

# OPERAÇÕES UNITÁRIAS II

## AULA 9: EVAPORAÇÃO EM SIMPLES EFEITO

Profa. Dra. Milena Martelli Tosi

# EVAPORAÇÃO EM SIMPLES EFEITO

Características da evaporação e do líquido a ser evaporado

Principais tipos de evaporadores

Elevação do ponto de ebulição  
(concentração e altura do líquido)

Balanços de Massa e Energia / Coef.  
Global de troca térmica

# EVAPORAÇÃO

- Operação de concentração de uma solução por evaporação de um solvente

Uma das mais antigas operações de separação empregadas em escala industrial

**Ex: produção de açúcar de cana:** solução de sacarose é concentrada de maneira a permitir a cristalização

**Produção de celulose:** lixívia (licro negro oriundo do tratamento da madeira) é concentrada até permitir sua queima nas caldeiras (recuperação dos sais de sódio)

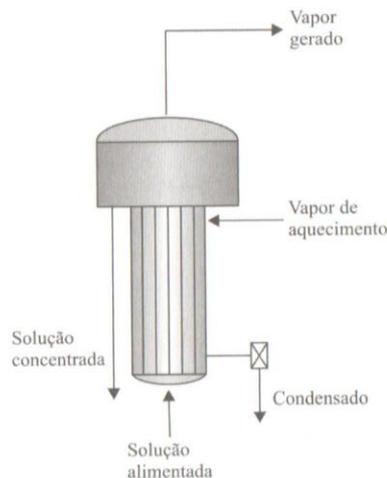


Figura 11.1 Esquema de um evaporador vertical de tubo longo.

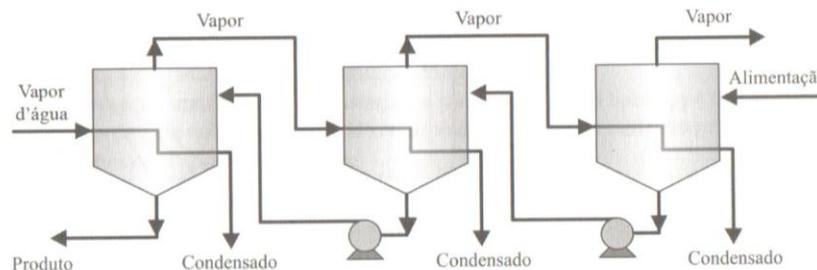


Figura 11.2 Sistema de evaporação em múltiplo efeito.



# BATELADA: FORMAS DE TC

## ○ Características do líquido a ser evaporado

Características se modificam no decorrer do processo:

- **Densidade e viscosidade:** aumentam, reduzindo a eficiência;
- **Solução torna-se saturada:** com respeito ao equilíbrio sólido-líquido dos compostos dissolvidos, provocando a formação de cristais que devem ser removidos para evitar danos nos tubos;
- **Ponto de ebulição:** pode subir consideravelmente com a concentração, diminuindo o potencial térmico e, conseqüentemente, a capacidade de transferência de calor.

**Alimentos:** as exigências de qualidade do produto podem requerer um tempo de residência e temperaturas baixos



# EVAPORAÇÃO EM SIMPLES EFEITO

Características da evaporação e do líquido a ser evaporado

Principais tipos de evaporadores

Elevação do ponto de ebulição  
(concentração e altura do líquido)

Balancos de Massa e Energia / Coef.  
Global de troca térmica

# PRINCIPAIS TIPOS DE EVAPORADORES

- Podem ser classificados em (Green & Perry, 2008):
  - Aqueles em que o meio de aquecimento é separado da solução a ser evaporada por superfícies tubulares (tubos)
  - Aqueles em que o meio de aquecimento está confinado em camisas, serpentinas e placas planas
  - Aqueles em que o meio de aquecimento entra em contato direto com a solução de evaporação
  - Aqueles que utilizando aquecimento por meio de radiação solar

**Grande maioria:** emprega tubos para aquecimento da solução a ser evaporada



# PRINCIPAIS TIPOS DE EVAPORADORES : CLASSIFICAÇÃO

- (1) Fonte de calor:** vapor, fogo direto, solar, etc.
  - (2) Posição dos tubos:** horizontal, vertical ou inclinado;
  - (3) Métodos de circulação do produto:** forçado ou natural;
  - (4) Comprimento dos tubos:** longo, médio ou curto;
  - (5) Direção do fluxo de produto:** ascendente ou descendente;
  - (6) Número de passes do produto:** 1, 2, ou mais;
  - (7) Formato dos tubos:** espiral, reto, etc.
  - (8) Localização do vapor:** interno ou externo ao tubo, ou ambos;
  - (9) Localização dos tubos:** interno ou externo.
- 

# PRINCIPAIS TIPOS DE EVAPORADORES : COMPONENTES BÁSICOS

- **Trocador de calor** (calor sensível e latente)
- **Separador de vapor** (da fase líquida em concentração)
- **Condensador** (dos vapores do produto)
- **Acessórios**
  - Bomba de vácuo
  - Válvulas reguladoras de pressão
  - Válvulas de segurança
  - Purgadores
  - Registros diversos

