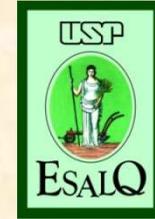




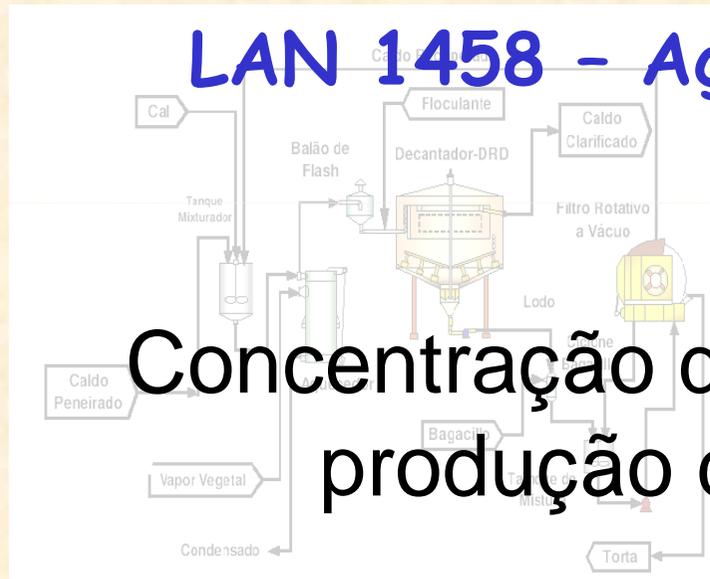
**Universidade de São Paulo – USP**



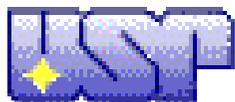
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Esalq  
Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição - LAN

## LAN 1458 – Açúcar e Álcool

Concentração do caldo para a produção de açúcar



**Prof. Antonio Sampaio Baptista**



# Introdução

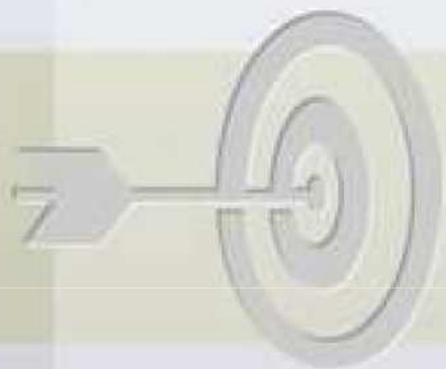


## EVAPORAÇÃO

### Composição Aproximada do Caldo Misto



## EVAPORAÇÃO



### Objetivo

**Eliminar a água** presente no caldo clarificado para que o açúcar se concentre até a **formação de cristais**.

### Duas etapas:

#### Evaporação

Propriamente dita

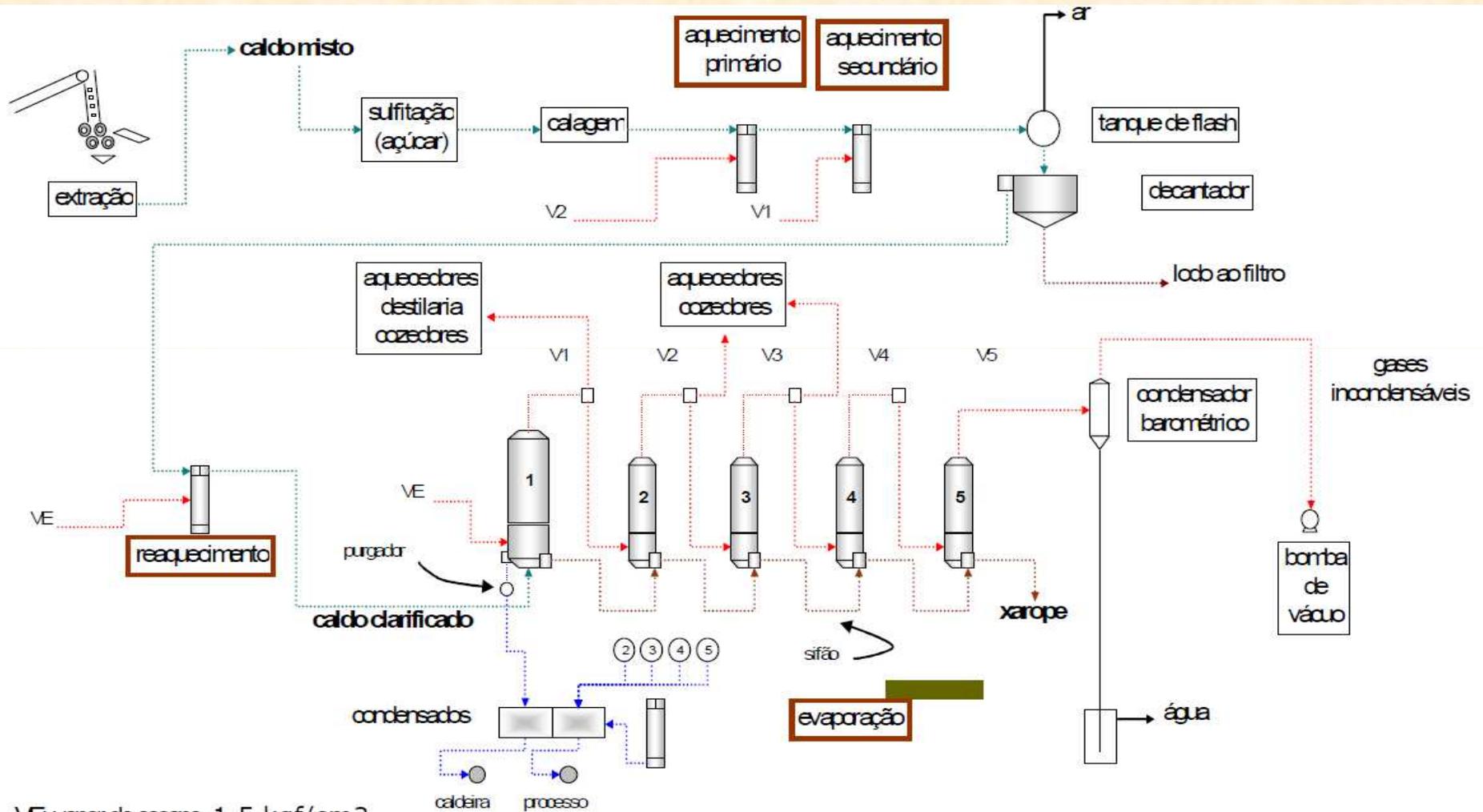
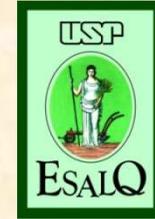
15° a 55-70° brix

#### Cozimento

55 a 70° a  
92 a 95° brix



# Introdução



VE vapor de escape 1,5 kgf/cm<sup>2</sup>

V1 a V5: vapor vegetal do efeito correspondente



## 1. INTRODUÇÃO

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

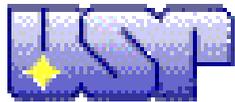
Remoção água - 2 fases -  
- evaporação - sistema de múltiplos efeitos (xarope 55-65°Brix)  
- cozimento - sistema de simples efeito

Evaporação contínua → Pré-evaporação  
→ Evaporação  
cozimento → em batelada ou intermitente  
→ contínuo

**temperatura caldo decantado → mais próxima da temperatura da caixa**

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.



