

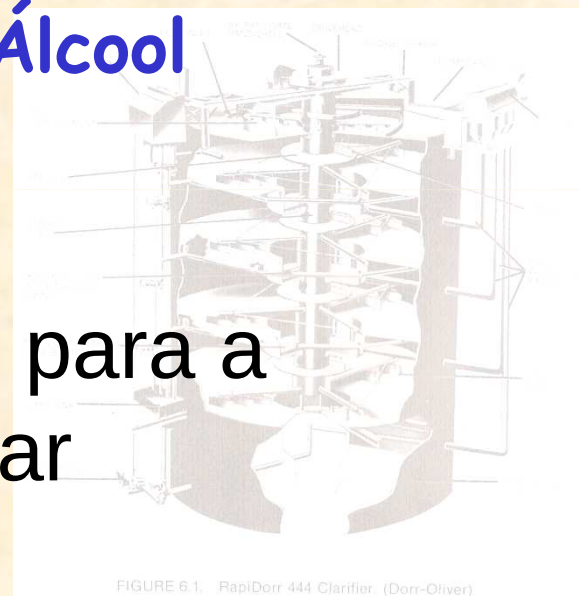
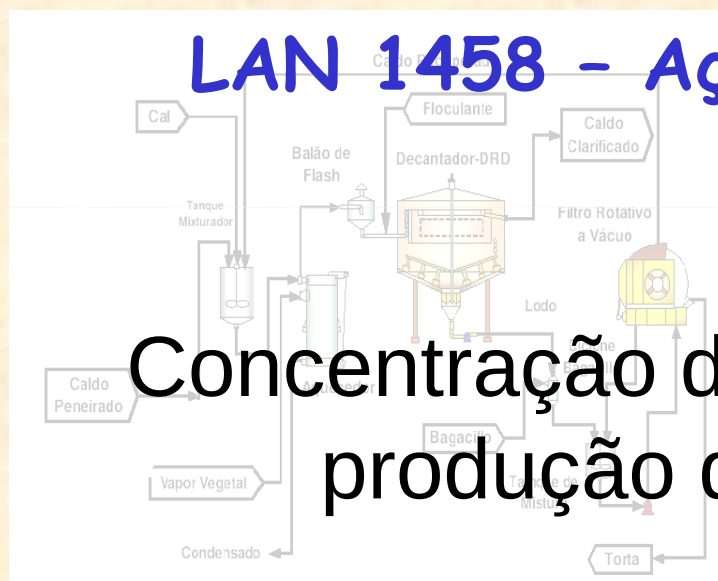
Universidade de São Paulo – USP



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



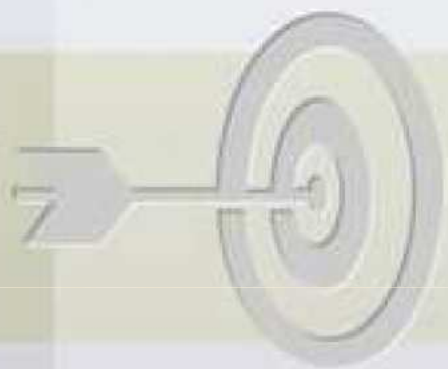
Prof. Antonio Sampaio Baptista

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:

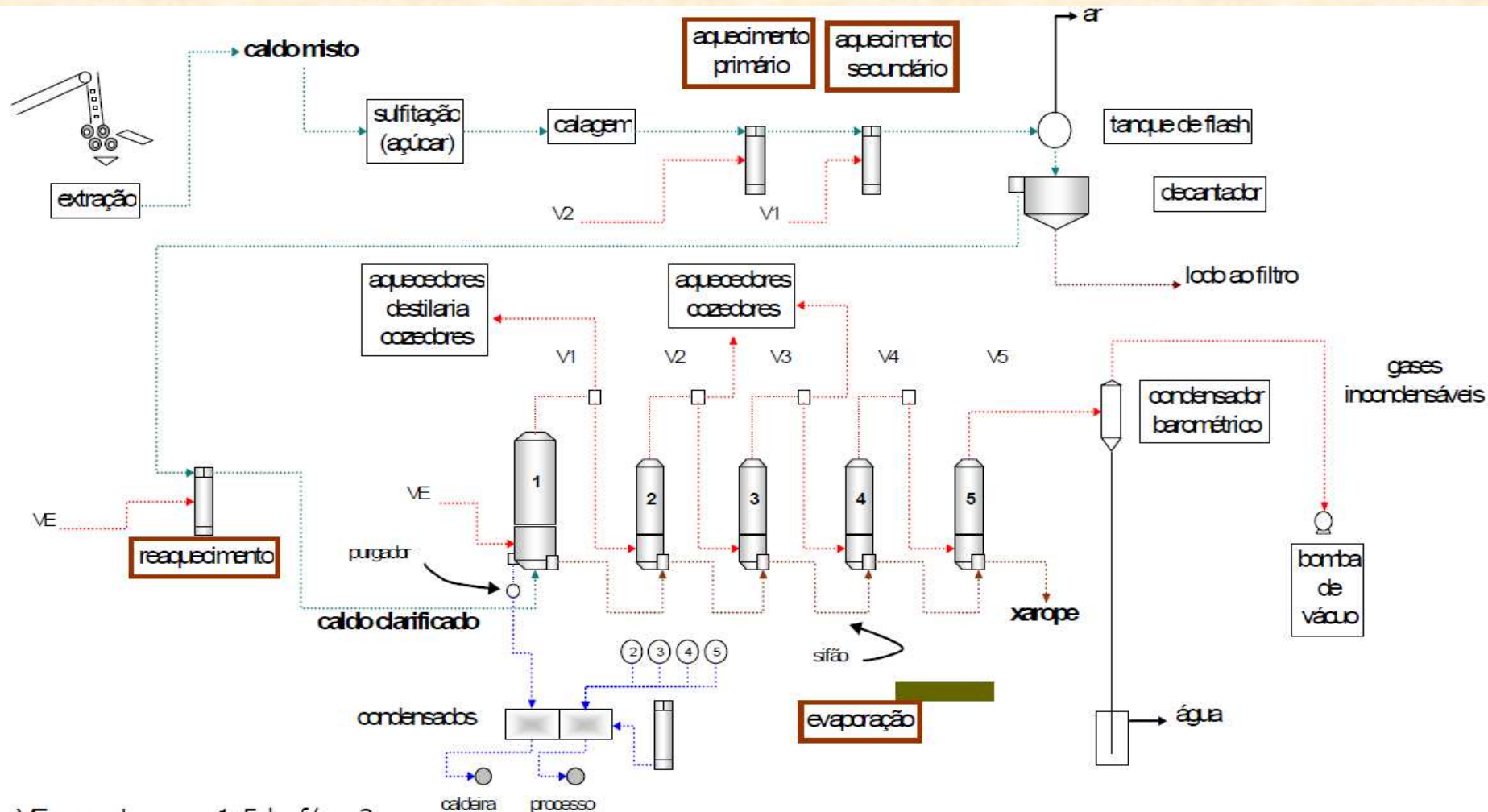
Evaporação

Propriamente dita

15° a 55-70° brix

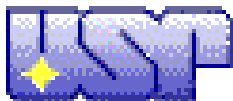
Cozimento

55 a 70° a
92 a 95° brix



VE vapor de escape 1,5 kgf/cm²

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)