# PRINCIPAIS TIPOS DE EVAPORADORES : EQUIPAMENTOS

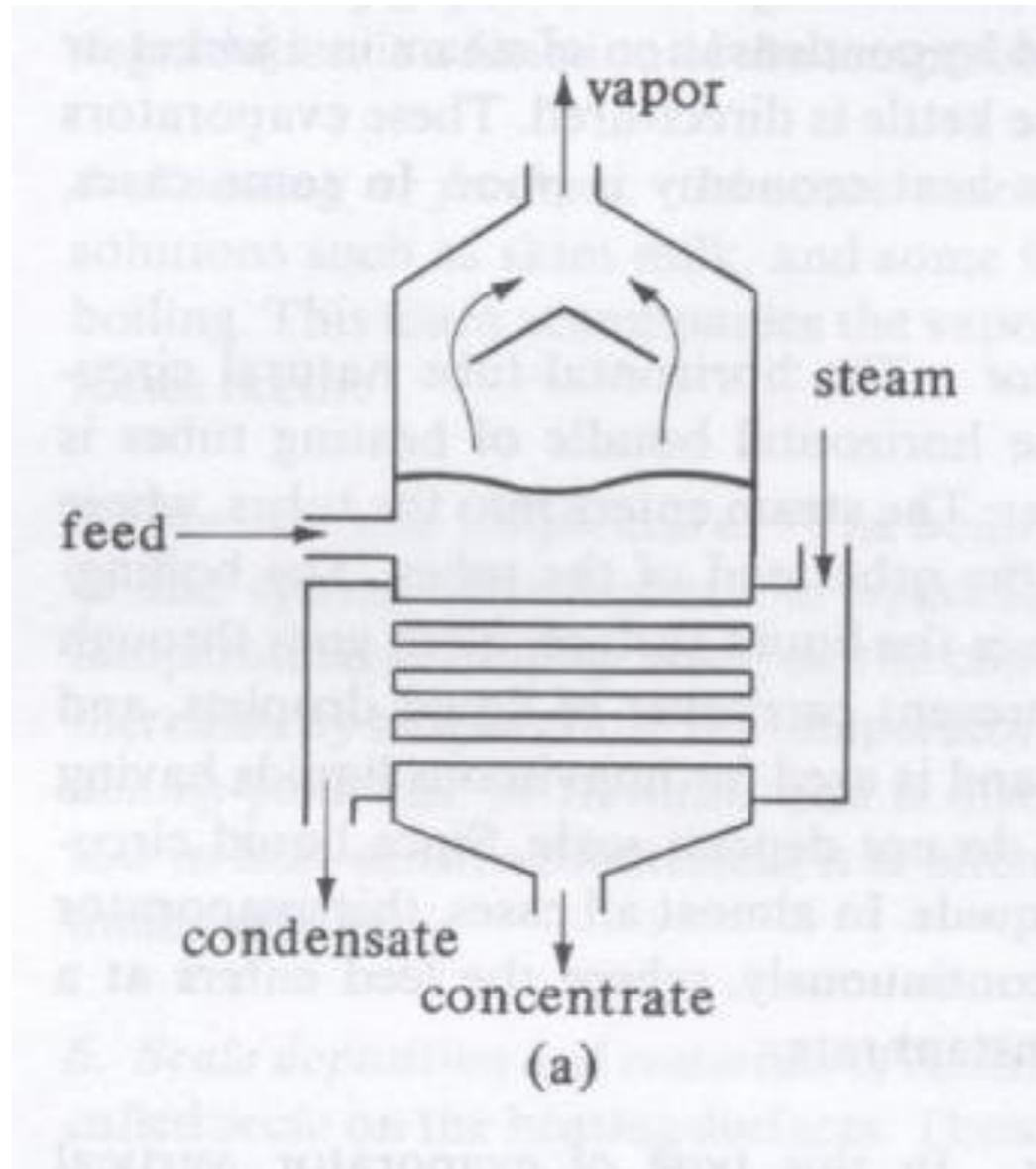
- **Tachos abertos e à vácuo**
- **Evaporadores de tubo vertical  
ou horizontal com circulação natural**
- **Evaporadores de circulação forçada**
- **Evaporadores de filme ascendente**
- **Evaporadores de filme descendente**
- **Evaporadores de placas**



# Evaporador de Tubo Horizontal

-Tubo horizontal

$1100 < U < 2300 \text{ W/m}^2\text{k}$

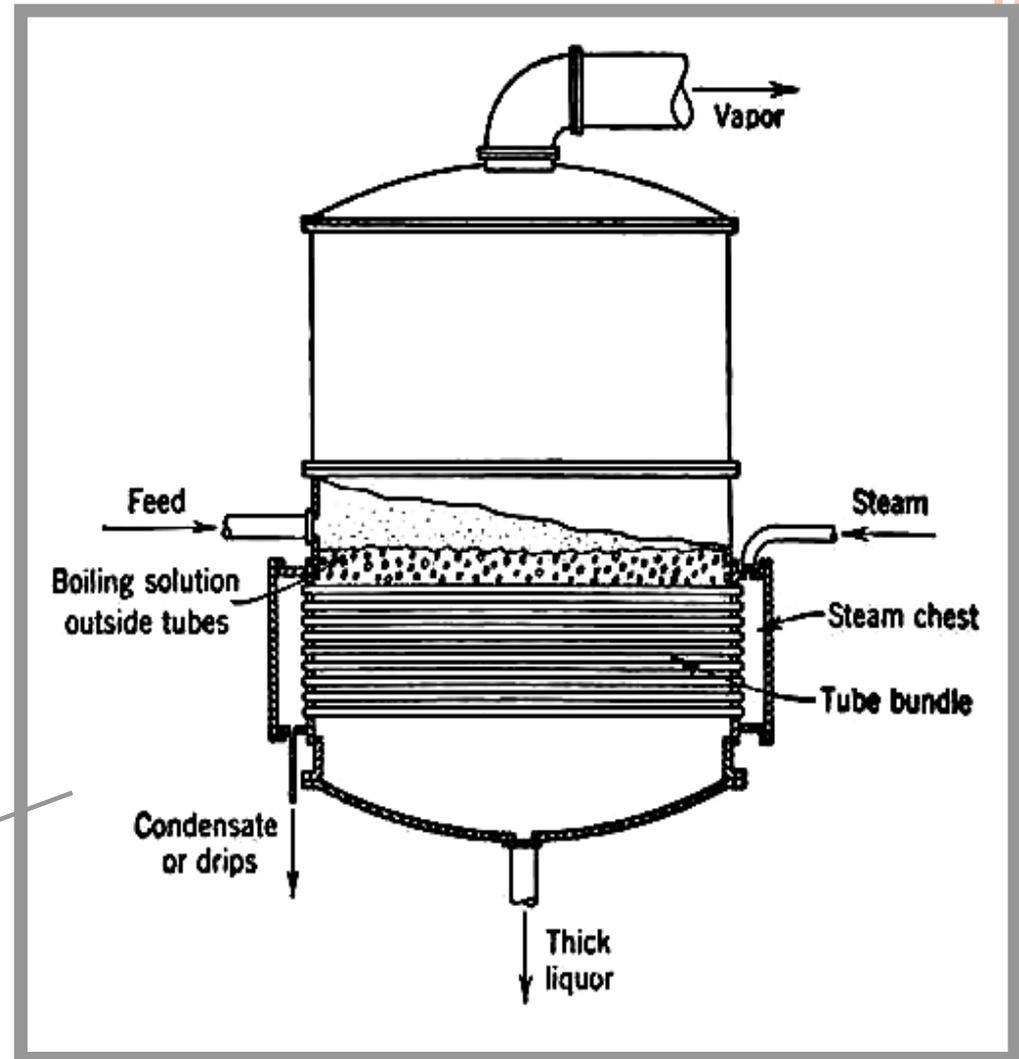


# Evaporador de Tubo Horizontal

- Tubos de 3/4" a 1 1/4" dispostos no fundo de uma câmara cilíndrica de 1 a 3 m de diâmetro e de 2,5 a 4,5 m de altura

☀ Unidade simples.