# Introdução



## EVAPORAÇÃO

Quantidade de água a ser evaporada:

**Evaporação**

~ 750 kg/TC  
(~ 88%)

**Cozimento**

~100 kg/TC

Energia

# Evaporador

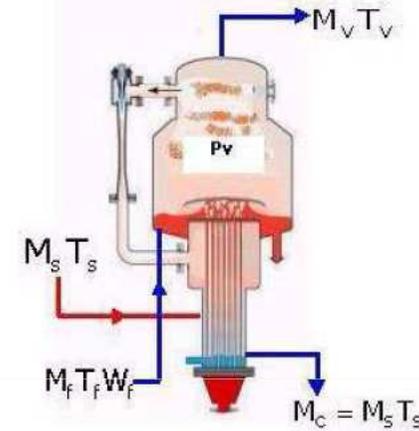
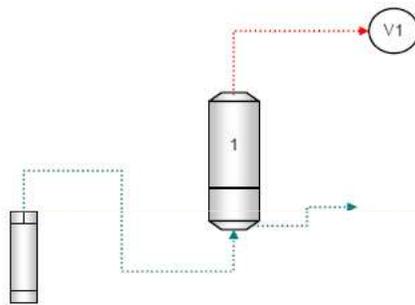
Energia

Meio de transferência de calor.

CTC, 2011

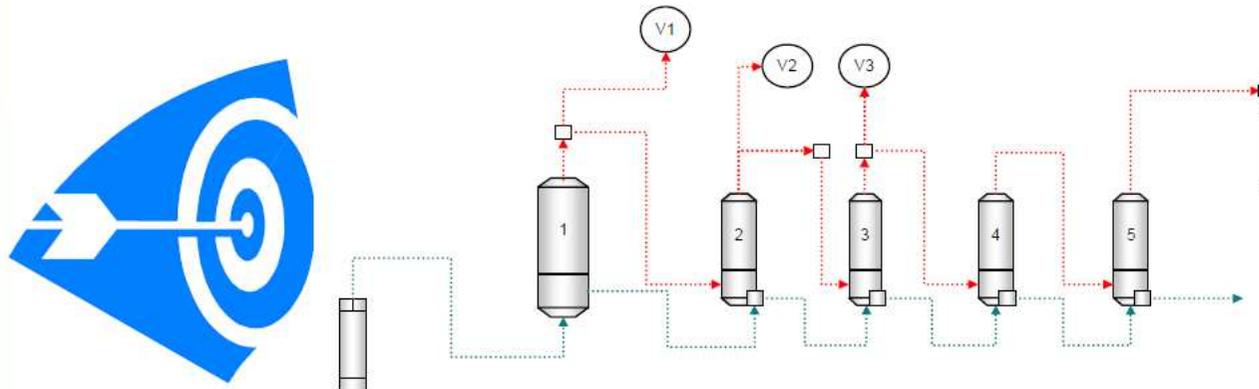
## ARRANJOS MAIS FREQUENTES DAS PLANTAS DE EVAPORAÇÃO

**Simple efeito;** usado em destilarias autônomas



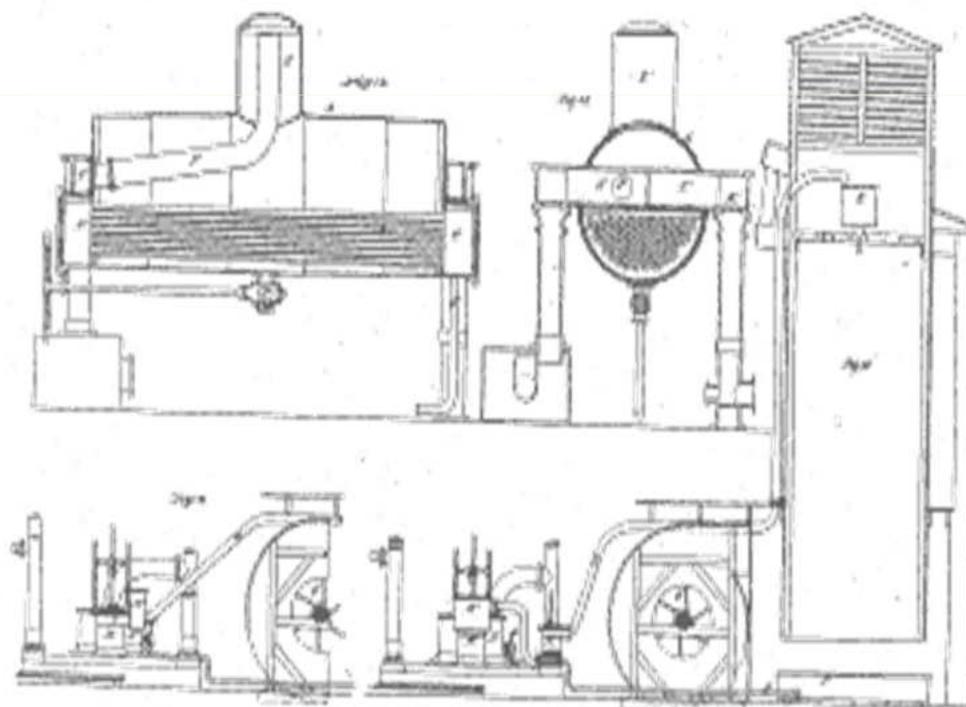
EVAPORADOR SIMPLES EFEITO

**Multiplo efeito;** usado em fabricas de açúcar e em destilarias autônomas em condições especiais



# NORBERT RILLIEUX

## Princípios termodinâmicos da Evaporação



## 2.2. PRINCÍPIOS DE EVAPORAÇÃO EM MÚLTIPLO-EFEITO (Fundamentos)

- ❖ Norbert Rillieux → foi o primeiro a definir os princípios básicos de evaporação - 1848.