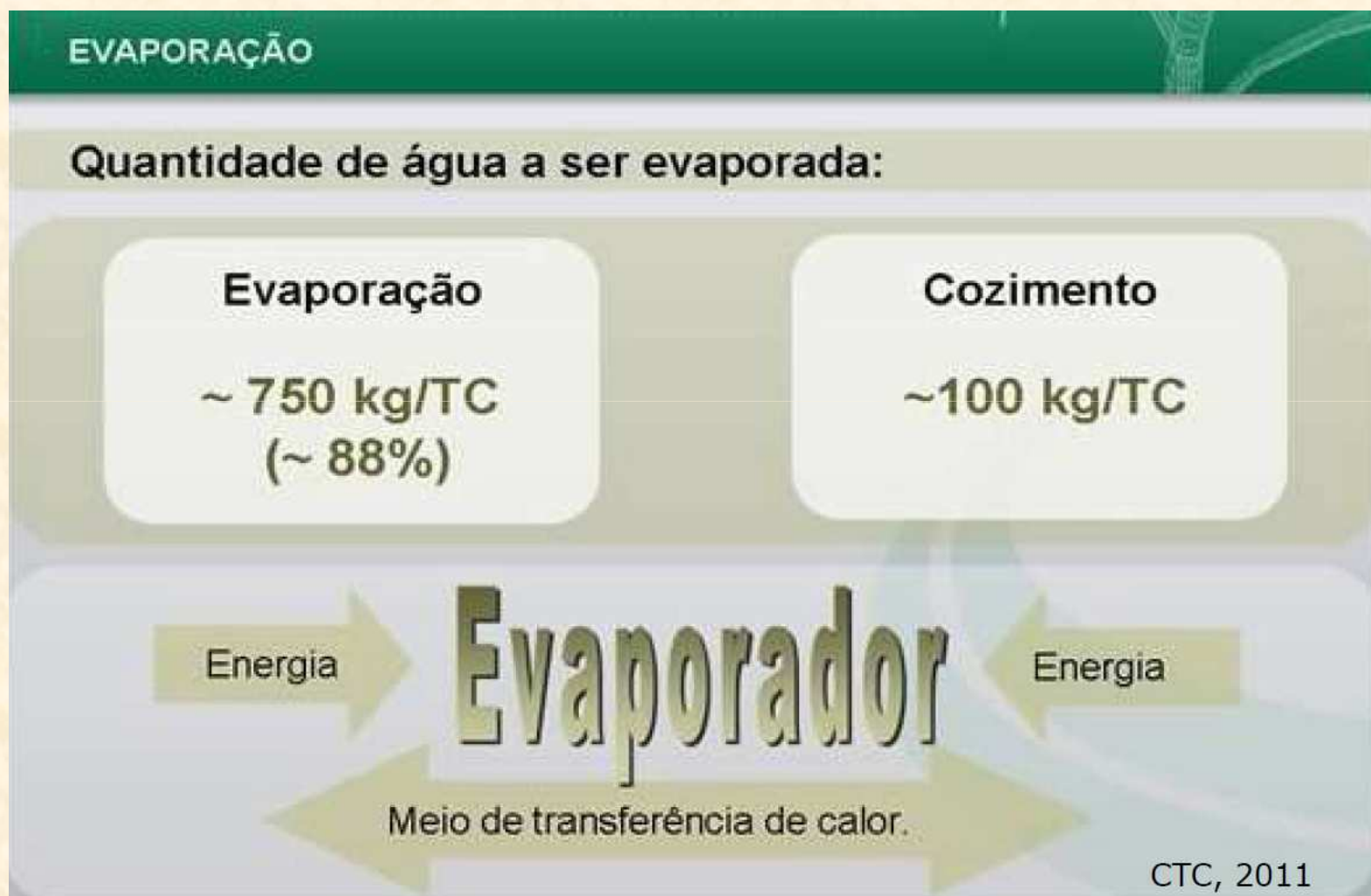
Remoção água - 2 fases -
– evaporação - sistema de múltiplos efeitos (xarope 55-65°Brix)
– cozimento - sistema de simples efeito

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

temperatura caldo decantado → mais próxima da temperatura da caixa

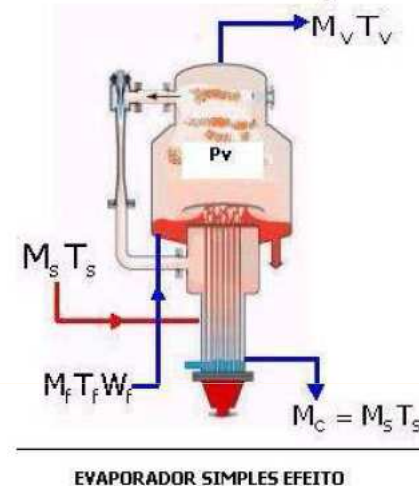
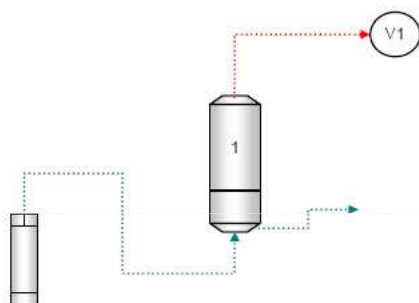
Justificativas:

- 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.