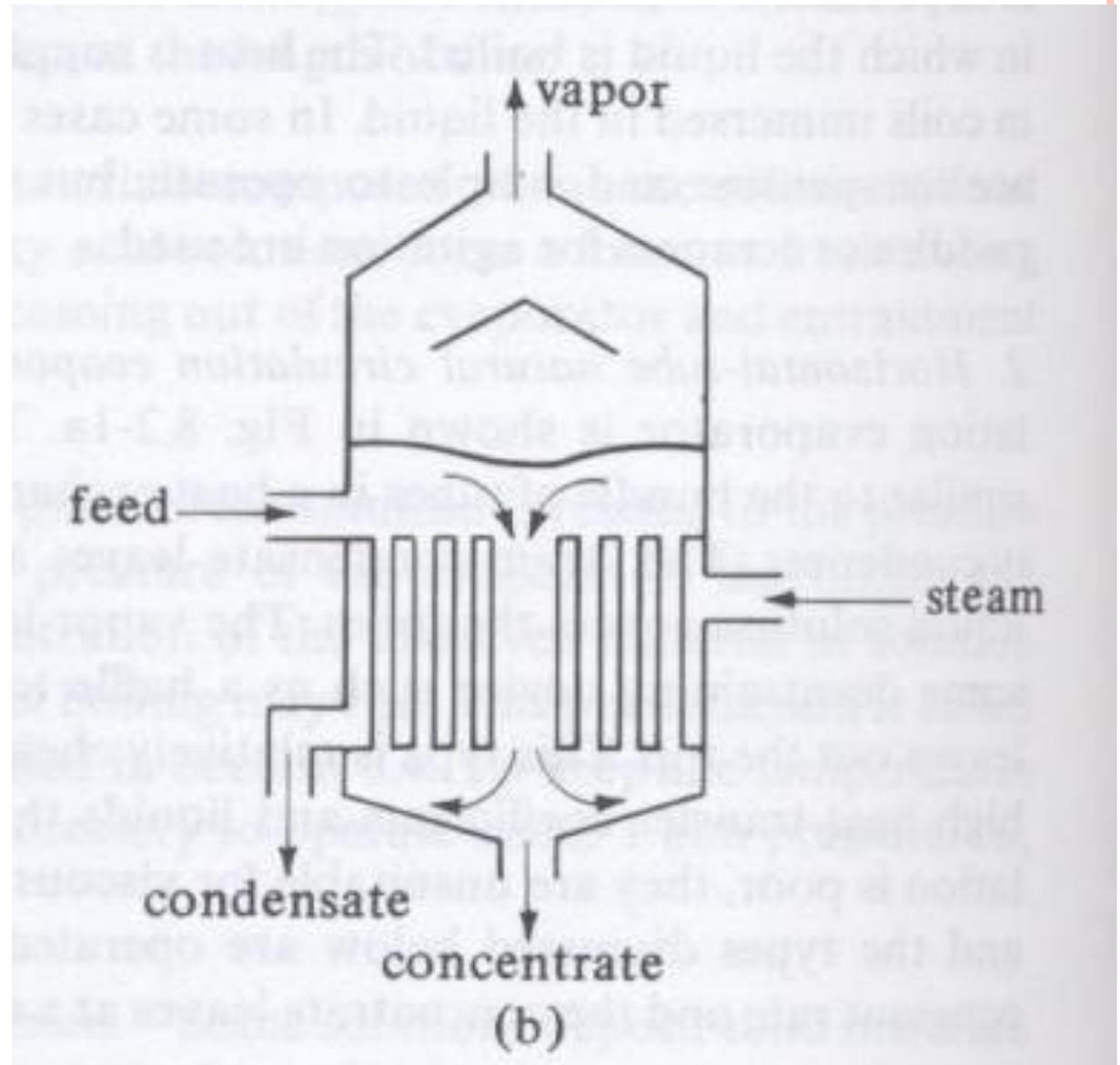
Convecção natural



# EVAPORADOR DE TUBO VERTICAL CURTO

-Tubo vertical

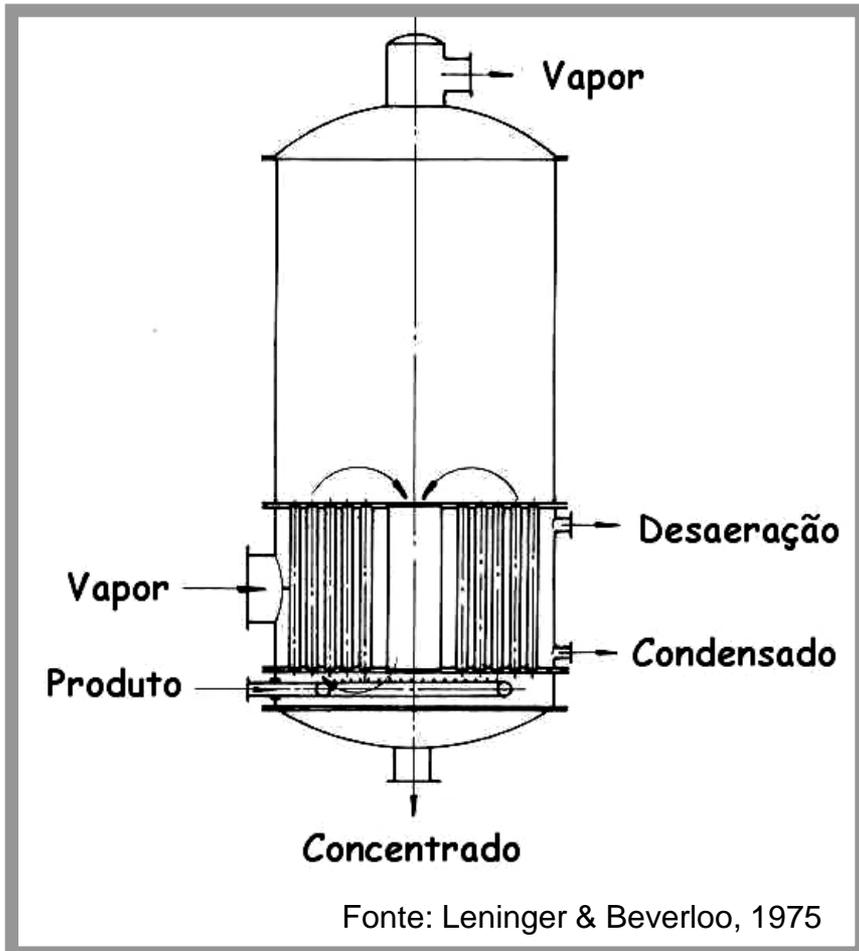
$1100 < U < 2800 \text{ W/m}^2\text{k}$



# EVAPORADOR DE TUBO VERTICAL CURTO

**CALANDRIA** (USA)

**ROBERTS** (EUROPA)



**Conhecidos como Calandria:**

solução circula no interior dos tubos e retorna ao fundo do evaporador pela parte central (TC afetada pelo nível do líquido no interior) – grande área, alto tempo de residência, baixa TC para soluções viscosas