### a) Primeiro Princípio:

“Em um evaporador de múltiplos-efeitos, cada quilograma de vapor, usado no primeiro vaso, evaporará tantos quilogramas de água quantos forem os números de vasos.”

quantos evaporadores posso ter ???



## a) Primeiro Princípio:

Diante deste princípio, tem-se que:

- no simples-efeito: 1 kg de vapor evapora 1 kg de água;
- no duplo-efeito: 1 kg de vapor evapora 2 kg de água;
- com n vasos: 1 kg de vapor evapora n kg de água.



## b) Segundo Princípio:

“ A extração de vapor de qualquer unidade de um evaporador de múltiplo-efeito para ser usado em outro setor da fábrica conduz a uma economia que será igual ao número de quilogramas de vapor extraído, dividido pelo nº de vasos do conjunto e multiplicado pelo nº de ordem que o corpo ocupa”

Exemplificando-se, que  $W$  o peso de vapor,  $M$  o nº de vasos e  $N$  o nº de ordem que o vaso ocupa no conjunto de evaporação, a economia de vapor  $E$  será igual a:

$$E = \frac{W \cdot N}{M}$$



$$E_{1^\circ \text{ vaso}} = 1 \cdot \frac{1}{4} = \frac{1}{4} \quad \dots \quad E_{3^\circ \text{ vaso}} = 1 \cdot \frac{3}{4} = \frac{3}{4}$$

- **Prática** → utiliza-se vapores dos vasos → aquecimento parcial do caldo ou outros fins. Entretanto, últimos vasos →  $t$  °C mais baixas → sangria difícil.



## c) Terceiro Princípio:

“Em todo aparelho no qual se condensa vapor, é necessária extrair continuamente o acúmulo de gases incondensáveis que ficam, internamente”.

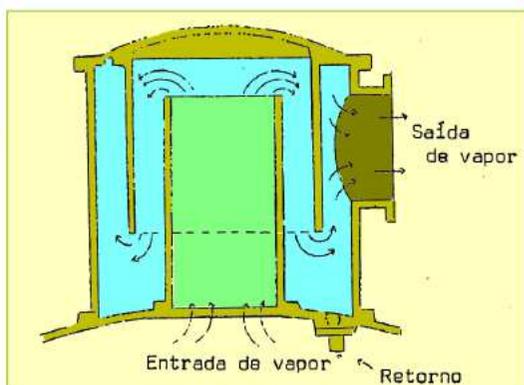
- **Prática** → instalam nos evaporadores dispositivos mecânicos para a extração dos gases incondensáveis.

## CONSTRUÇÃO DE UM MÚLTIPLO-EFEITO

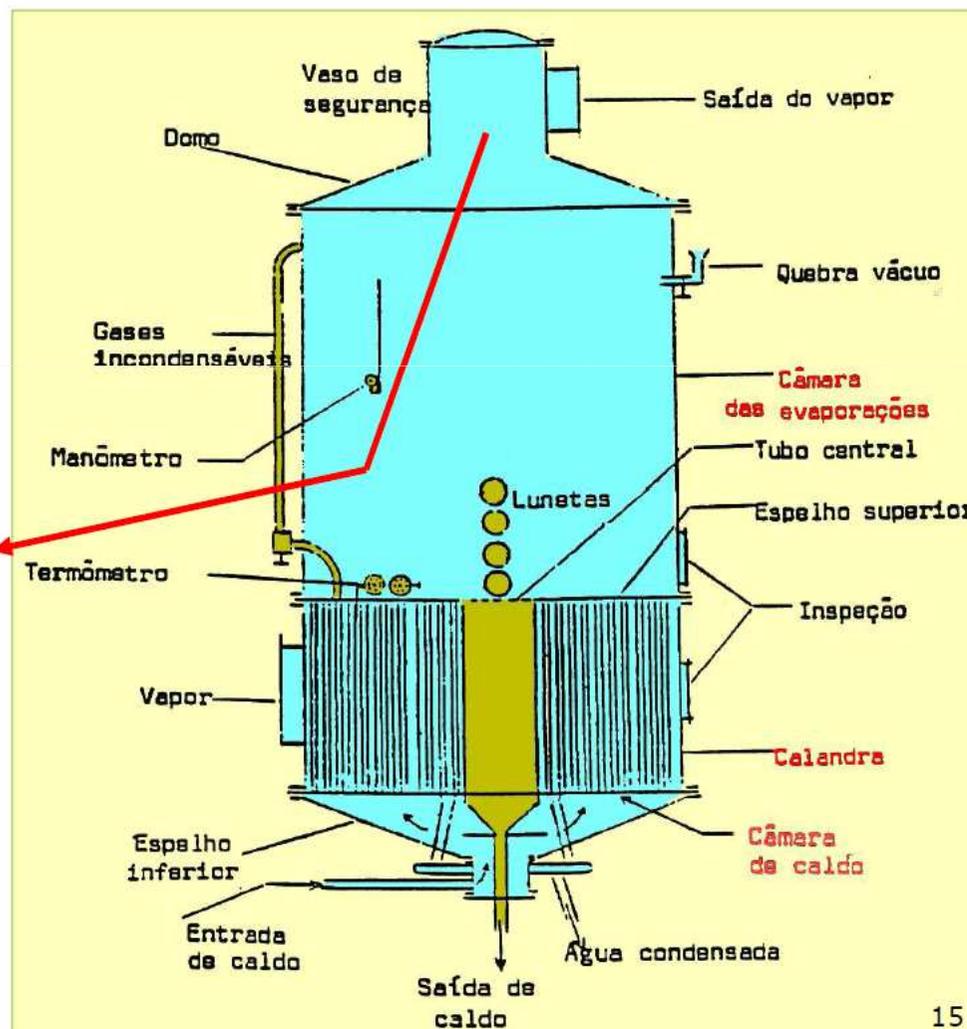
Facilidade de construção  
corpos do sistema  
(forma, altura, capacidade)