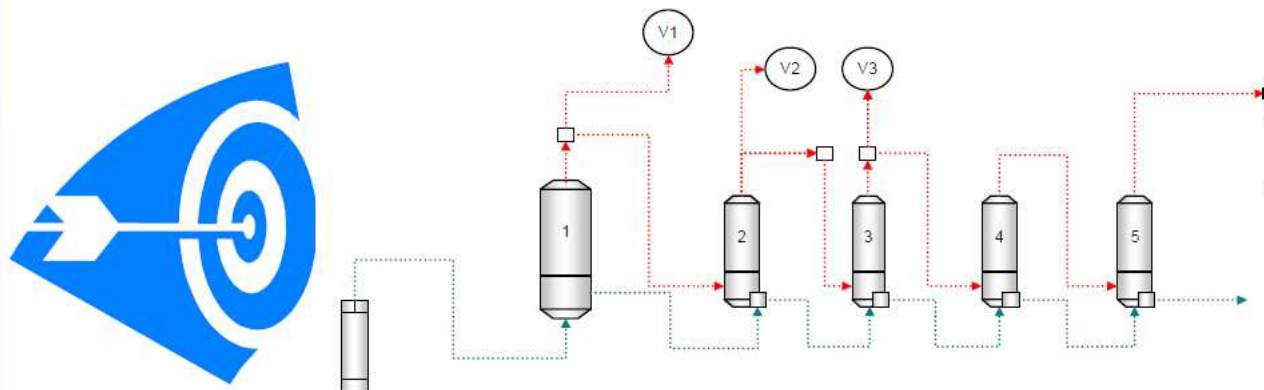


ARRANJOS MAIS FREQUENTES DAS PLANTAS DE EVAPORAÇÃO

Simple efeito; usado em destilarias autônomas

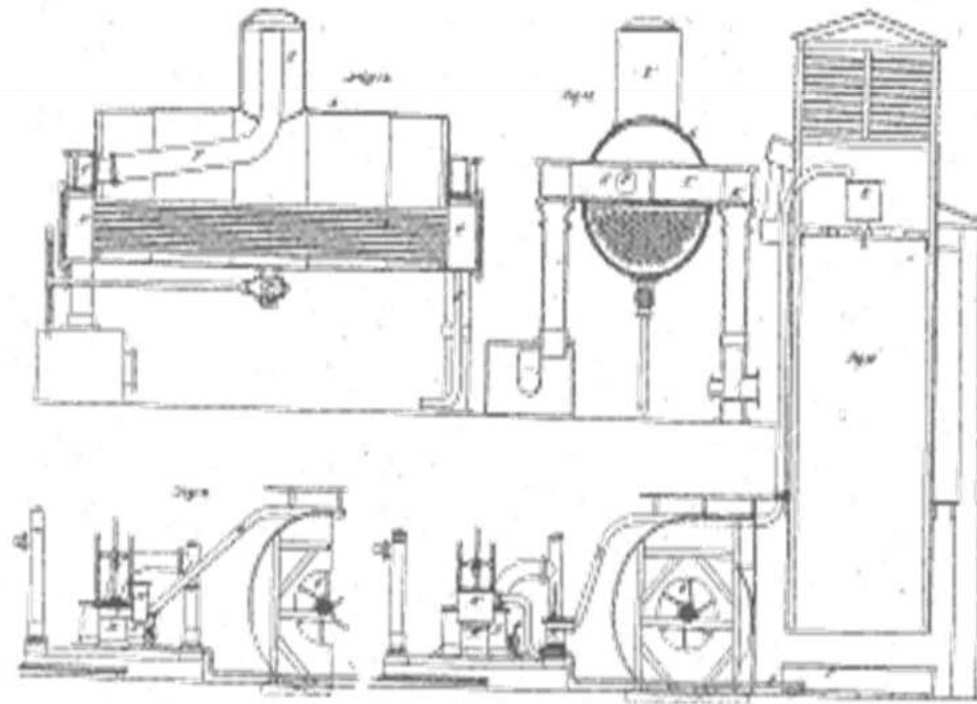


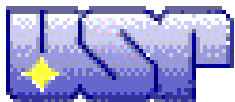
Múltiplo efeito; usado em fabricas de açúcar e em destilarias autônomas em condições especiais



NORBERT RILLIEUX

Princípios termodinâmicos da Evaporação





Princípios da evaporação



2.2. PRINCÍPIOS DE EVAPORAÇÃO EM MULTIPLO-EFEITO (Fundamentos)

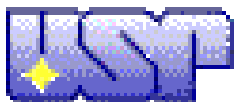
- ❖ Norbert Rillieux → foi o primeiro a definir os princípios básicos de evaporação - 1848.



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 ???



Princípios da evaporação



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”

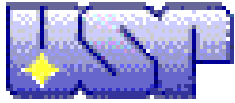
Exemplificando-se, que W o peso de vapor, M o nº de vasos e N o nº de ordem que o vaso ocupa no conjunto de evaporação, a economia de vapor E será igual a:

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



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

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



Princípios da evaporação



c) Terceiro Princípio:

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

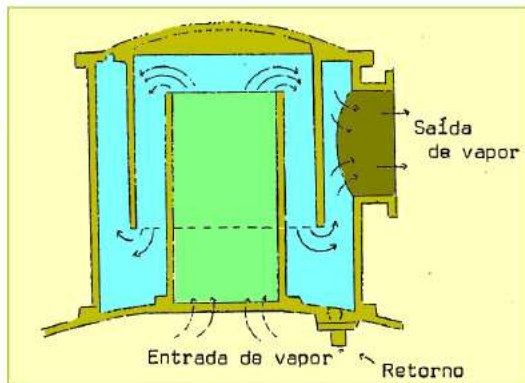
- ▣ **Prática** → instalam nos evaporadores dispositivos mecânicos para a extração dos gases incondensáveis.