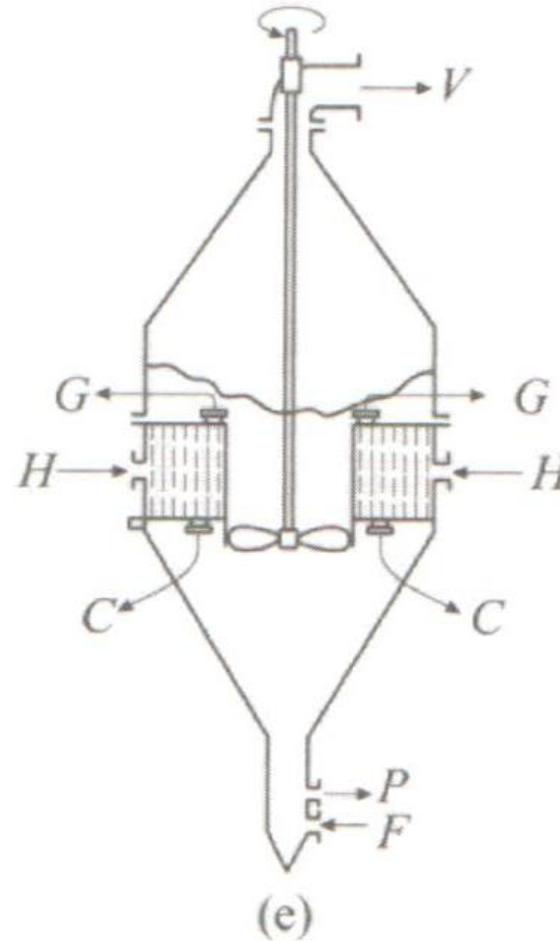
- Tubos com vapor estão na vertical no fundo da câmara cilíndrica (*mais fácil de higienizar que o horizontal*)
- Há um espaço no centro para o líquido circular, para cima nas serpentinas sendo aquecido, e para baixo pelo centro (mais frio)