Aparelho  
4 partes

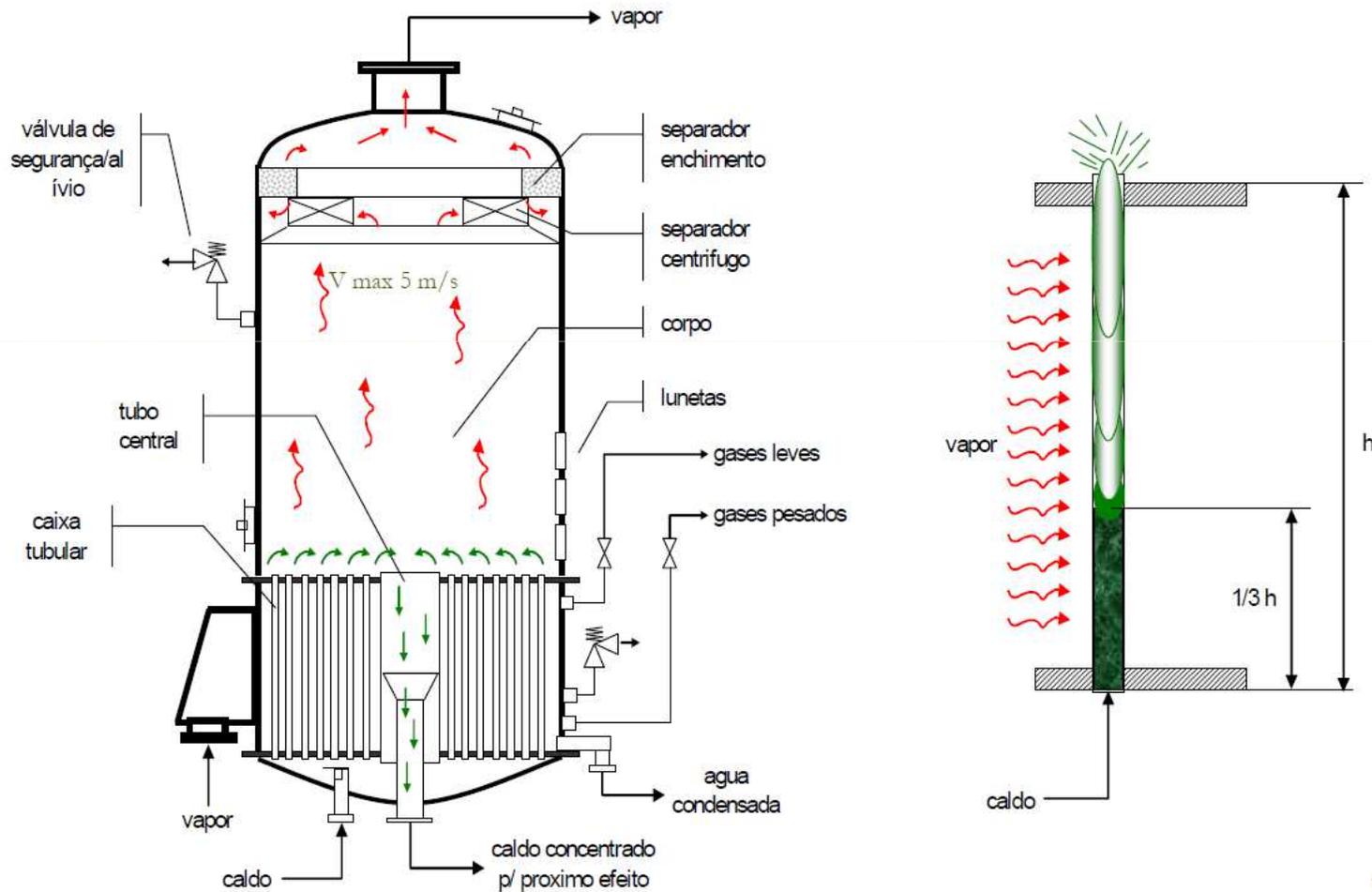
- Fundo
- Calandra
- Corpo cilíndrico
- Cabeça



