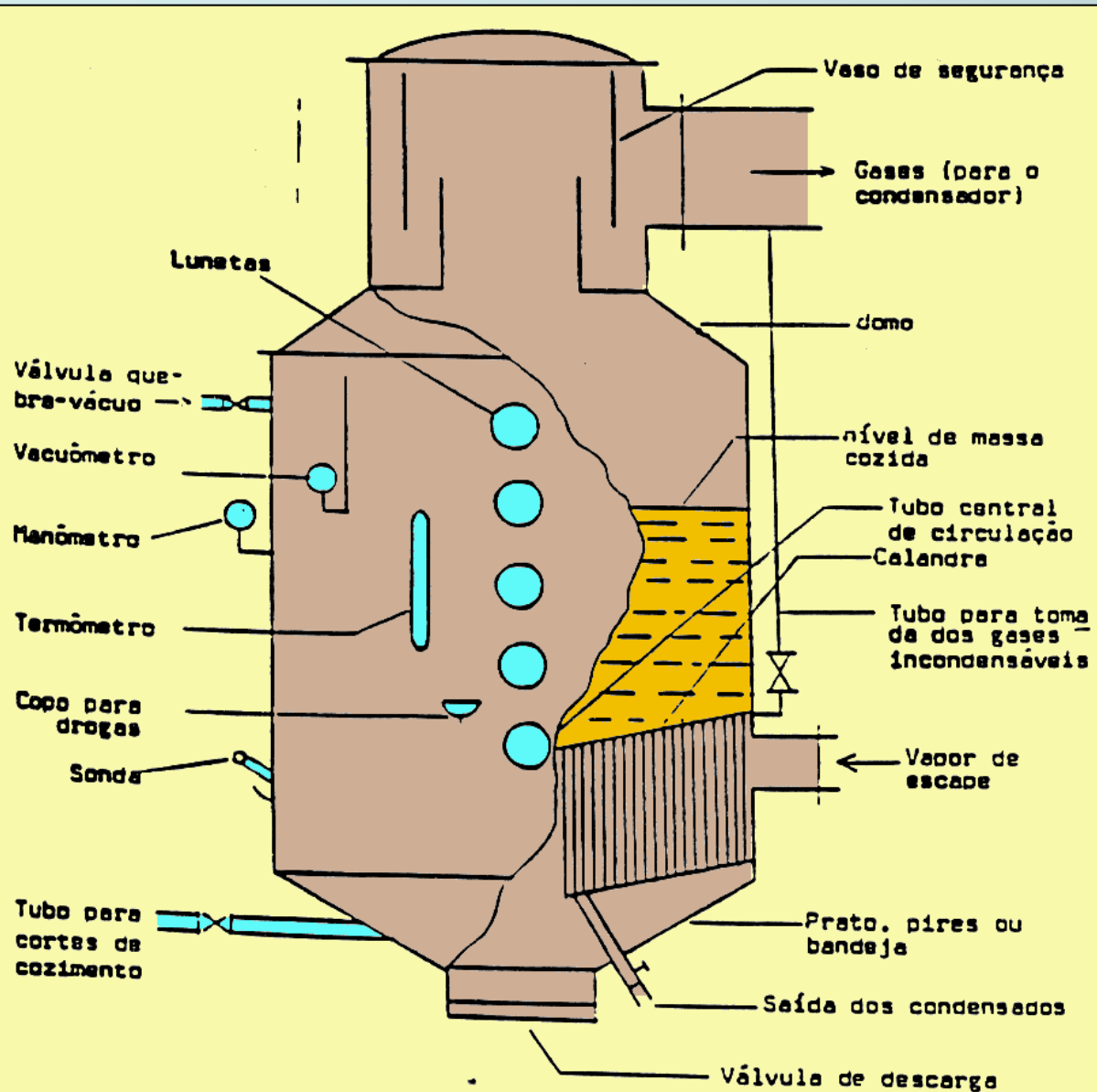
recirculação de méis causam {

- maior recuperação
- menor pureza do mel
- maior viscosidade

## CONDUÇÃO DE UM COZIMENTO

# EQUIPAMENTOS DE COZIMENTO

## DESCRIÇÃO DE UM COZEDOR INTERMITENTE CLÁSSICO



Usina Bom Retiro





# EQUIPAMENTOS DE COZIMENTO CLASSIFICAÇÃO

a) quanto a elementos de aquecimento { serpentina (A)  
calandria (B)  
placas (retas e circulares) (E-F)

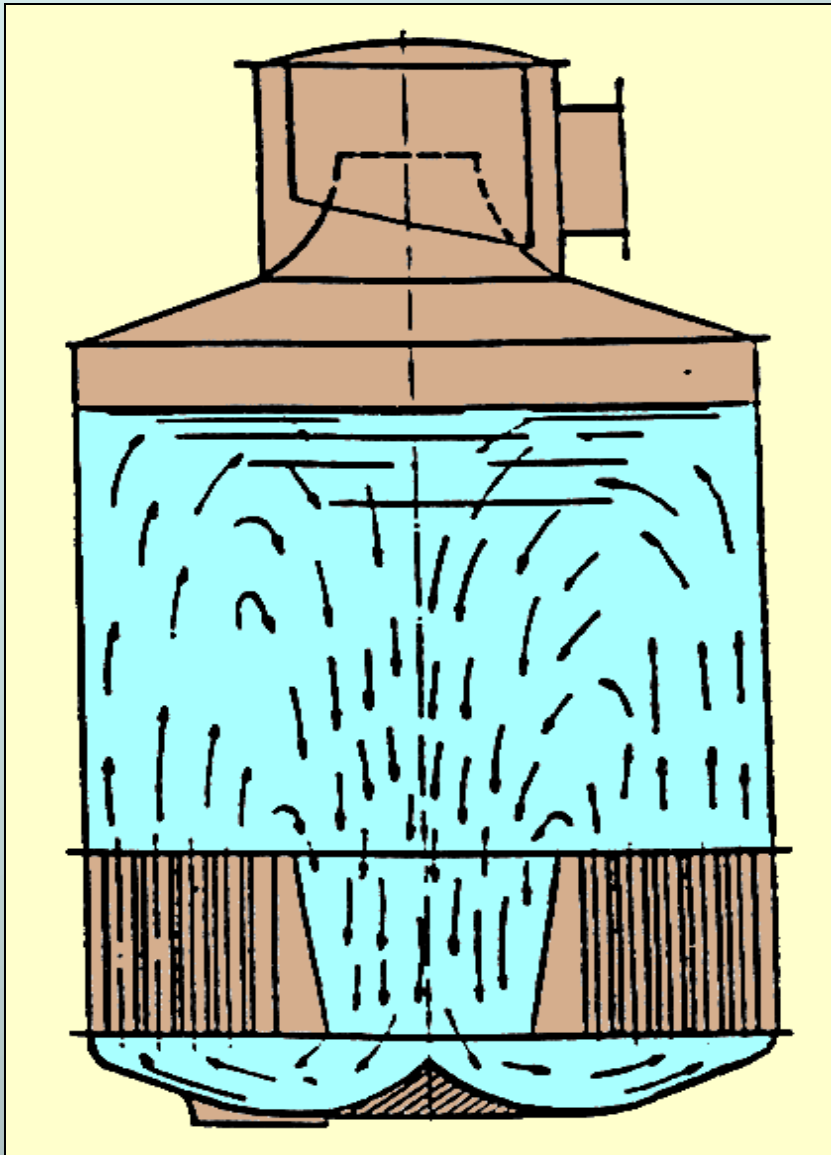
b) quanto ao tipo de calandria { fixa (B)  
flutuante (C)  
espelho plástico (B)  
espelho inclinado  
diametral (D)  
anel (H)