CONSTRUÇÃO DE UM MÚLTIPLO-EFEITO

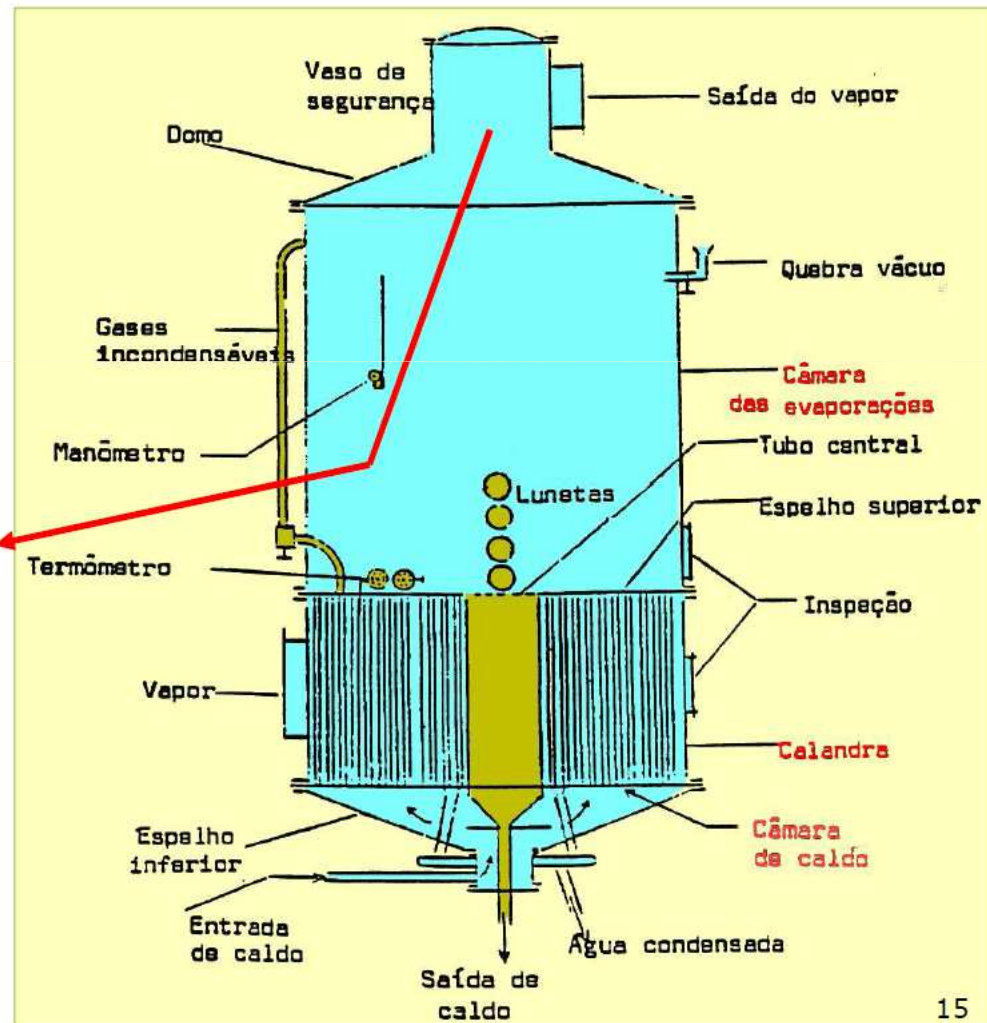
Facilidade de construção
corpos do sistema
(forma, altura, capacidade)

Aparelho
4 partes

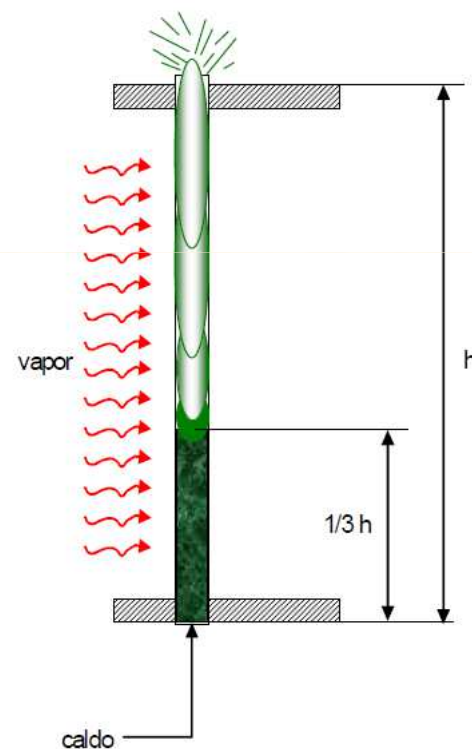
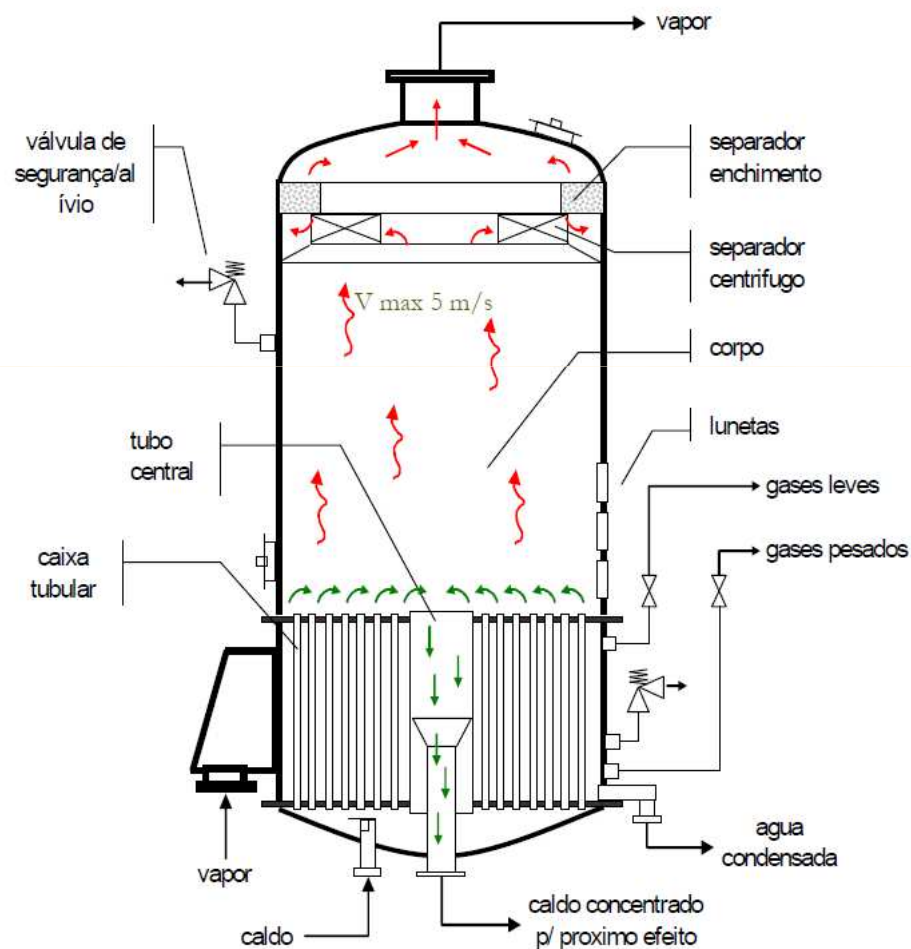
- Fundo
- Calandra
- Corpo cilíndrico
- Cabeça



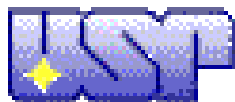
Detalhe da cabeça



3.5 - Principais características construtivas dos evaporadores (Roberts)