Detalhe da cabeça

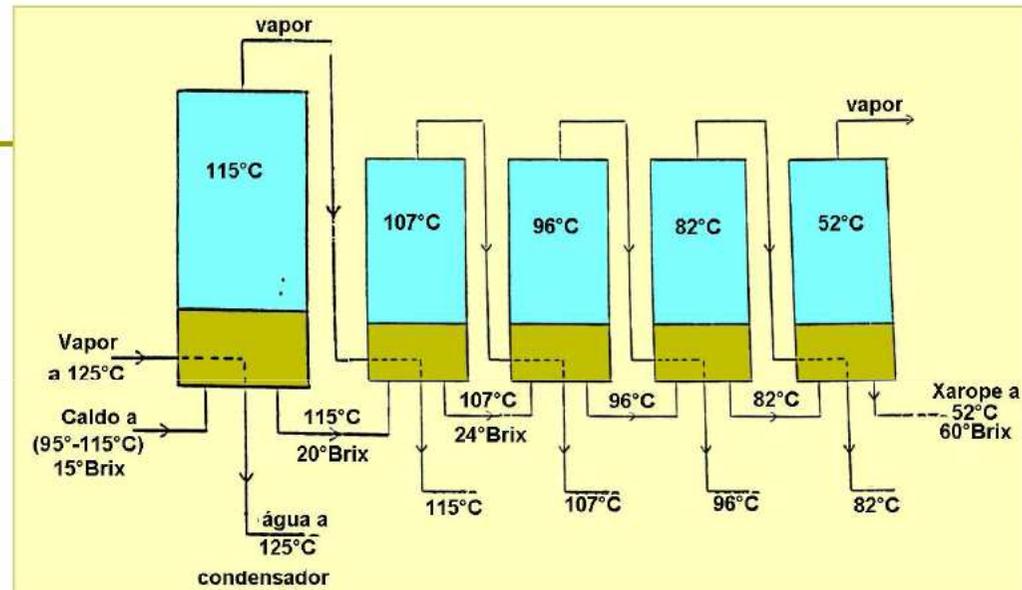


## 3.5 - Principais características construtivas dos evaporadores (Roberts)



16

## 2.5. FUNCIONAMENTO DE UM MÚLTIPLO-EFEITO



### Relações entre pressões, temperaturas e Brix.

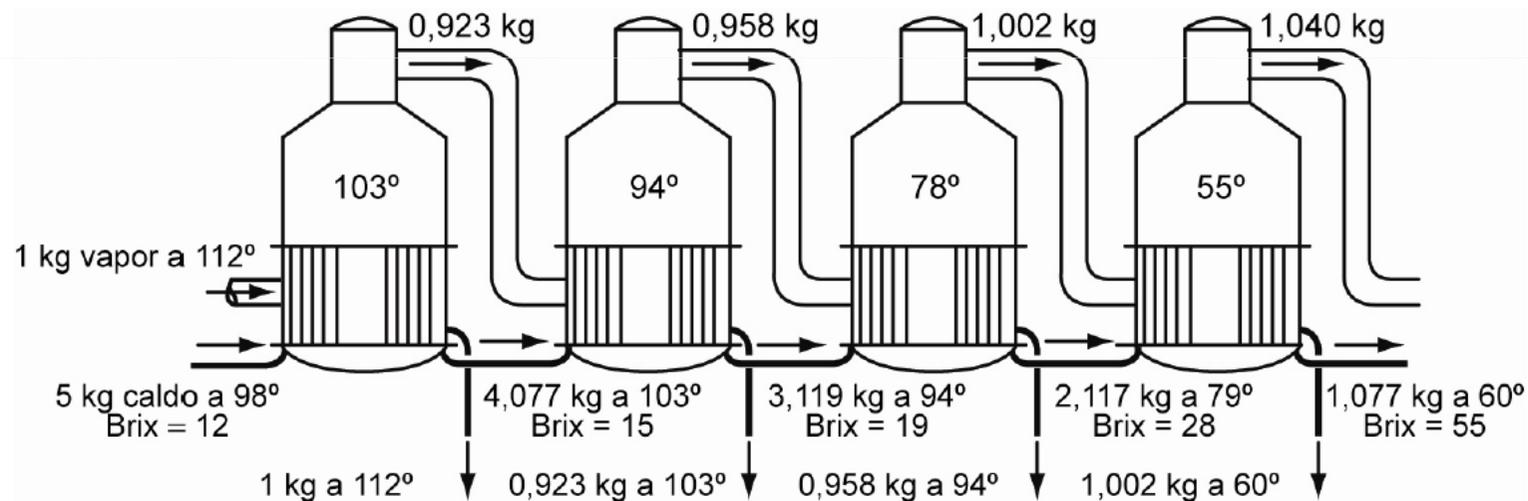
		Pré	1° V	2° V	3° V	4° V
Calandra	P (Kg/cm <sup>2</sup> )	1,33	0,69	0,28	—	—
	V (cmHg)	—	—	—	10	37
	T (°C)	125	115	107	96	82
Câmara gases	P (Kg/cm <sup>2</sup> )	0,69	0,28	—	—	—
	V (cmHg)	—	—	10	37	66
	T (°C)	115	107	96	82	52
Caldo Brix	Entrada	15	20	24	29	38
	Saída	20	24	29	38	60



# Evaporadores de múltiplos-efeitos



## BALANÇO TÉRMICO E DE MASSA

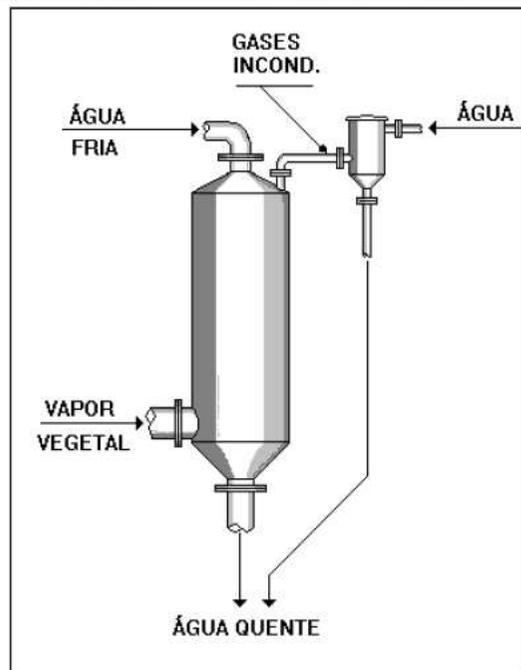


## PRODUÇÃO DE VÁCUO

→ Condensação do vapor produzido na última caixa de evaporação

### Condensadores Barométricos + Bomba de Vácuo ou Multi-jato

Menor consumo de água – 35 – 40 l/kg vapor a ser condensado



- Produção de vácuo de até 26" Hg ou 0,16 kgf/cm<sup>2</sup>
- Funcionamento por efeito **cascata**
- Necessidade de torre de resfriamento de água (circuito fechado)
- Temperatura da água - 32°C (grande influência no consumo de água)
- Necessidade de bomba de vácuo ou multi-jato para retirada dos gases incondensáveis
- Instalação – 11 – 12 m (tubo de selo hidráulico)

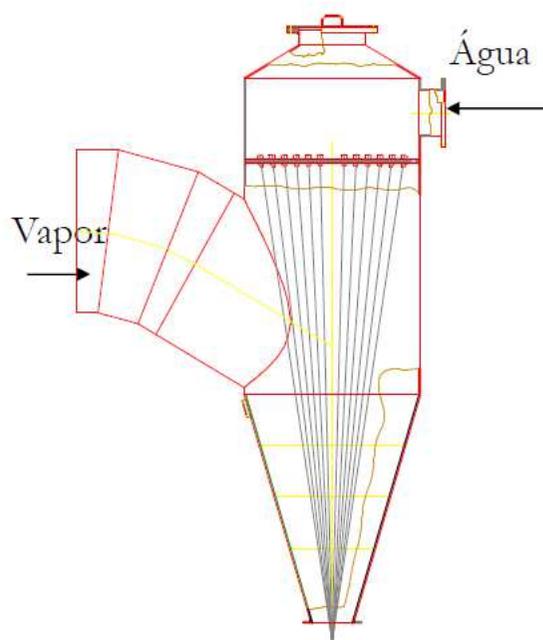
37

## PRODUÇÃO DE VÁCUO

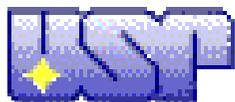
→ Condensação do vapor produzido na última caixa de evaporação

## Condensadores Multi-jato

Maior consumo de água – 40 - 45 l/kg vapor a ser condensado



- Produção de vácuo de até 26" Hg ou 0,16 kg/cm<sup>2</sup>
- Funcionamento por injeção de água a 1 kgf/cm<sup>2</sup> (Bicos injetores) – Arraste dos gases incondensáveis
- Necessidade de torre de resfriamento de água (circuito fechado)
- Temperatura da água - 32°C (grande influência no consumo de água )
- Instalação – 11 – 12 m (tubo de selo hidráulico)



# Efeitos da evaporação do caldo



## TRANSFORMAÇÃO

### Transformações Físico-químicas no Caldo Durante a Evaporação

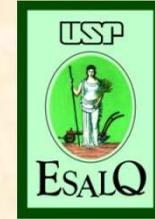
Durante o processo de evaporação, mudanças físico-químicas ocorrem afetando a composição e propriedades dos sólidos dissolvidos no caldo.

### Formação de Cor

- Formação de cor é maior no primeiro corpo onde a **temperatura** é mais alta. O limite máximo de temperatura deve ser respeitado para minimizar este efeito.
- Formação de cor também é causada por deficiente **circulação** do caldo na calandra e altos tempos de retenção.
- Quando o **vácuo** é baixo, a temperatura do sistema sofre uma elevação, aumentando a formação de cor.