c) quanto a condução { Intermitentes  
contínuos (I)

d) quanto a circulação { Material  
Forçada (D)

e) quanto a configuração { Vertical  
Horizontal(G)

# Sistema de circulação da massa no cozedor



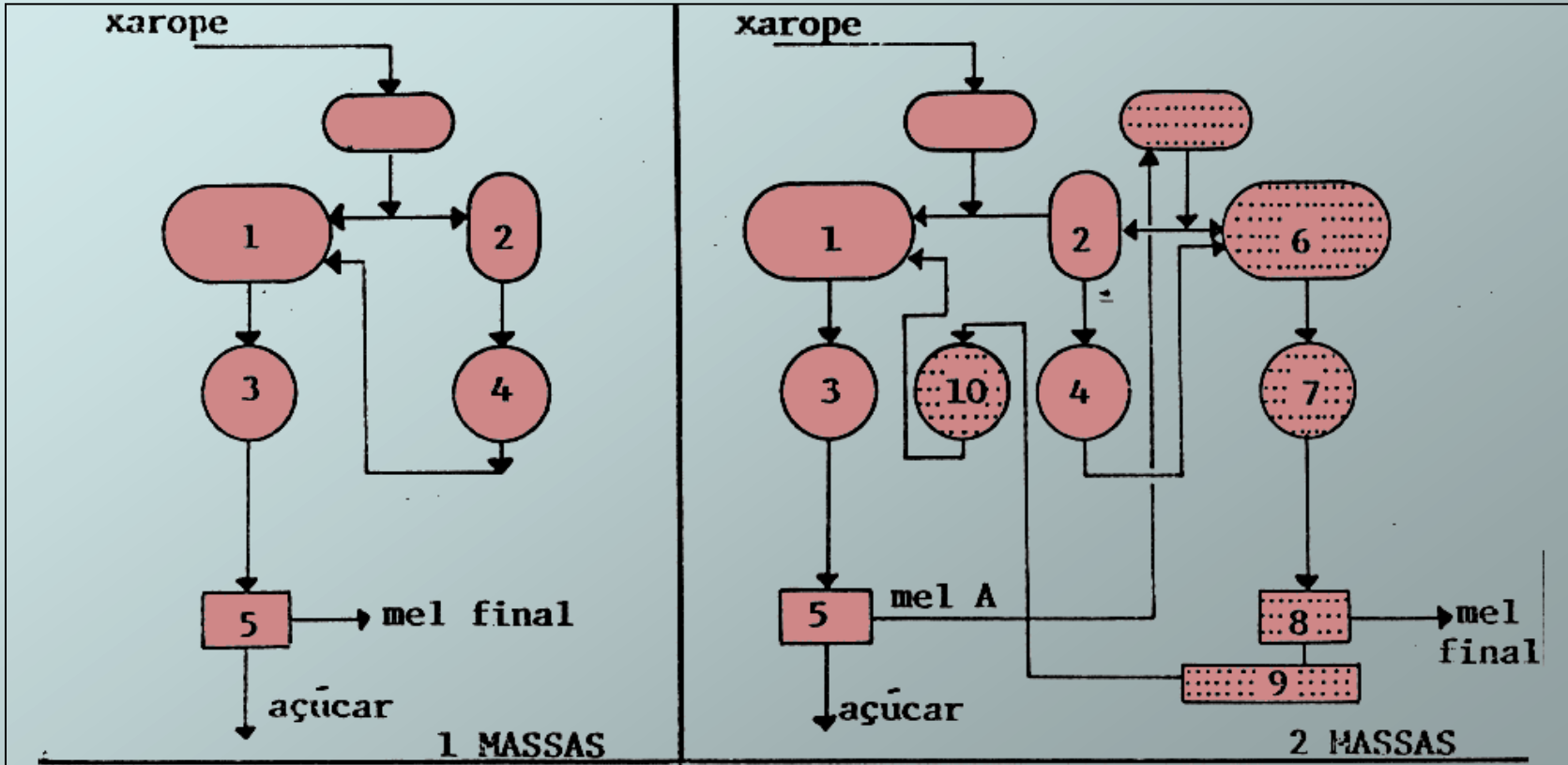
B) calandria fixa



# Esquema de cozimento

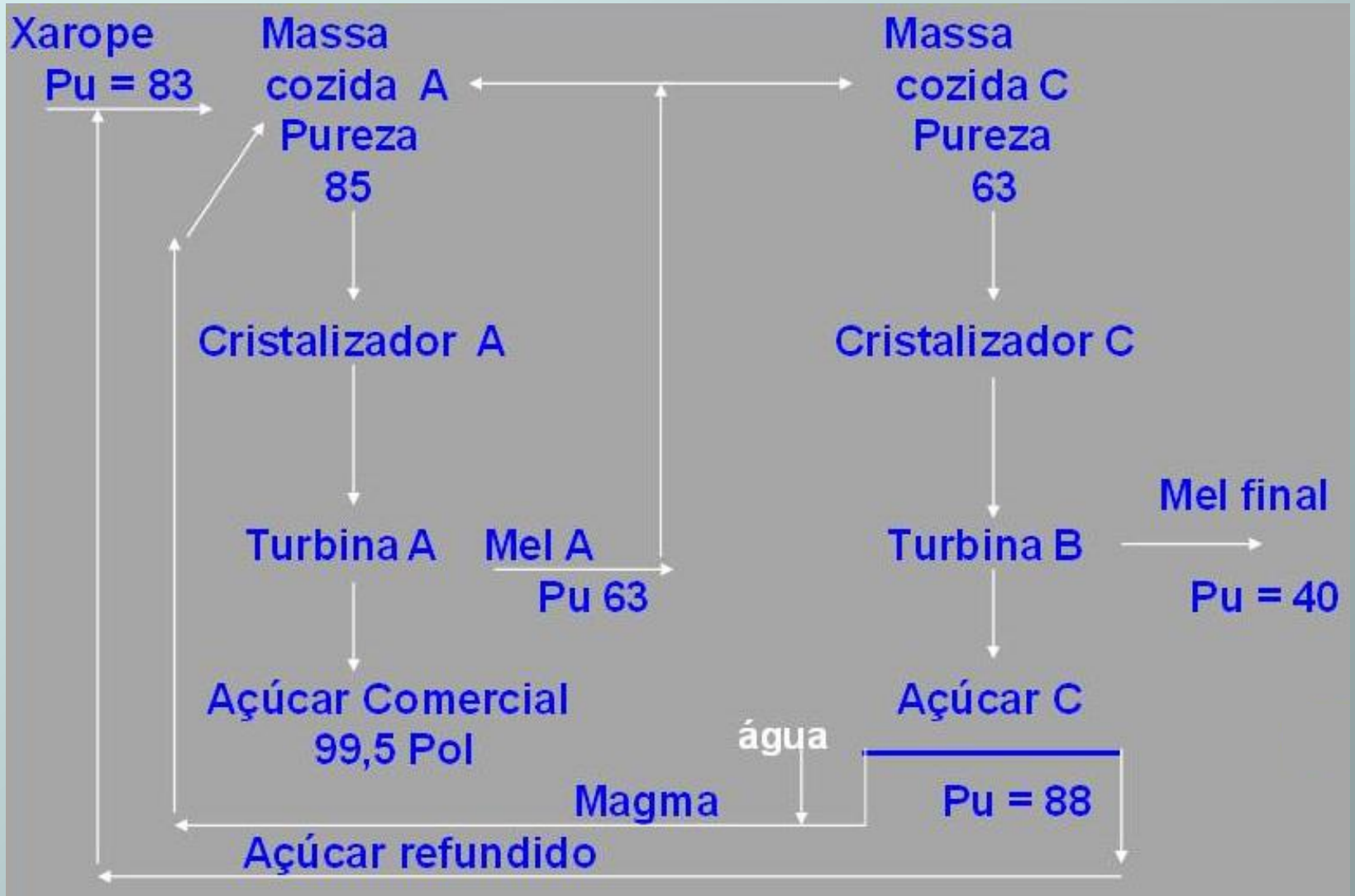
(Prática: 2, 3 e 4 massas)

↳ pouco retorno de méis p/ cozimento —————> fabricação do álcool  
 (↓ esgotamento ↓ custo)

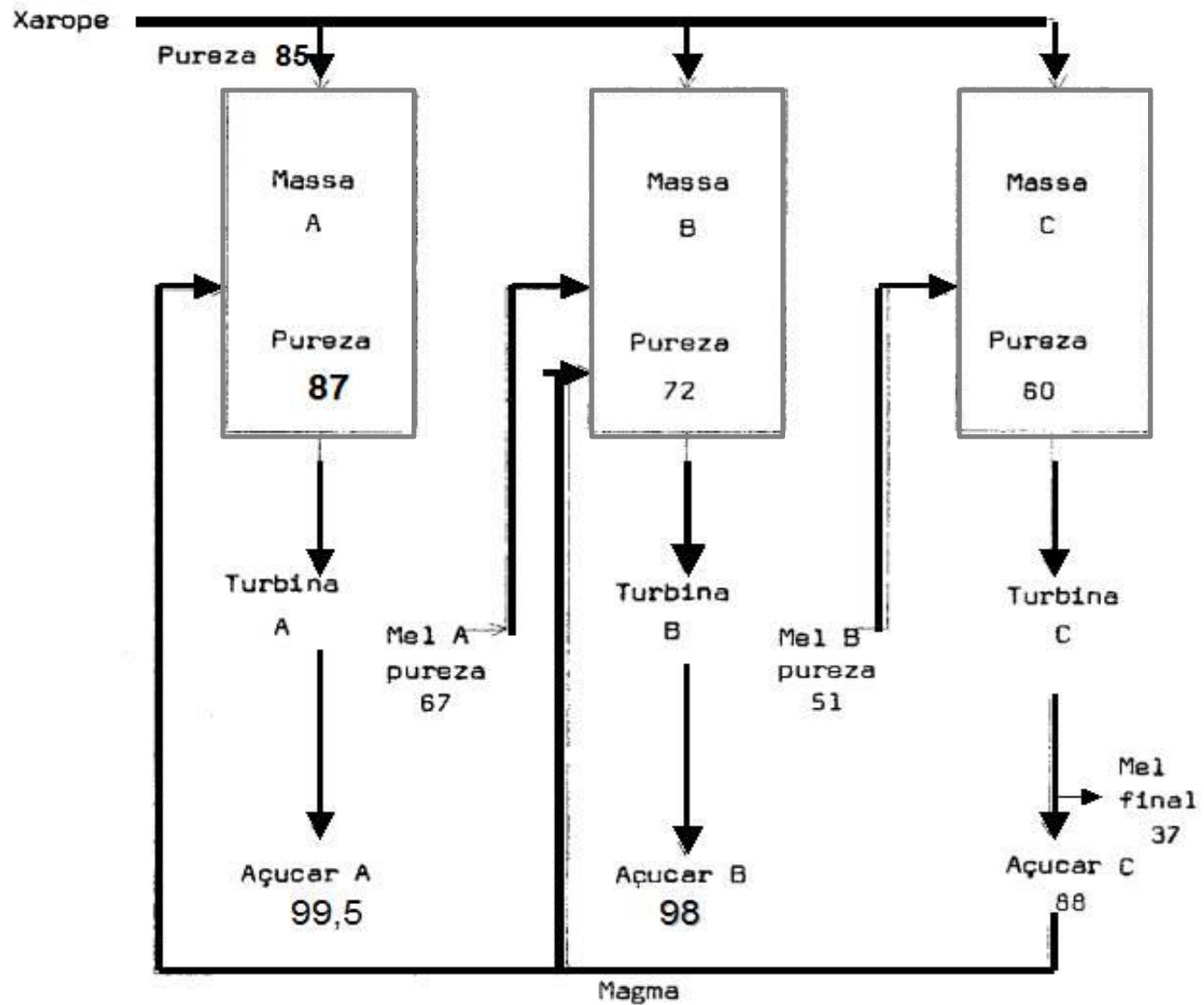


- |                       |                           |                         |                          |
|-----------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------|
| 1 - Vácuo contínuo 1a | 4 - Sementeira            | 7 - Cristalizador       | 9 - Magmeiro             |
| 2 - Vácuo de pé       | 5 - Centrífuga automática | 8 - Centrífuga contínua | 10 - Sementeira de magma |
| 3 - Cristalizador     | 6 - Vácuo contínuo 2a     |                         |                          |