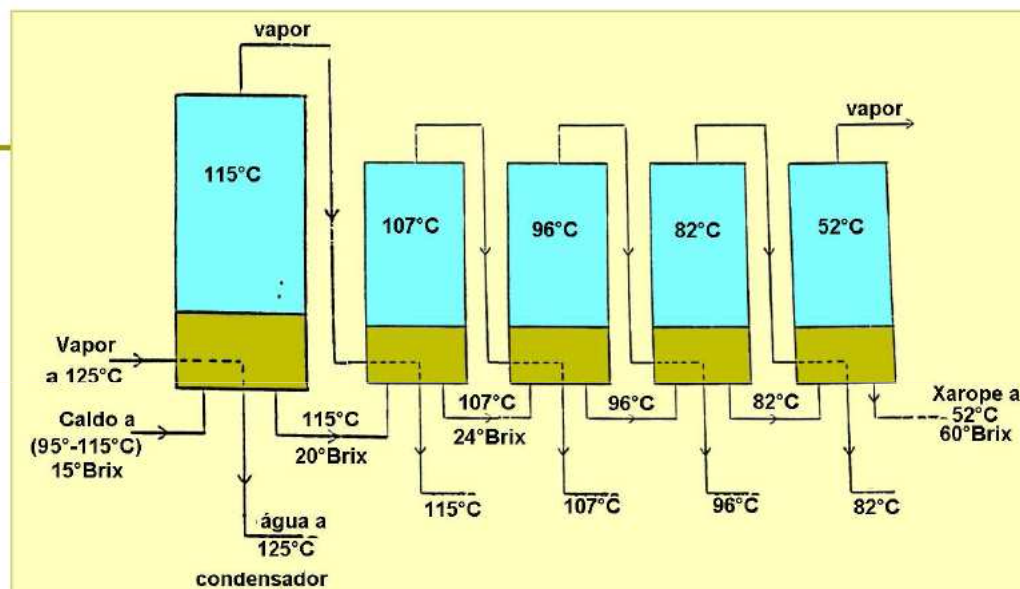
16



Evaporadores de múltiplos-efeitos

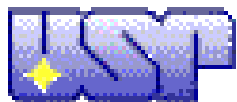


2.5. FUNCIONAMENTO DE UM MÚLTIPLO-EFEITO



Relações entre pressões, temperaturas e Brix.

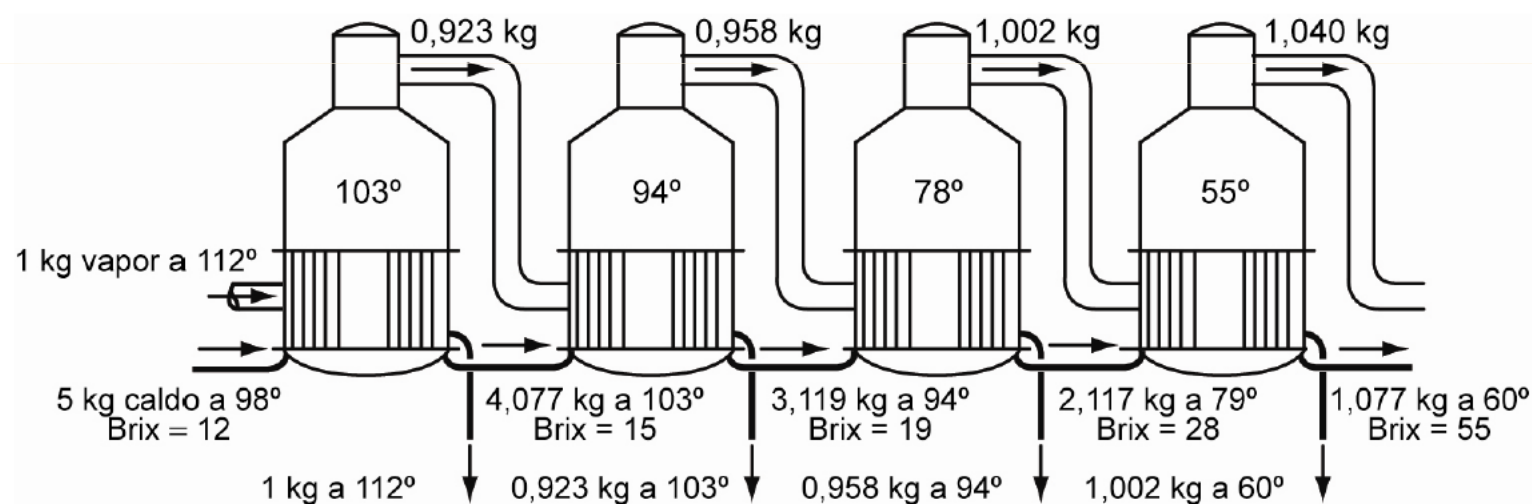
		Pré	1° V	2° V	3° V	4° V
Calandra	P (Kg/cm ²)	1,33	0,69	0,28	—	—
	V (cmHg)	—	—	—	10	37
	T (°C)	125	115	107	96	82
Câmara gases	P (Kg/cm ²)	0,69	0,28	—	—	—
	V (cmHg)	—	—	10	37	66
	T (°C)	115	107	96	82	52
Caldo Brix	Entrada	15	20	24	29	38
	Saída	20	24	29	38	60



Evaporadores de múltiplos-efeitos



BALANÇO TÉRMICO E DE MASSA

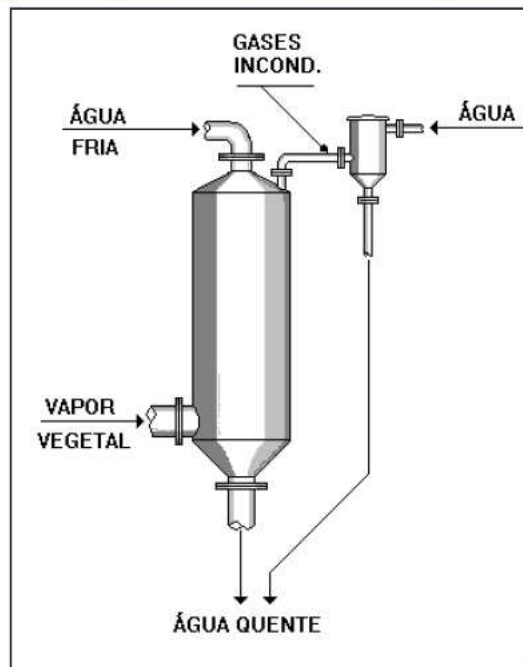


PRODUÇÃO DE VÁCUO

→ 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/cm²
- 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)