## Cozimento do xarope

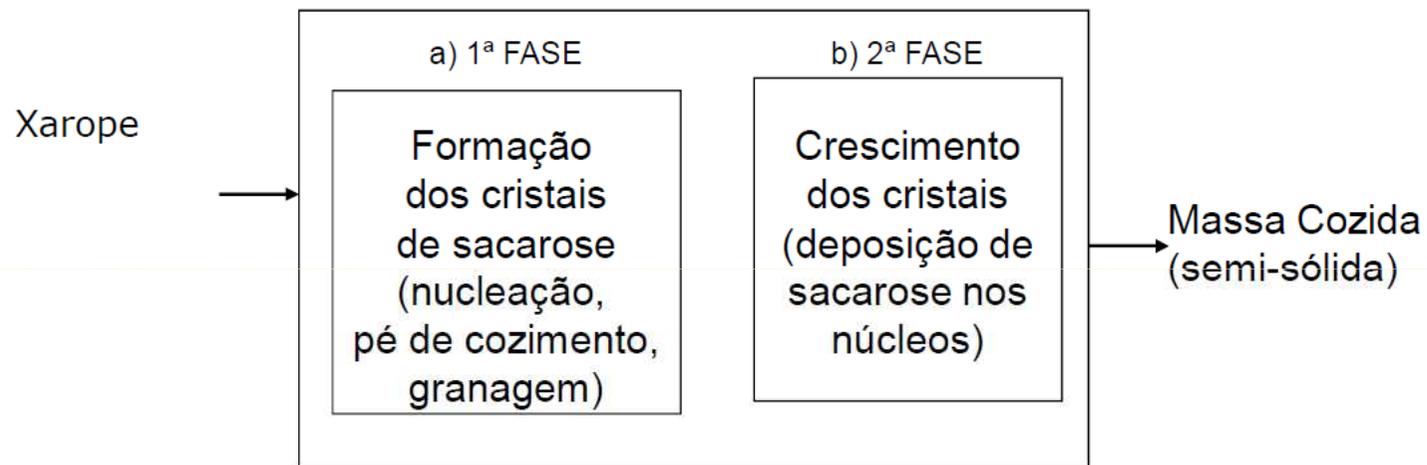


# Cozimento (?)

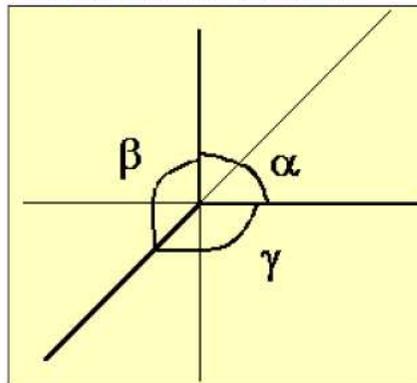


## COZIMENTO DO XAROPE

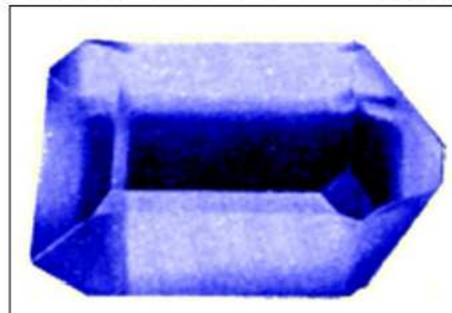
### INTRODUÇÃO

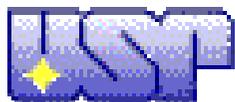


Sacarose cristaliza



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





# Cozimento



## SOLUBILIDADE DE SACAROSE

### Solubilidade da sacarose pura em água

Soluções classificadas como:

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

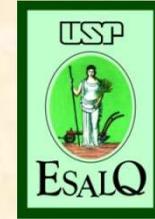
- caldo cana, xarope e méis - soluções diluídas
- cristalização - ocorre - solução super-saturadas
  - Massa Cozida

- A sacarose, a semelhança de outras substâncias químicas, é altamente solúvel em água. Esta solubilidade, entretanto, sofre influência dos sais minerais e do açúcar redutor. De modo geral, os sais minerais tendem a aumentar a solubilidade da sacarose, enquanto o açúcar invertido tende a diminuir.

- Sais minerais: substâncias melacigênicas positivas
- Açúcares redutores: substâncias melacigênicas negativas



# Cozimento do xarope



## Solubilidade da sacarose em soluções impuras

FÓRMULA - Coeficiente de solubilidade da sacarose em solução impura ( $C_s$ ):

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

$C_s$  = coeficiente de solubilidade da solução impura;

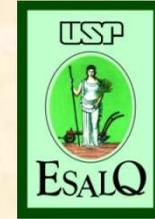
$S^0$  = massa de sacarose, dissolvida em 100 partes de água, de uma solução saturada impura, pureza R, e temperatura  $t^\circ\text{C}$ .

$S'$  = 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. (melacigênico 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.



# Cozimento



## Soluções Supersaturadas de Sacarose

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

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

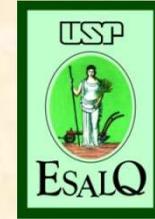
$S''$  = peso da sacarose (partes), dissolvidas em 100 partes de água, de uma solução supersaturada, de pureza R e a temperatura  $t^{\circ}\text{C}$