# EVAPORADOR DE TUBO VERTICAL CURTO

**CALANDRIA** (USA)

**ROBERTS** (EUROPA)

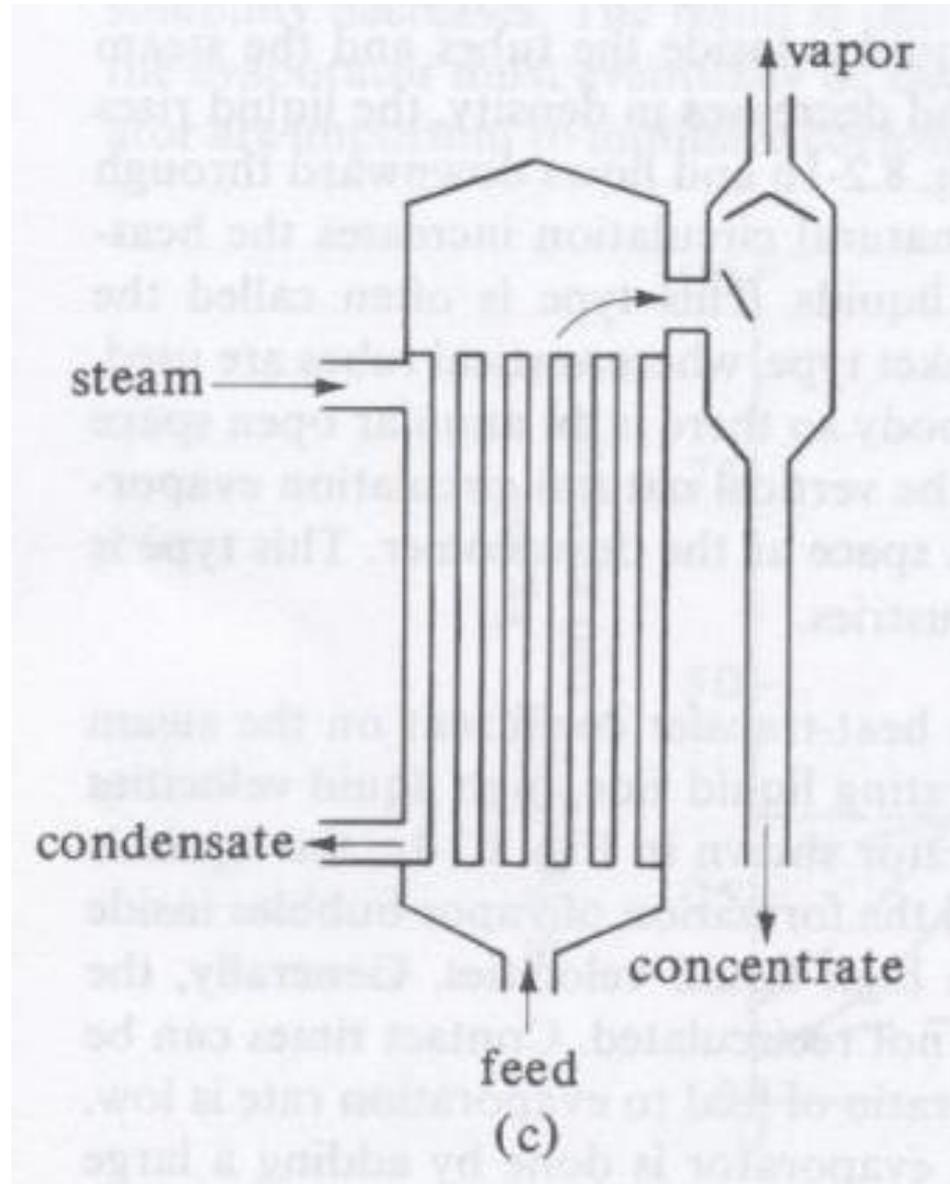
- Com agitação



# EVAPORADOR DE TUBO VERTICAL LONGO

-Tubo longo vertical

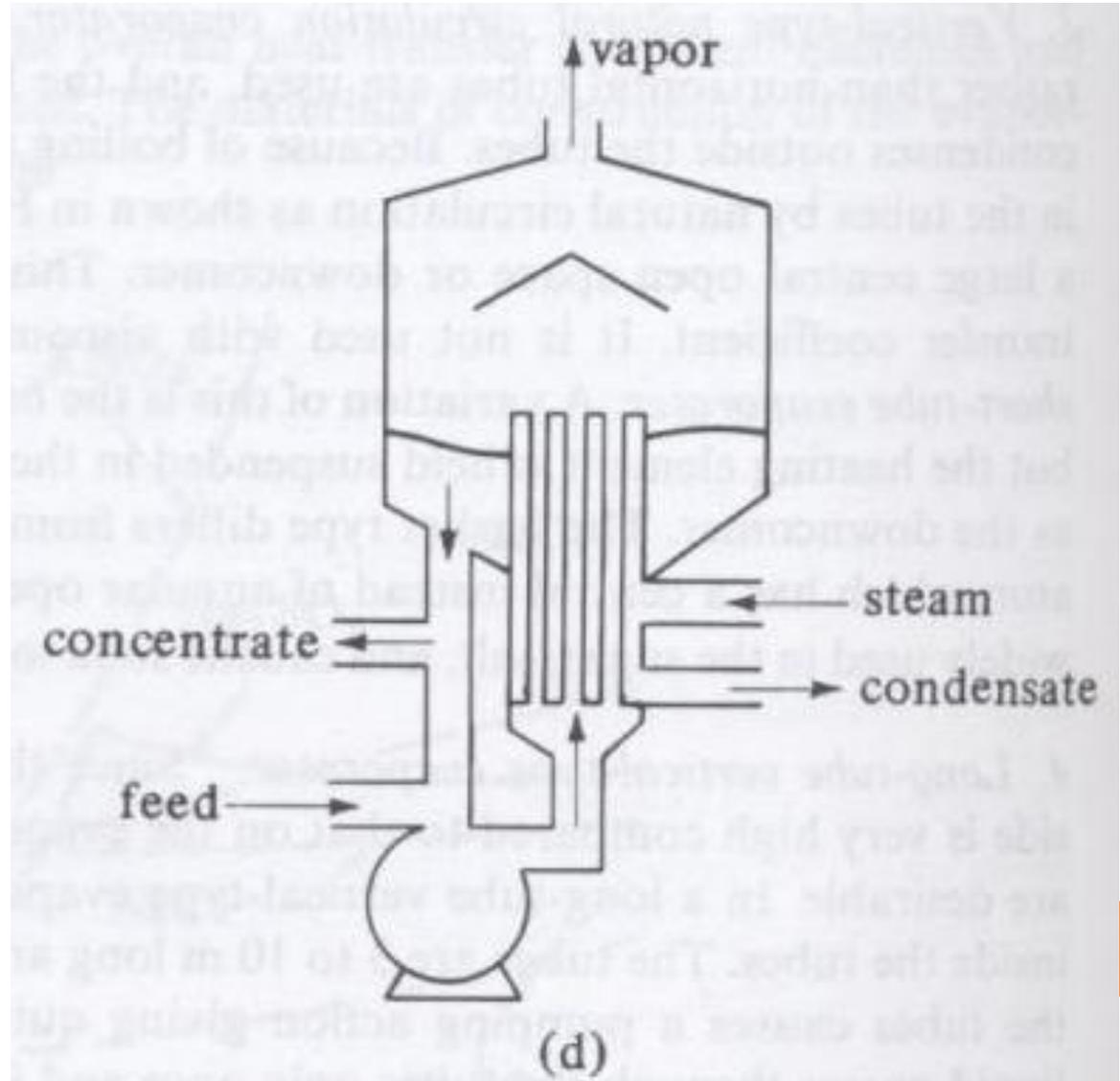
$1100 < U < 4500 \text{ W/m}^2\text{k}$



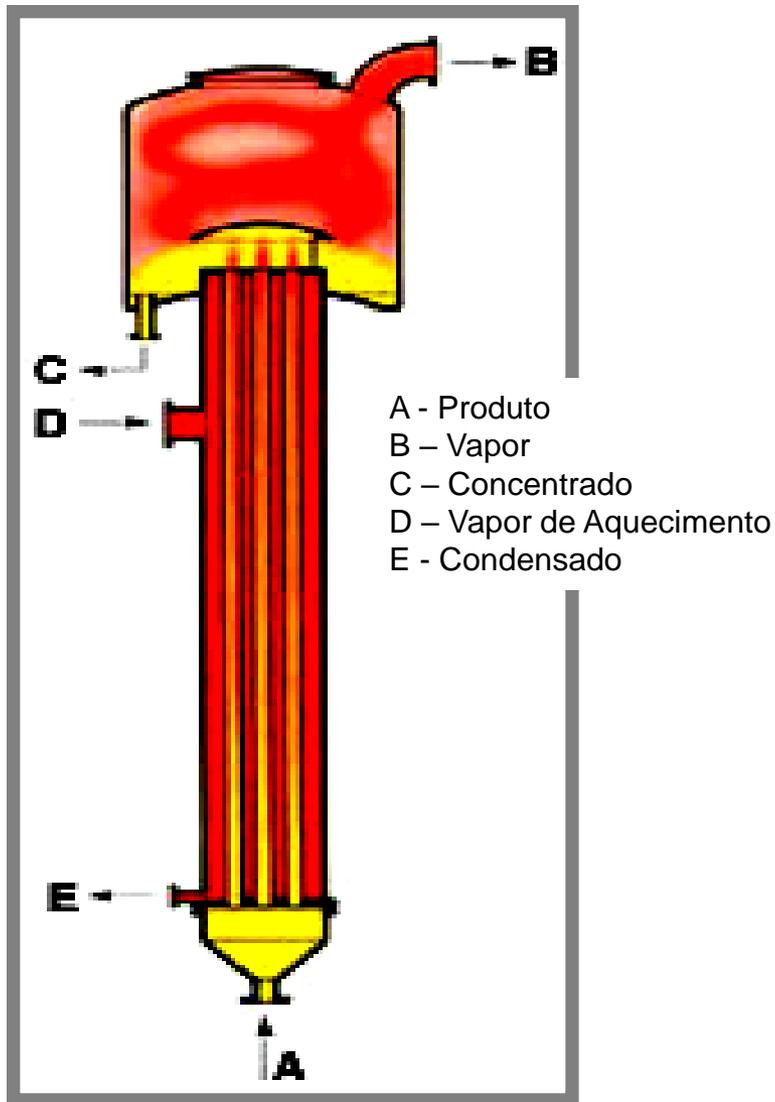
# EVAPORADOR DE TUBO VERTICAL LONGO

-Circulação forçada

$$1100 < U < 7000 \text{ W/m}^2\text{k}$$



# EVAPORADOR DE TUBO VERTICAL LONGO



Fonte: [www.niro.com](http://www.niro.com)