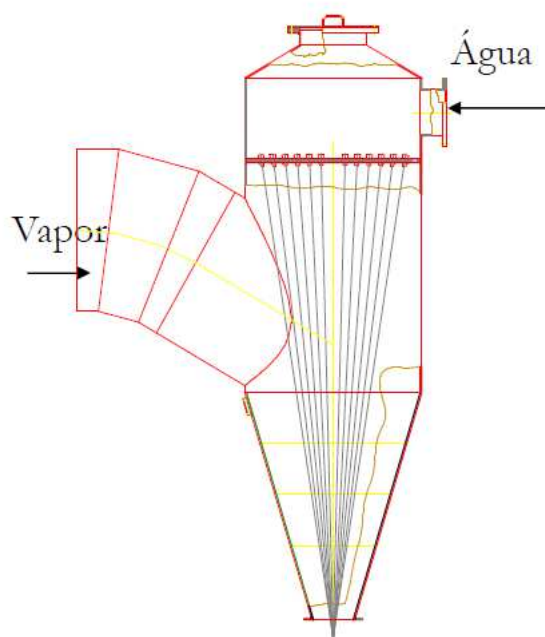
37

PRODUÇÃO DE VÁCUO

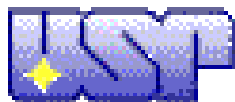
→ Condensação do vapor produzido na ultima caixa de evaporação

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/cm²
- Funcionamento por injeção de água a 1 kgf/cm²
(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

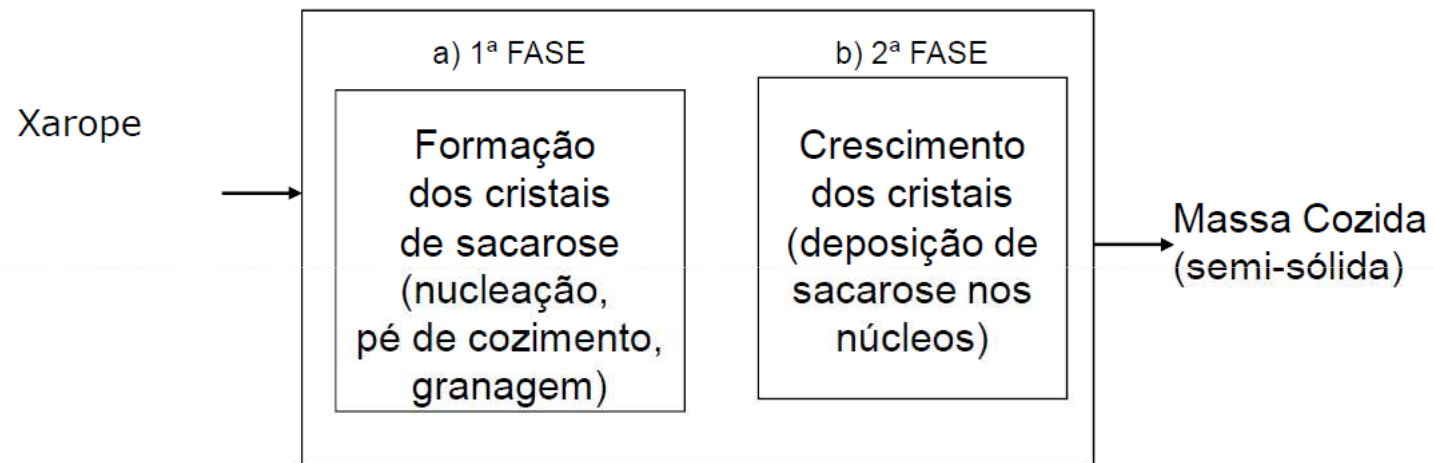
- Formação de cor é maior no primeiro corpo onde a **temperatura** é mais alta. O limite máximo de temperatura deve ser respeitado para minimizar este efeito.
- Formação de cor também é causada por deficiente **circulação** do caldo na calandra e altos tempos de retenção.
- Quando o **vácuo** é baixo,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

Cozimento (?)

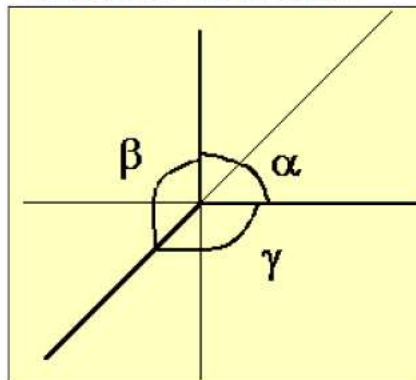


COZIMENTO DO XAROPE

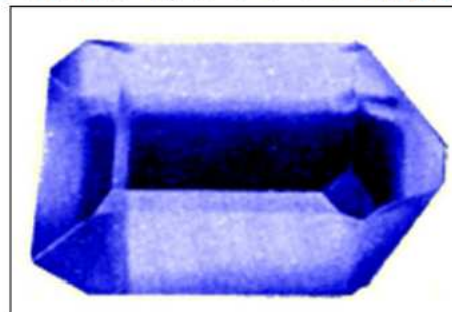
INTRODUÇÃO

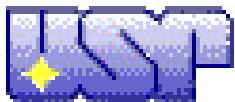


Sacarose cristaliza



- sistema monoclinico
- 3 eixos: a, b e c e 3 ângulos α , β e γ





Cozimento



SOLUBILIDADE DE SACAROSE

Solubilidade da sacarose pura em água

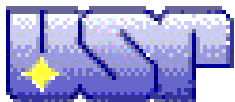
Soluções classificadas como:

- 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):

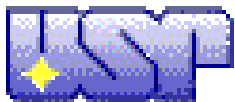
$$C_s = \frac{S^0}{S'}, \text{ onde}$$

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

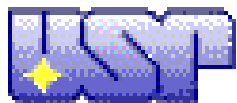
(C1) Coeficiente de supersaturação (C.S.S.)