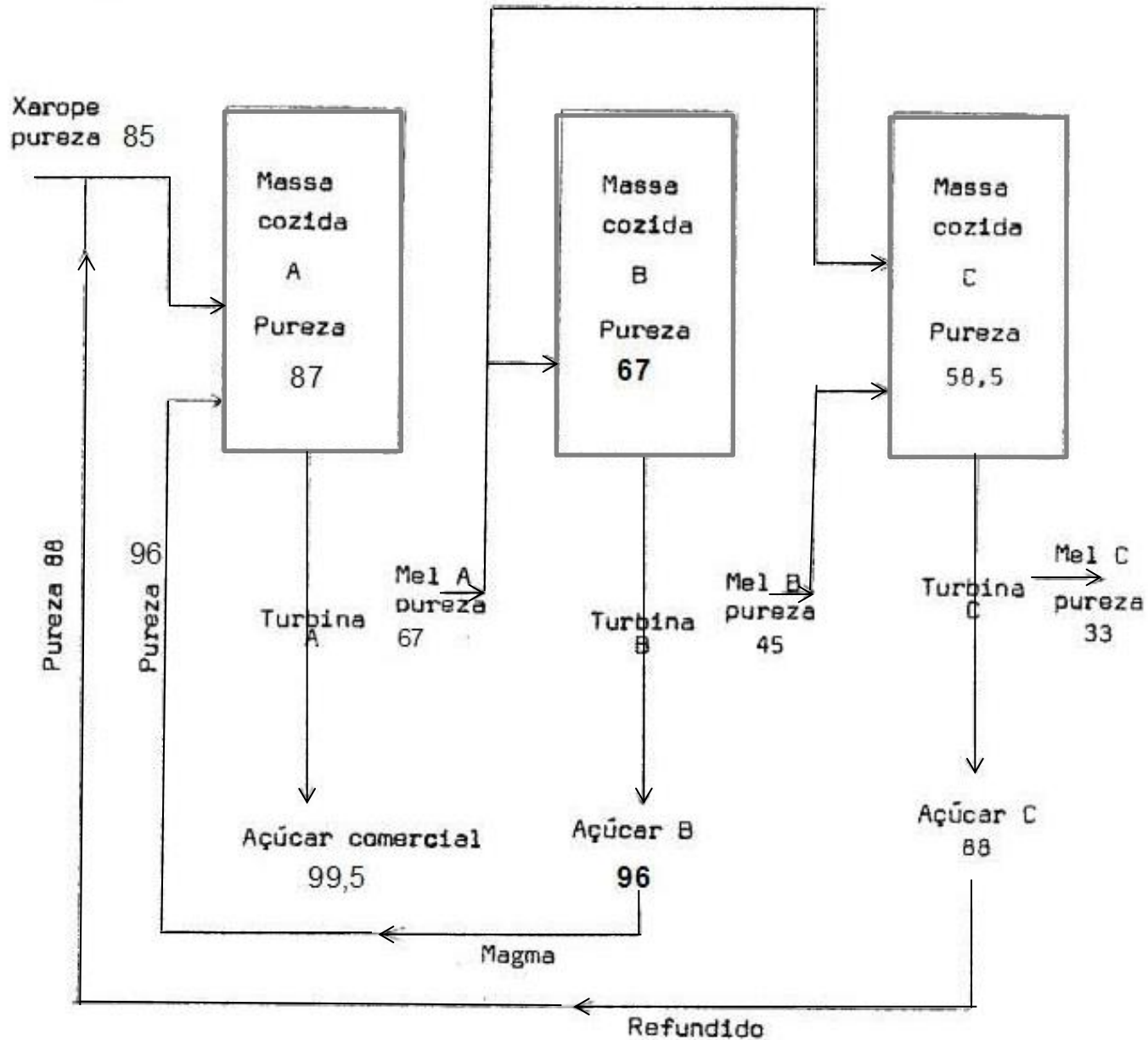
# ESQUEMA DE DUAS MASSAS COM RECICLURAÇÃO DE MÉIS



## Esquema de três massas e dois açúcares



# Esquema de três massas e um só tipo de açúcar



## **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?

a) calor residual mantido no interior da massa concorre para caramelização do açúcar,

b) resfriamento lento, o CSS tende a aumentar – soldaria os cristais em bloco único,

c) licor-mãe próximo do cristal → se esgota (com a paralização do crescimento)