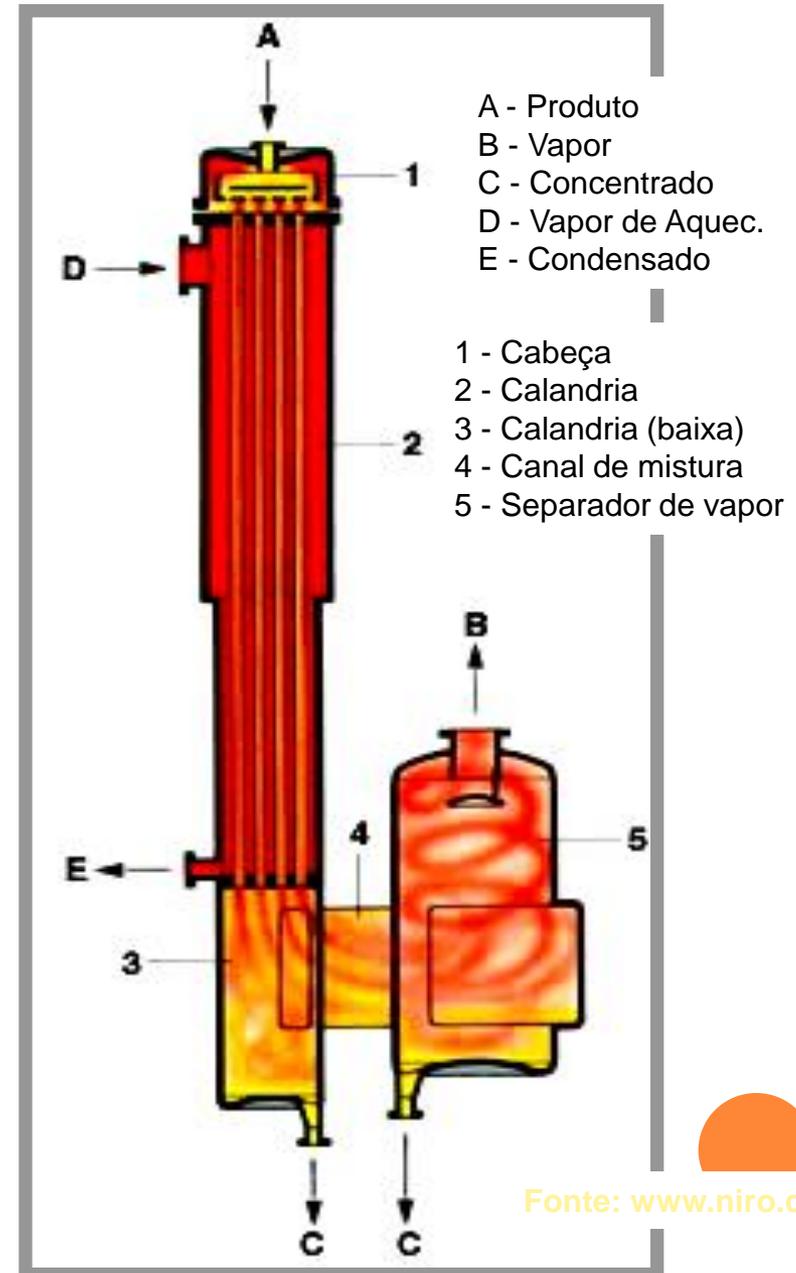
## Filme Ascendente “Rising film”

- Circulação natural com fluxo ascendente
- Tubos de 1 1/4” a 2” de diâmetro e 3,5 a 5,5 m de comprimento para movimentar o líquido dentro dos tubos, aquecimento é com vapor por fora do tubo
- Prato defletor está no topo do feixe de tubos para evitar o arraste de líquido e reduzir perdas

# EVAPORADOR DE TUBO VERTICAL LONGO

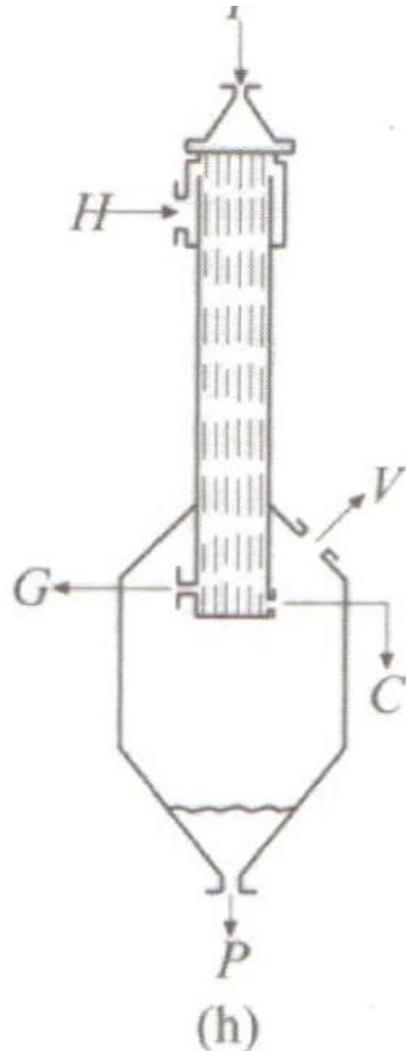
## Filme descendente “Falling film”

- Reduz a quantidade de tratamento ou exposição do produto ao calor
- Tubos de 1 1/2” a 2” de diâmetro e acima de 9 m de comprimento.



# EVAPORADOR DE TUBO VERTICAL LONGO

## Filme descendente “Falling film”



Esse tipo de evaporador elimina o problema de aumento de temperatura da solução no interior dos tubos em razão da altura hidrostática.

Operam com filme delgado de solução, permitindo rápida evaporação com pequeno tempo de residência e com baixo superaquecimento da solução.