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

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)

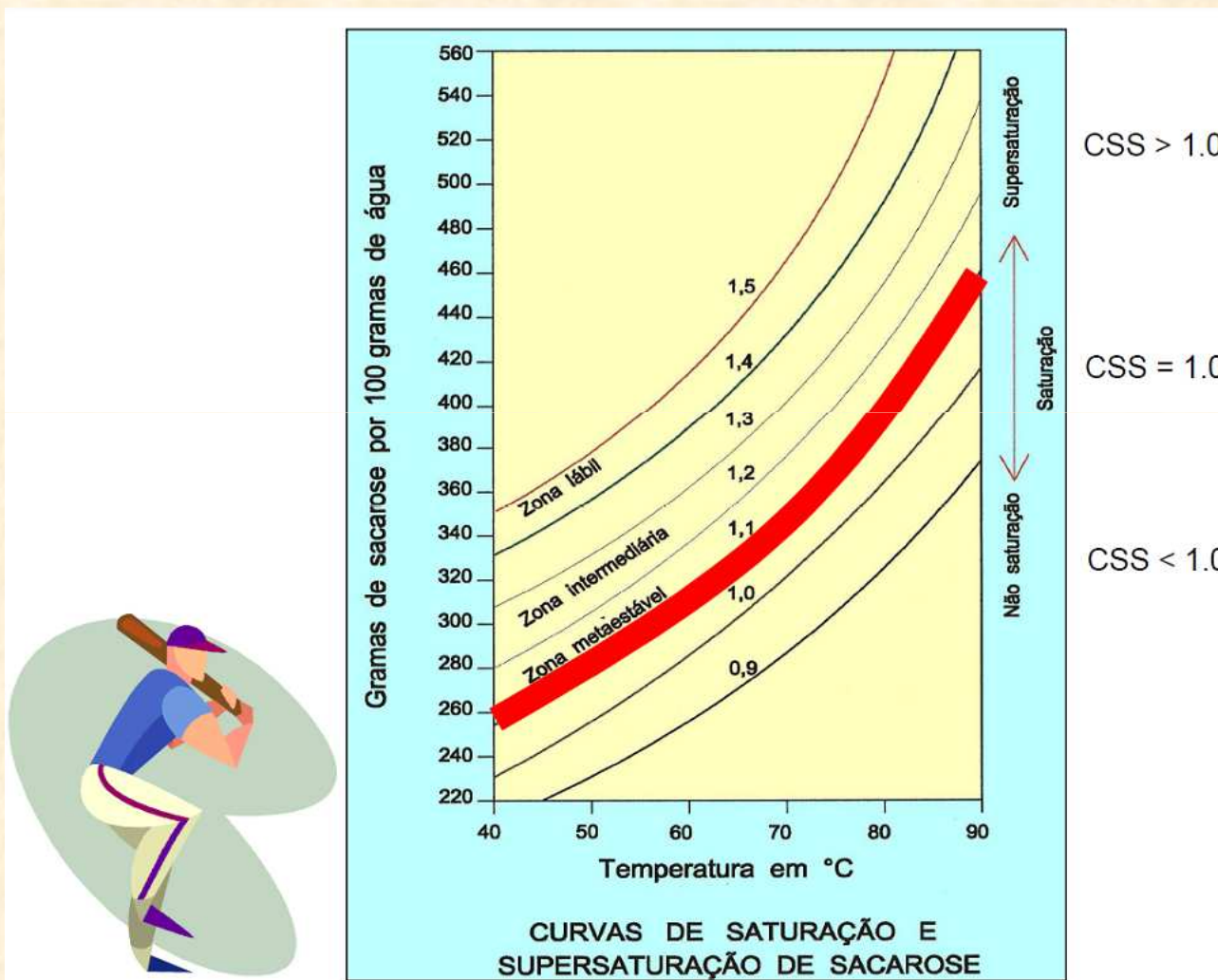
- apenas crescimento dos núcleos cristalinos existentes;
- não ocorre nucleação ou formação de sacarose como cristal;
- tendência do coeficiente de supersaturação se aproximar do limite inferior.

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.



b) Nucleação da sacarose

Métodos de formação dos cristais

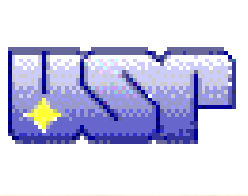
(1) **Espera:** aparecimento espontâneo de cristais em condição de supersaturação na zona hábil

- 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.

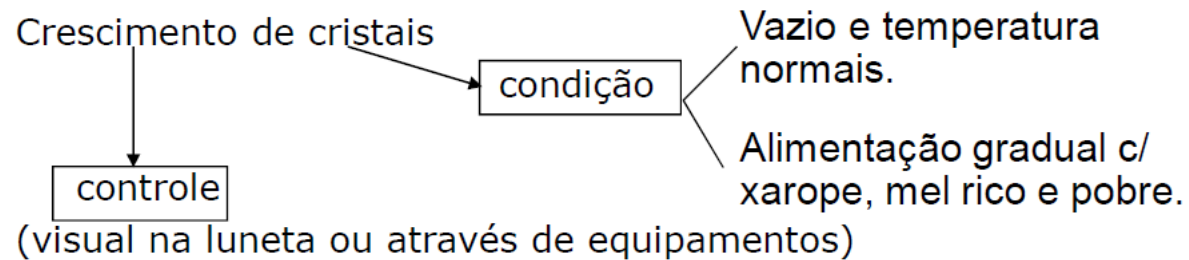
(4) **Semeadura:** insere-se um número de núcleos, determinando-se e controlando o tamanho dos cristais. O crescimento dos cristais mantido na zona metaestável (CSS de 1,1 a 1,2).



Cozimento



c) Crescimento dos cristais pela condução do cozimento (levantamento)