## Conseqüências:

### (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

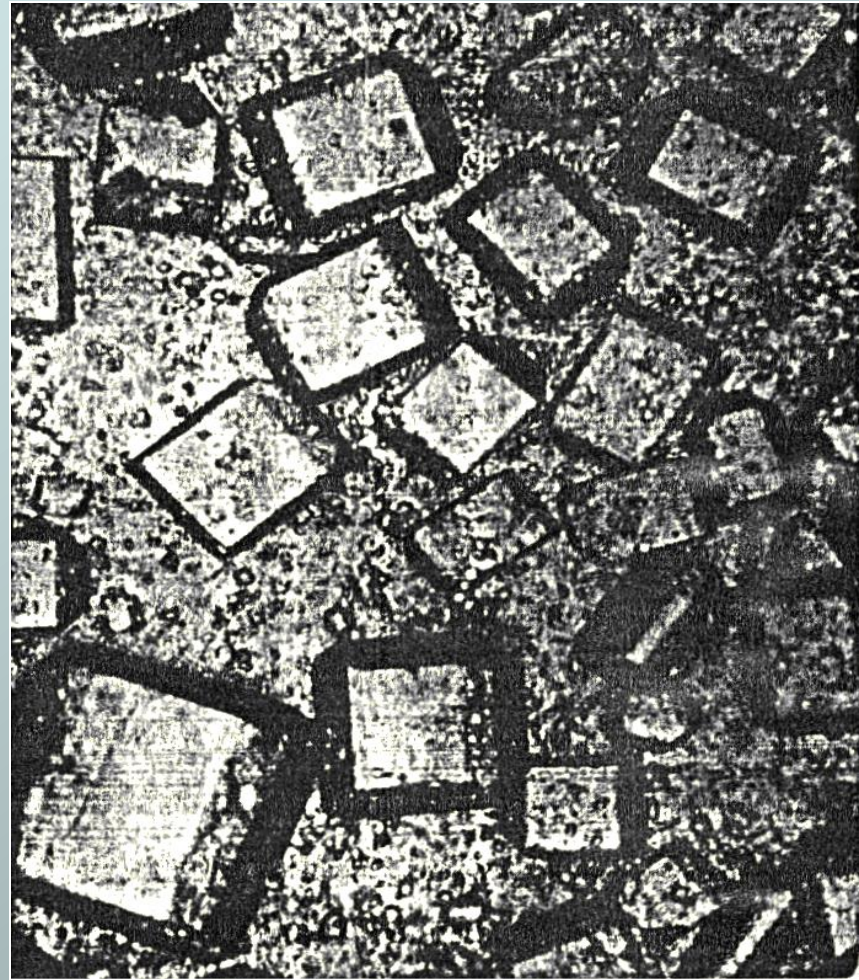


- Formação do “falso grão”  
→ tendência: ↑CSS no licor-mãe  
(geração)  
→ dificuldades na centrifugação

- (4) Escurecimento da Massa Cozida.  
→ dificuldades nas operações posteriores.  
→ qualidade do açúcar.

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°C inicial → t°C final  
(65 a 75°C)      (45 a 38°C)

## Controles - Cuidados Básicos:

- a) massas de elevada pureza → abaixo de 40 a 38°C → velocidade de deposição → ocorrência de conglomerados;
- b) massa menor pureza → resfriamento lento → não formar conglomerados e cristais geminados → maior n° de cristalizadores.

PAYNE: 3°C por hora

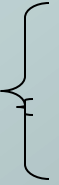
BAIKOW: 0,6°C por hora (inicial), passando p/ 1,1 a 1,7°C/hora.

## 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

Tempo prolongado  
ou encurtado



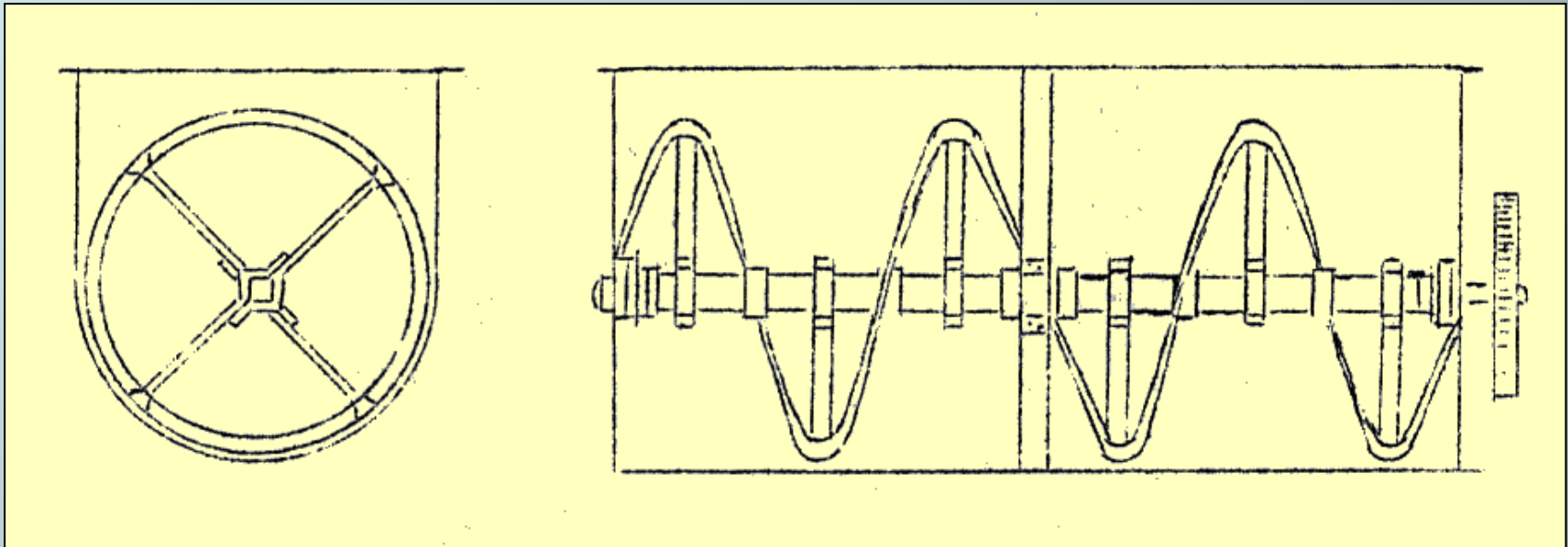
Função  
(fatores)

- Brix de massa cozida;
- Grau de exaustão do licor-mãe;
- teores de cinzas e de açúcares redutores;
- tipo de cristalizadores.