$S'$  = 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



# Cozimento



## 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)

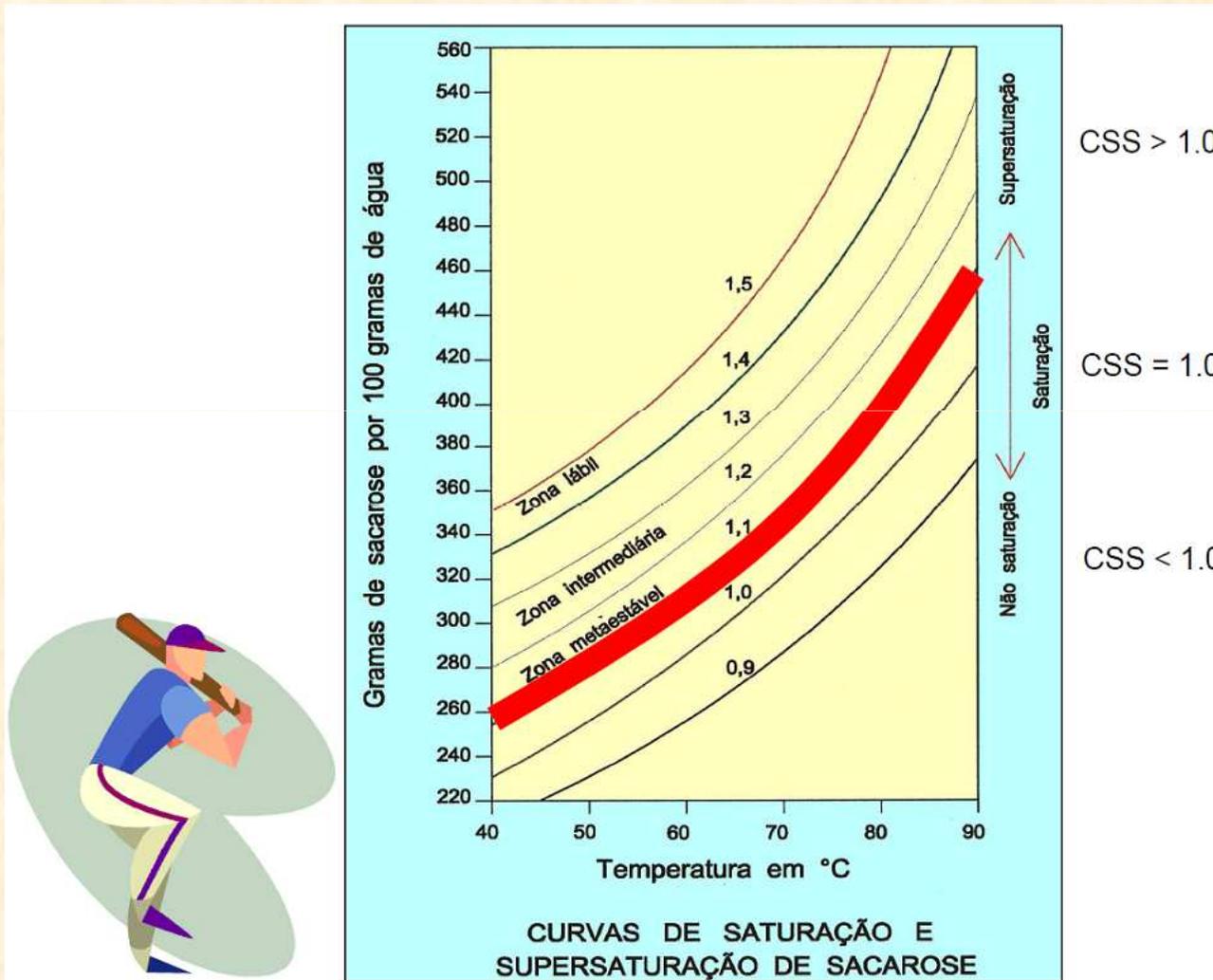
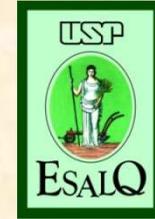
- ❑ crescimento dos cristais existentes;
- ❑ formação de novos núcleos ou de falsos cristais (falso grão);
- ❑ tendência do CSS atingir o limite superior da zona metaestável.

### 3 - Zona lábil (CSS: $\geq 1,3$ )

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



# Cozimento

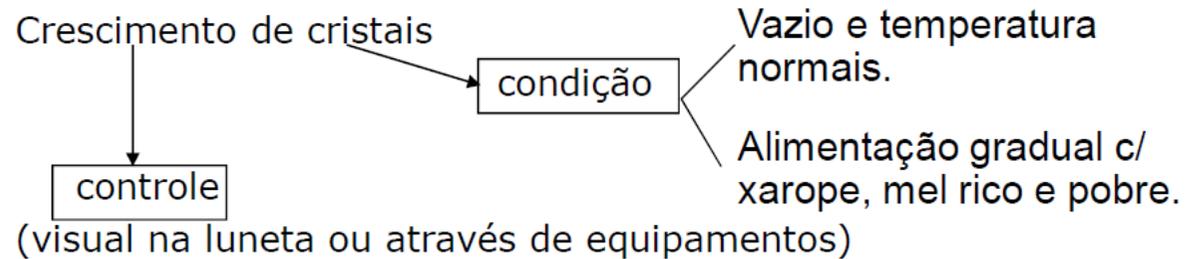


## b) Nucleação da sacarose

### 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 ( $\pm 24''$  - 50cmHg) → temperatura cai rápido (60cmHg - t = 61°C) atingida a zona lábil e forma cristais
- (3) **Indução:** conc. zona intermediária introduz com pó de sacarose (pé de açúcar), por ocorrer a cristalização.
- (4) **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 pela condução do cozimento (levantamento)