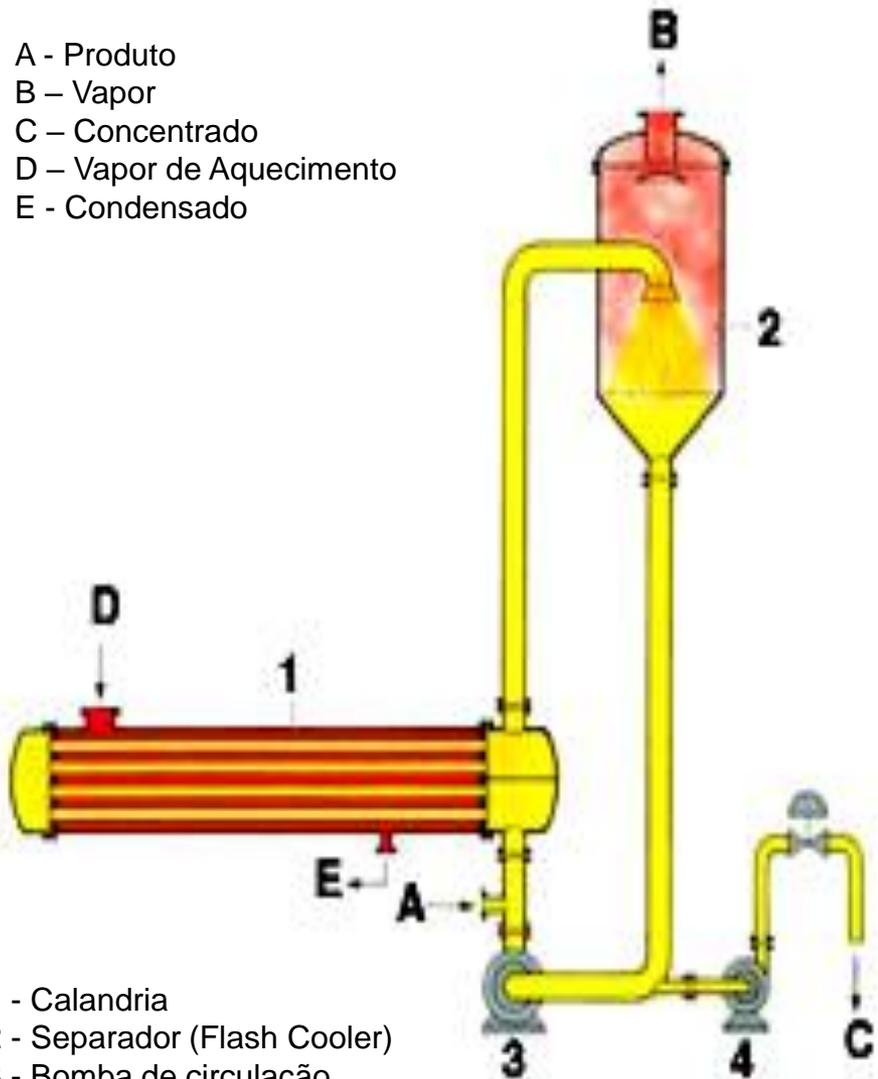
**Ex: soluções termicamente sensíveis (suco de laranja)**

Problema: garantir boa distribuição do líquido ao longo de todo o perímetro dos tubos



# EVAPORADOR DE CIRCULAÇÃO FORÇADA

A - Produto  
B - Vapor  
C - Concentrado  
D - Vapor de Aquecimento  
E - Condensado



1 - Calandria  
2 - Separador (Flash Cooler)  
3 - Bomba de circulação  
4 - Bomba do concentrado

Fonte: [www.niro.com](http://www.niro.com)

## Evaporadores em convecção natural

- velocidade do fluido  $< 1$  a  $1,2$  m/s
- difícil aquecer material viscoso em circulação natural

## Circulação forçada

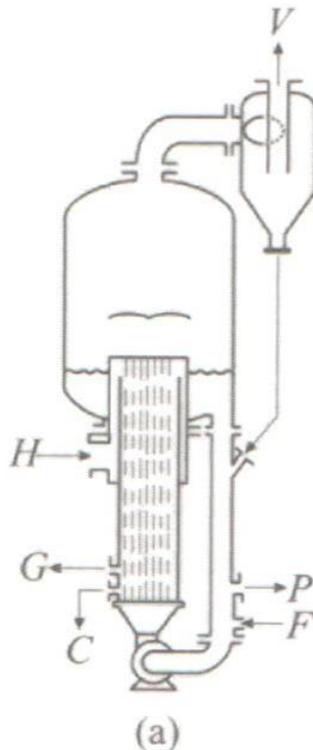
- velocidade do fluido =  $4,5$  a  $4,8$  m/s
- Tubo vertical ou horizontal



# TIPOS DE EVAPORADORES: VERTICAIS DE TUBO LONGO

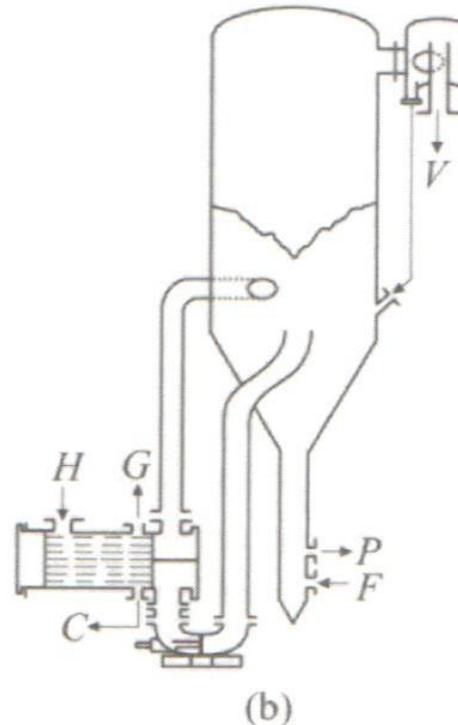
Adequado para maioria das aplicações (menos econômicos) –  
garantia de circulação por meio de uma bomba  
- Maiores coef. TC são obtidos quando solução entra em eb.  
nos tubos.

○ Circulação forçada

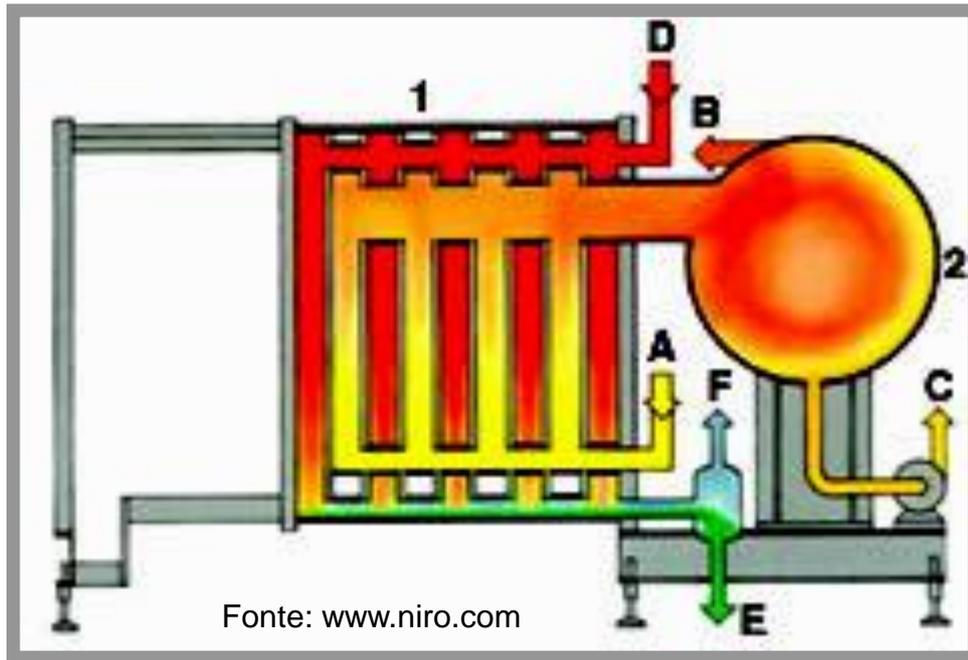


○ CF com tubo submerso

(+ usado)