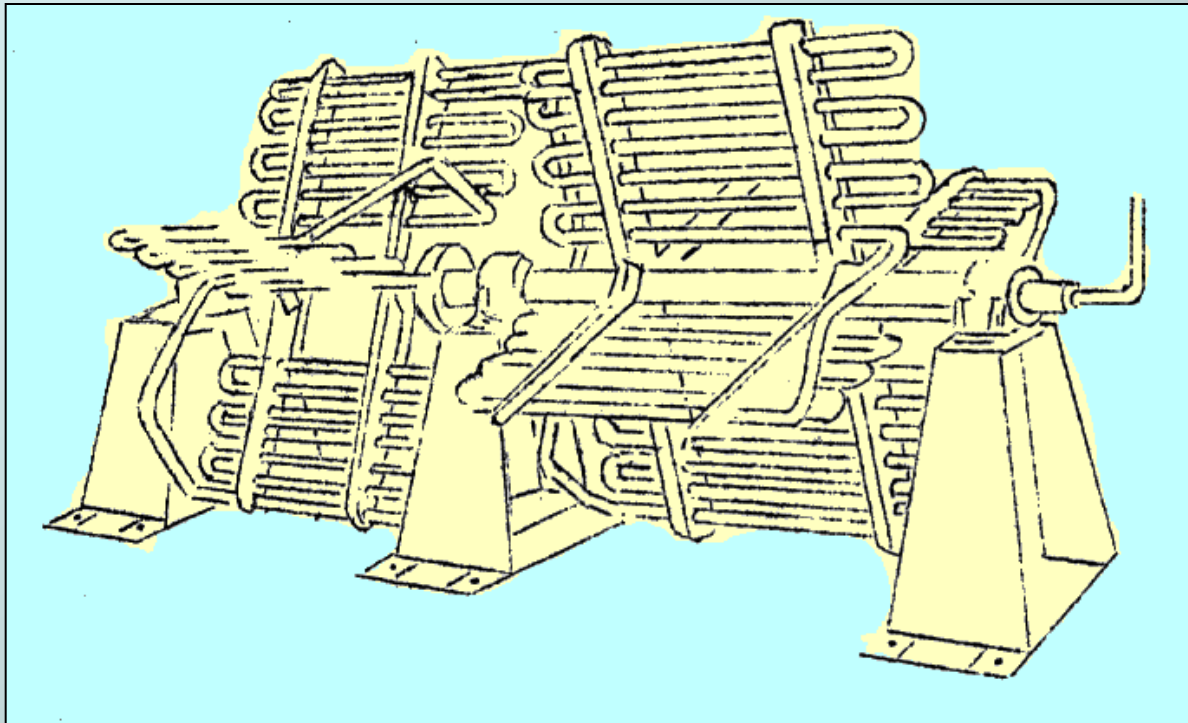
# TIPOS DE CRISTALIZADORES

## 1. Cristalizadores de Resfriamento Natural

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



## 2. Cristalizadores de resfriamento forçado



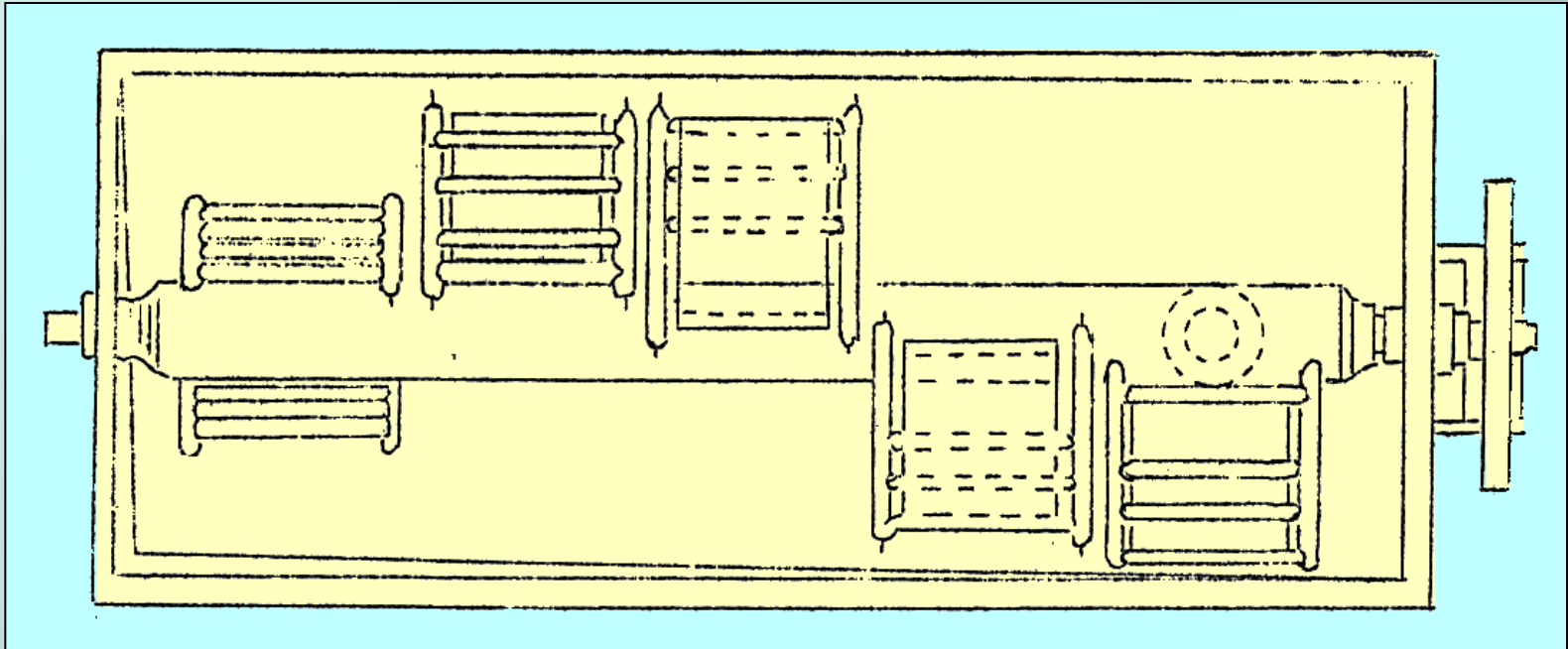
### Resfriamento forçado:

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

→ Agitadores

$\Delta$  tempo de retenção: 70 a 80%

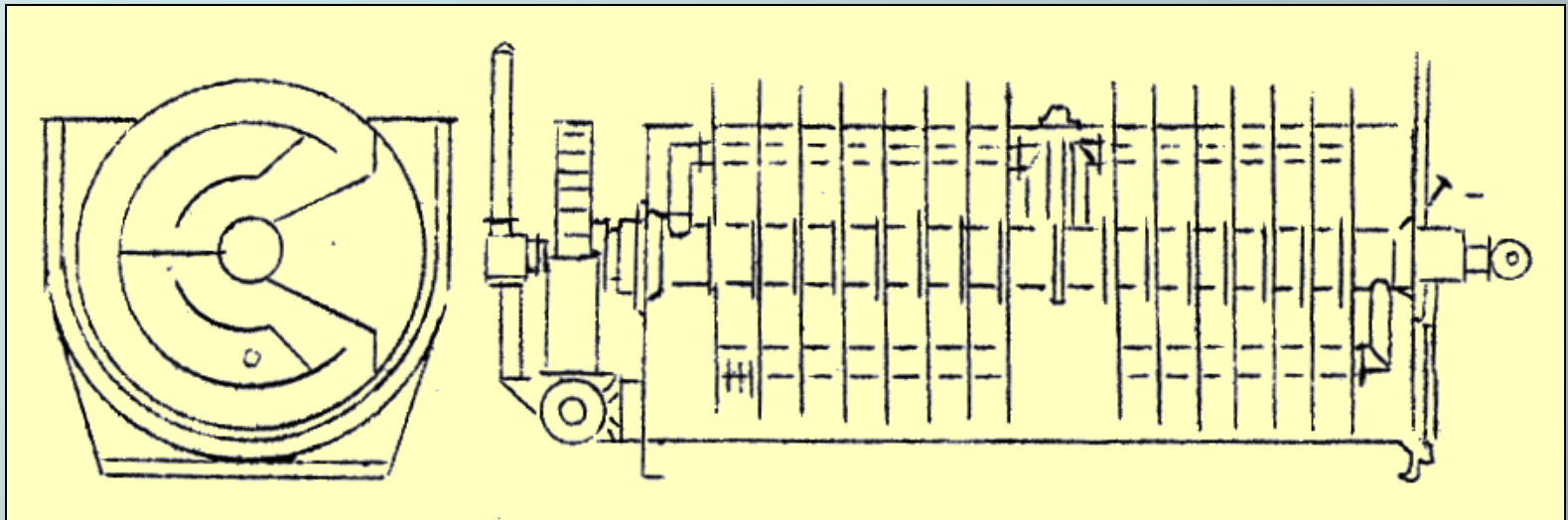
## (A) Cristalizador BLANCHARD



### Aspectos técnicos:

- coeficiente de transmissão de calor:  $2,2$  a  $2,4 \text{ kcal/m}^2/\text{h}/^\circ\text{C}$   
(varia: volume de massa e velocidade de circulação de água)