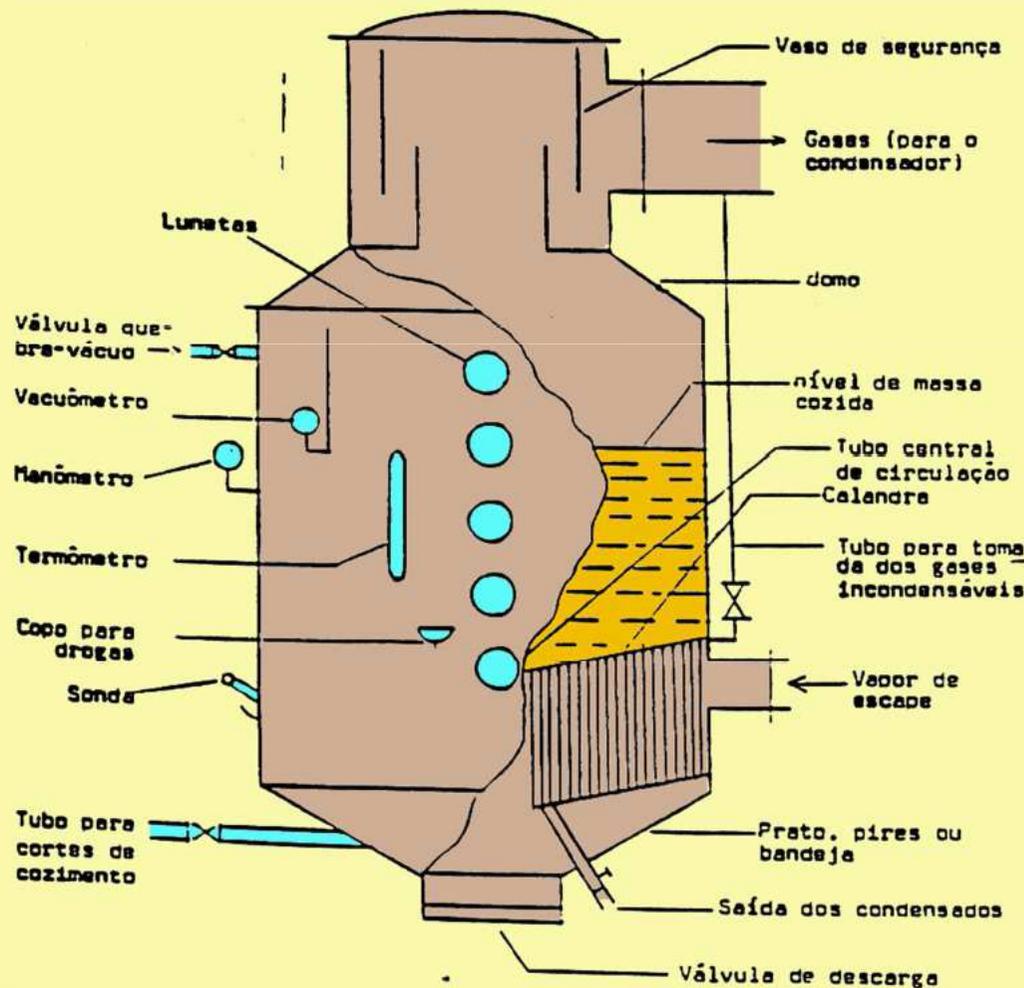
## d) Concentração Final

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

## e) Descarregamento

- fecha se o vapor e a água de multijato abre-se a "quebra vácuo" e a válvula de descarga

## 3.4.1. DESCRIÇÃO DE UM COZEDOR INTERMITENTE CLÁSSICO





## Intermitente

- vantagens:

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

## Cozimento

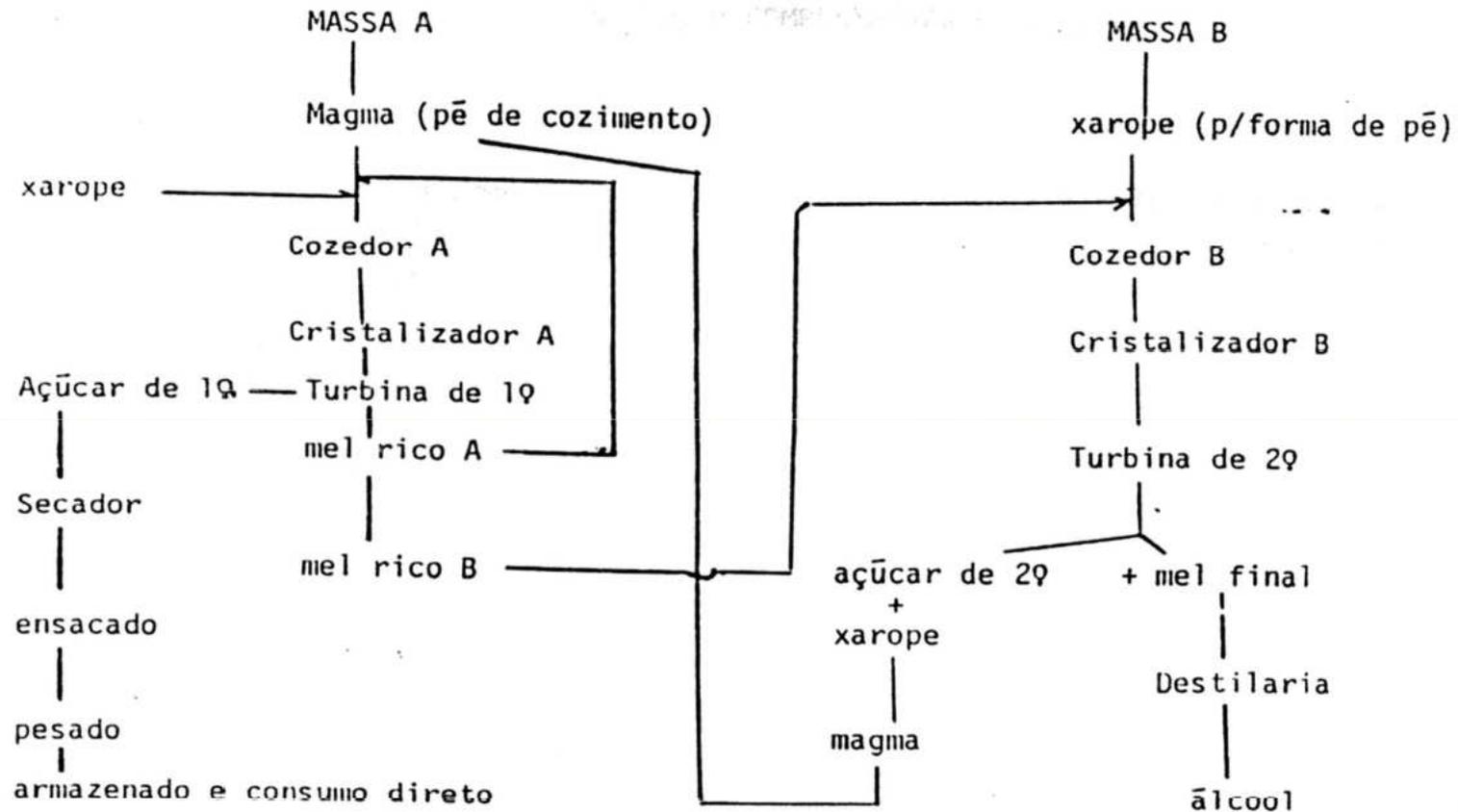
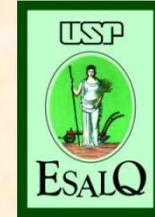
## Contínuo

- 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) melhor domínio sobre o tamanho dos cristais;
- e) maior controle de supersaturação;
- f) dimensionado por massa;
- g) menor perda na água (arraste ao condensador);
- h) maior rendimento.



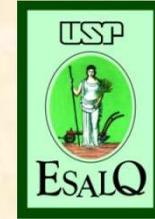
# Cozimento



Esquema de Cozimento de duas Massas



# Cozimento



## 3.6. Quantidade de cristais nas massas cozidas:

- Massa A----- 50 a 55%
  - Massa B----- 50%
  - Massa C----- 35 a 40%
- Queda de Pureza no sistema de 3 massas:

## 3.7. Equipamentos de controle do cozimento:

- a) medição da elevação do ponto de ebulição
- b) medição da supersaturação
- c) medição da consistência (Brix)
- d) medição da condutividade

## 3.8. Magma

- Constitui o "pé-de-cozimento" no cozimento;
- Produzido da massa cozida C ou B;
- Empastamento do açúcar C ou B com água, xarope ou caldo clarificado;
- Pureza de 88 a 96%
- Desse magma conduz o cozimento A, partindo-se da etapa de crescimento dos cristais



## Cozimento



**Obrigado pela atenção**