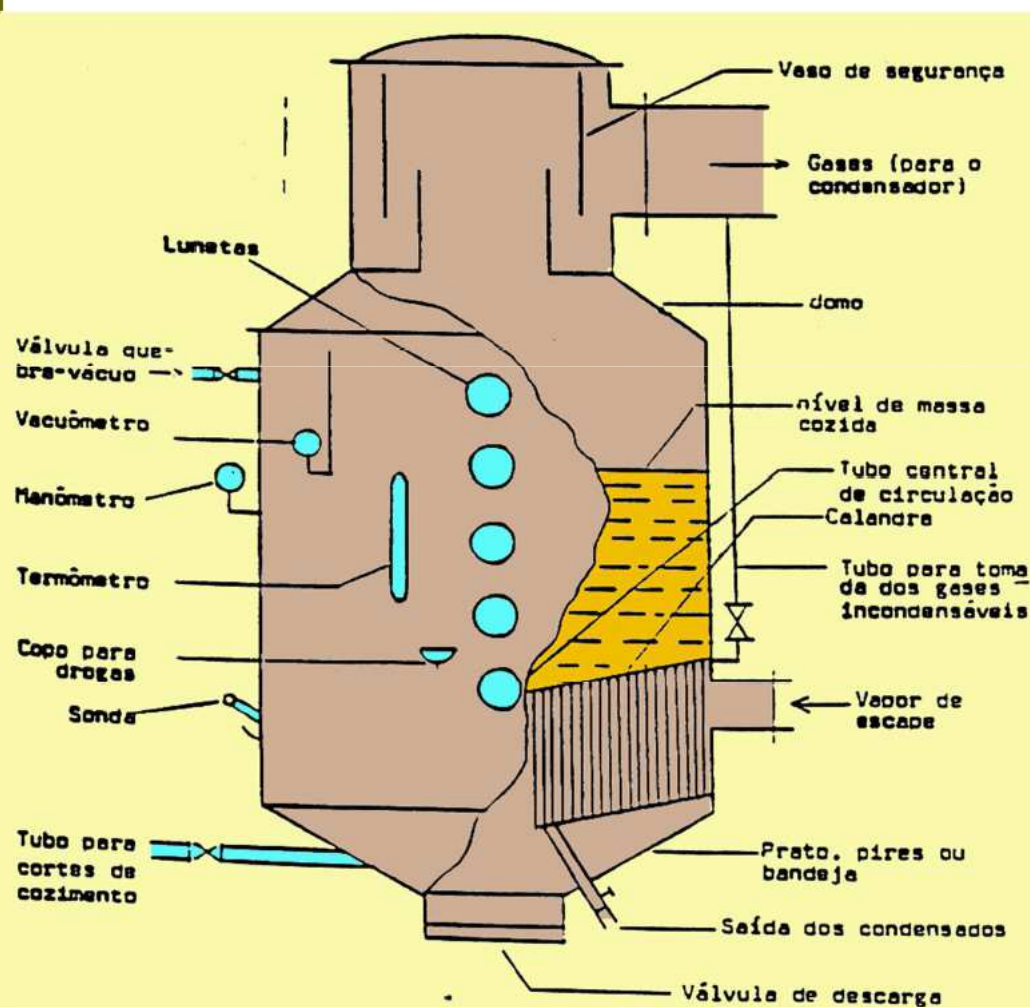
d) Concentração Final

- "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



Cozimento

Intermitente

- vantagens:

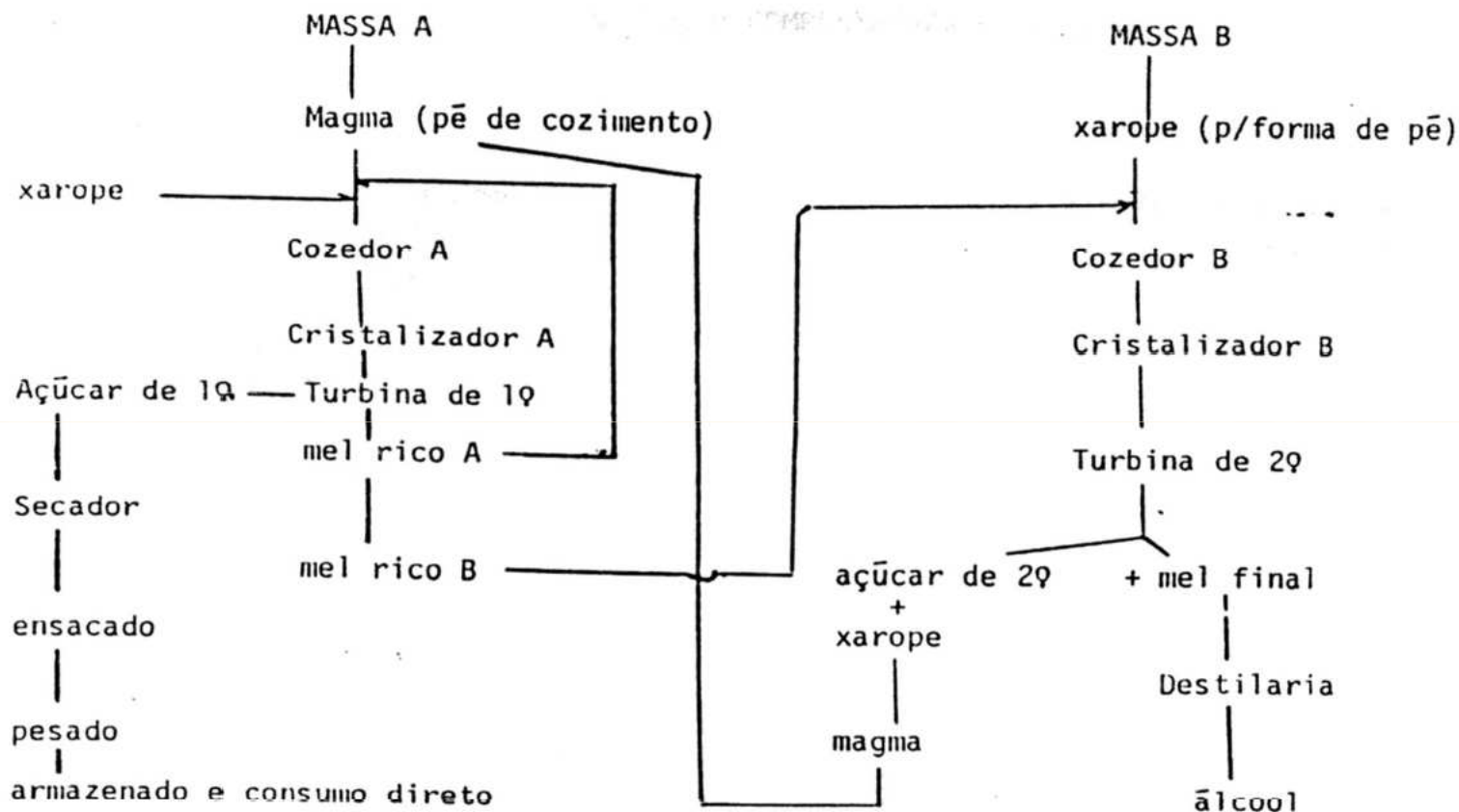
- a) custo mais baixo do equipamento;
- b) tecnologia bem conhecida;
- c) recursos requeridos plenamente disponíveis.



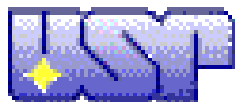
Contínuo

- 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) 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.



Esquema de Cozimento de duas Massas



Cozimento



3.6. Quantidade de cristais nas massas cozidas:

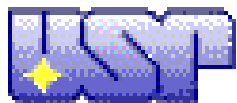
- Massa A----- 50 a 55%
 - Massa B----- 50%
 - Massa C----- 35 a 40%
- Queda de Pureza no sistema de 3 massas:

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