(B) Cristalizador WERKSPOOR



## Detalhes técnicos:

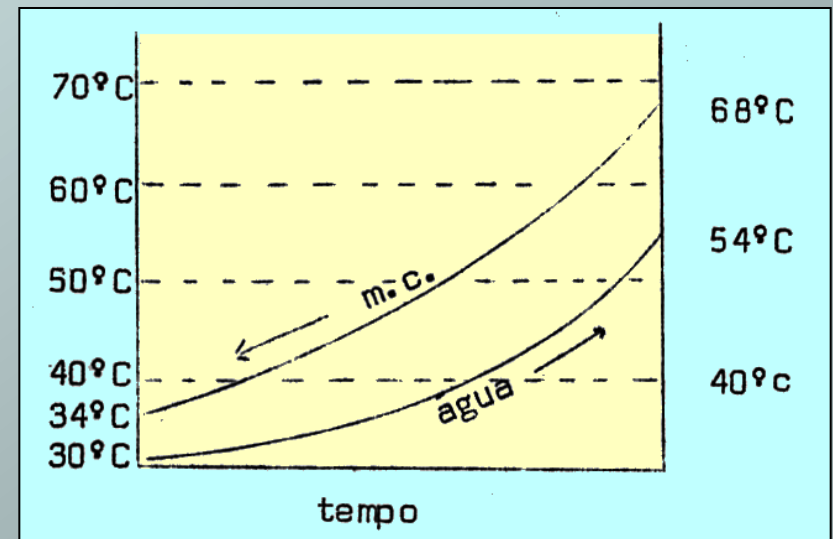
→ 1. temperatura de resfriamento (Tromp):

queda de temperatura

vs.

caminhamento da massa

→ 2. Dimensões: comprimento =  $3,5 \times \phi$ ;





### Detalhes técnicos:

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

$k = 34$  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 -  $S/V = 7$  a  $10 \text{ m}^2/\text{m}^3$  ou  $0,7$  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.

## **4. CENTRIFUGAÇÃO DA MASSA COZIDA**

Condução operacional das centrífugas  
e sistemas de centrifugação

# 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.

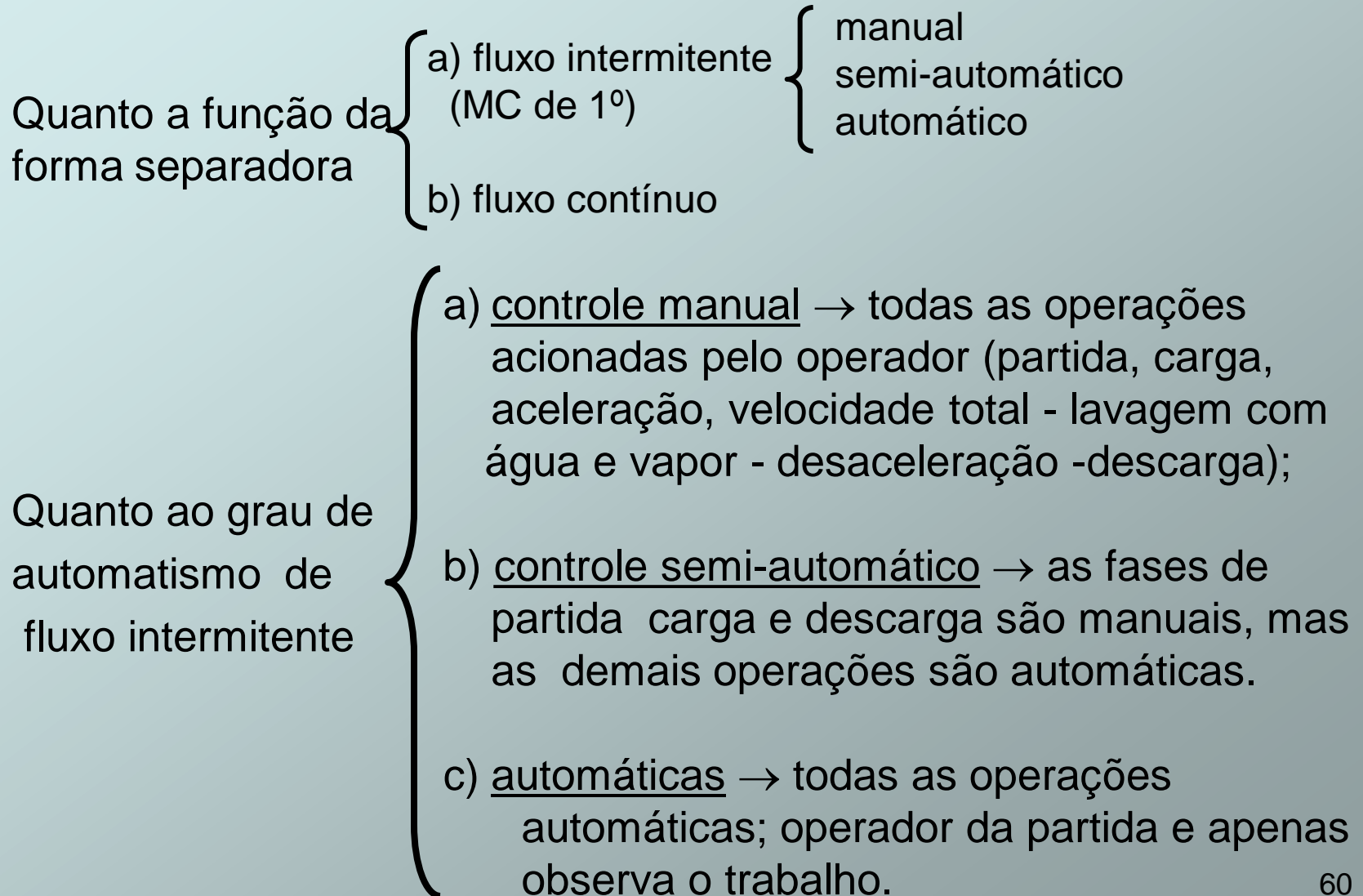
**MC** → semi-sólida, viscosa, escura e que apresenta diferentes graus de pureza em função da riqueza dos materiais empregados na sua elaboração.

→ Separação dos cristais  
de sacarose do mel { - gravidade  
- centrifuga

Centrífugas 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.

# CLASSIFICAÇÃO DAS SEPARADORAS



# CENTRÍFUGAS DE FLUXO INTERMITENTE

**Princípio de funcionamento:** baseado no emprego da força centrífuga e na de gravidade entre si, massa cai no fundo da centrífuga e procura as paredes, quando se inicia a separação do mel.

$$\text{Força centrífuga} = F_c = m \cdot W^2 \cdot R$$

$F_c = \text{kgf}; \quad m = \text{kg}; \quad W = \text{velocidade angular radianos e} \quad R = \text{raio centrífuga}$

$$\text{Força gravidade} = F_g = m \cdot g$$

$F_g = \text{kgf}; \quad m = \text{kg}; \quad g = \text{aceleração da gravidade, } 9,81\text{m/s}^2$

# 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 {

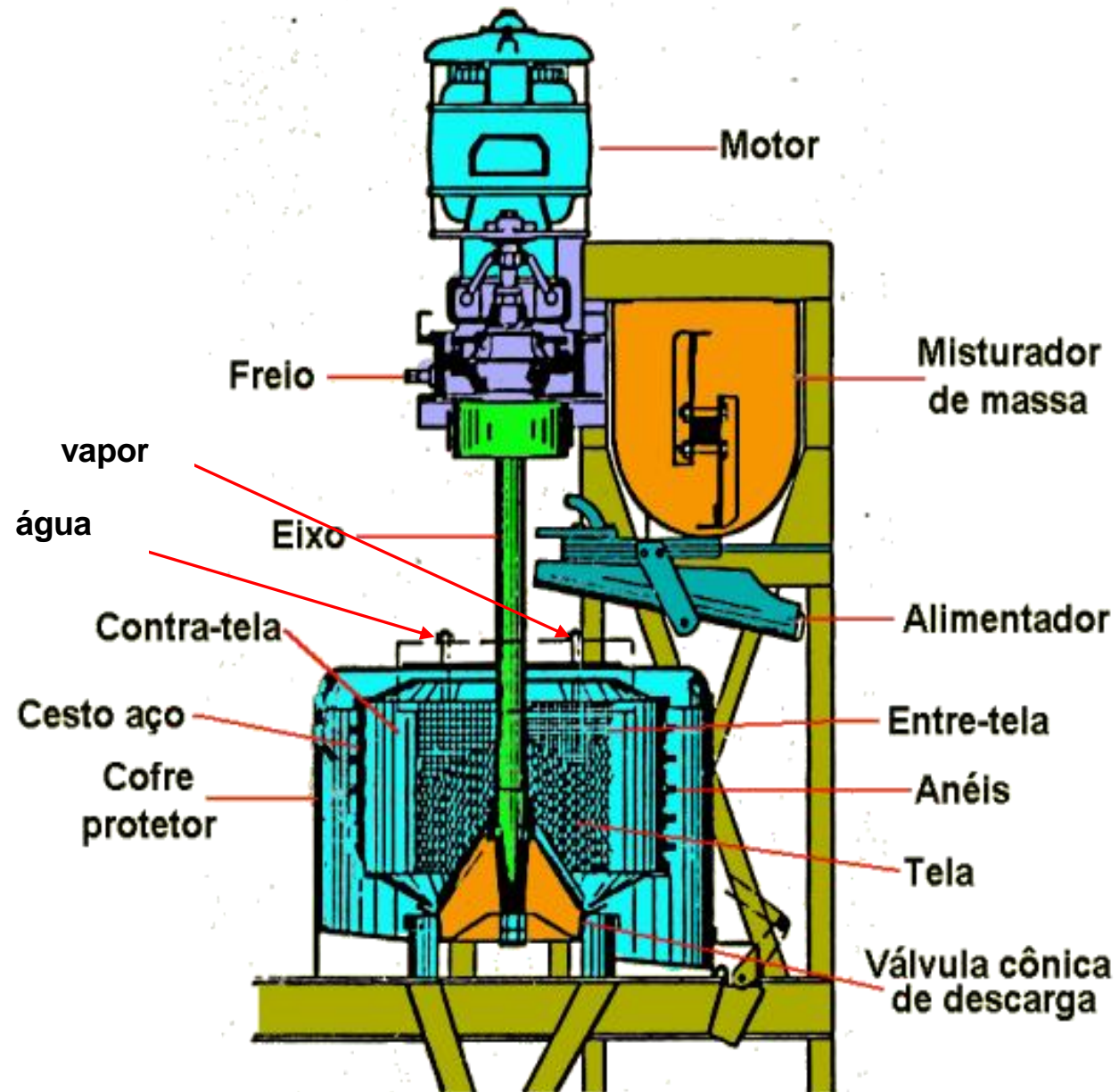
- Água
- vapor

## b) Centrífuga

Constituição do equipamento

- mecânico
- pneumático
- elétrico

Descrição –  
centrífuga convencional



### c) Conductor de açúcar

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

componentes { Mesa retangular  
barra de sustentação  
bica jogo motor ligado a excêntrico



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

Conductor de açúcar  
(bica de jogo)  
sob a centrífuga



## 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  $\approx 90^{\circ}\text{C}$ /120kg massa cozida.
- lavagem com vapor - pressão 2 a 5 kg/cm<sup>2</sup>
- desaceleração
- descarga – 50 rpm
- limpeza da tela - água e vapor

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.  $t1 \rightarrow 0,5 \text{ a } 1 \text{ min}$
- c) velocidade total → velocidade plena (1000 a 1800rpm) com lavagem do açúcar com água e vapor;  $t2 \rightarrow 0,5 \text{ a } 1 \text{ min (lavagem c/ água)}$   
 $t3 \rightarrow 1,0 \text{ a } 2 \text{ min (lavagem c/ vapor)}$
- d) parada → frenagem do cesto e reduz para 200 rpm;  $t4 \rightarrow 0,5 \text{ min}$
- e) descarga → velocidade reduz para 50 rpm e a descarga do açúcar (manual ou mecânica).  $t5 \rightarrow 0,5 \text{ min}$

**$\Sigma t = 3 \text{ a } 5 \text{ min}$**

Definições - mel rico  
mel pobre

## 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