# EVAPORADORES DE PLACAS



- Trocador de calor de placas com vapor de baixa pressão entre as placas com produto em posições alternadas
- O vapor é alimentado pelo topo
- O produto se move da base para o topo entre as placas, como no evaporador de filme

**Evaporação pode ocorrer** no interior dos canais das placas ou na câmara de separação de concentrado e vapor.

**Vantagens:** facilidade e flexibilidade na operação, altos coef. TC, operação com líquidos de alta viscosidade, baixo tempo de residência, baixa incrustação qdo operado a altas velocidades de circulação

**Desvantagens:** custo do investimento e alta perda de carga no trocador

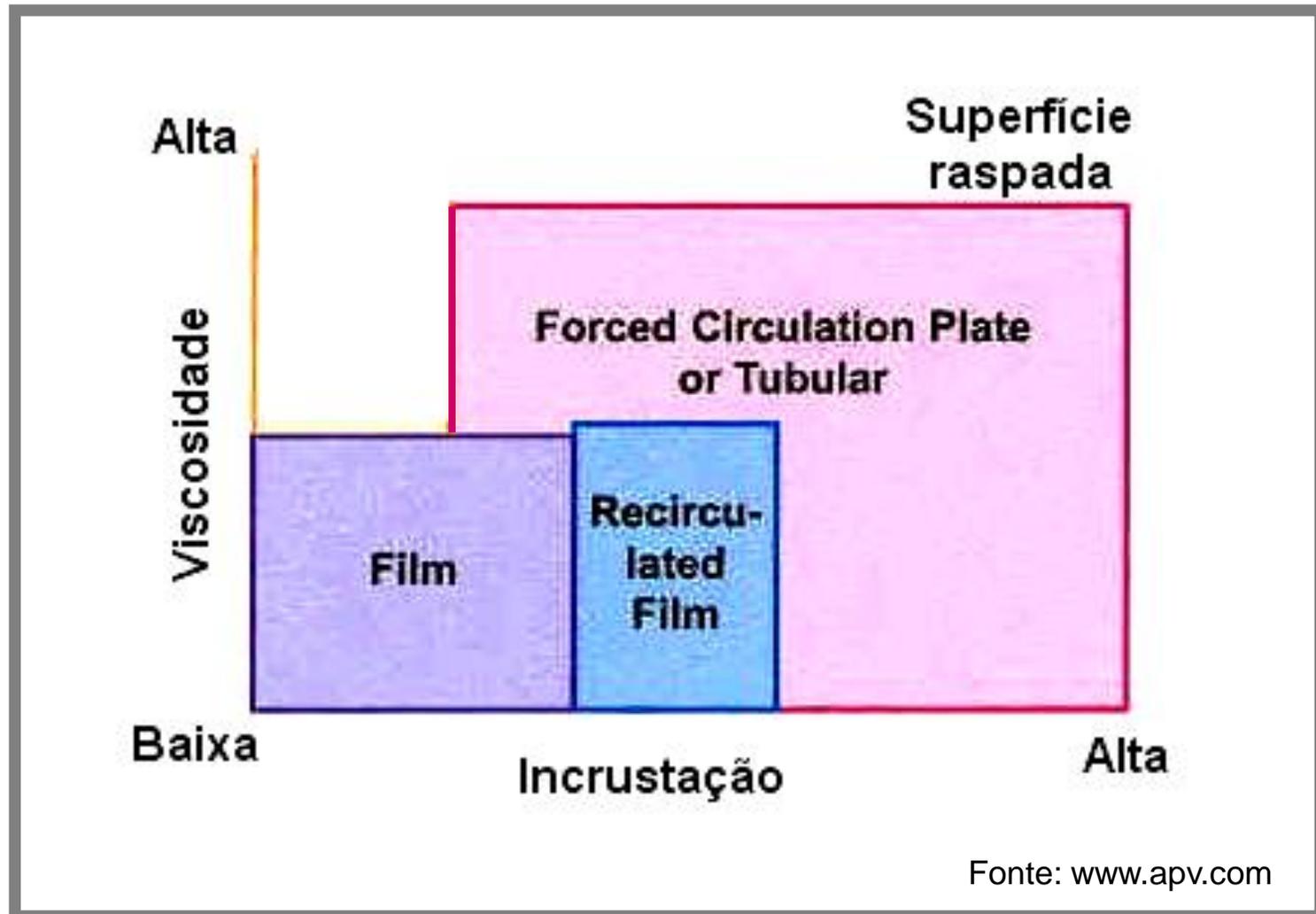
**Ex:** concentração de suco de frutas

# Evaporadores de Placas



Fonte: [www.apv.com](http://www.apv.com)

# *Escolha do tipo de evaporador*



# Comparação de tempo de residência e coeficientes de transferência de calor nos evaporadores

Tipo de evaporador	Número de estágios	Tempo de residência	U ( $W m^{-2}K^{-1}$ )	
			Baixa viscosidade	Alta viscosidade
Tachos à vácuo	Simple	> 30 min	500-1000	<500
Tubo curto vertical	Simple	--	570-2800	--
Filme ascendente	Simple	10-60 s	2250-6000	<300
Filme descendente	Simple	5-30 s	2000-3000	--
Placas	Triplo	2-30 s	2000-3000	--
Superfície cônica	Duplo	0,5-30s	2500	--
Superfície raspada	Simple	20-30 s	2000-3000	1700

# EVAPORAÇÃO EM SIMPLES EFEITO

Características da evaporação e do líquido a ser evaporado

Principais tipos de evaporadores

Elevação do ponto de ebulição  
(concentração e altura do líquido)

Balanços de Massa e Energia / Coef.  
Global de troca térmica

# ELEVAÇÃO DO PONTO DE EBULIÇÃO

## PELO EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DO LÍQUIDO

- A  $T$  de ebulição de uma solução é maior que a do solvente puro (*EPE*: elevação do ponto de ebulição)
- *EPE*: função da concentração e do tipo de soluto
- Regra prática útil para o cálculo de evaporadores é a **regra de Duhring**

A  $T_{eb}$  de uma dada solução a dada concentração é uma função linear da  $T_{eb}$  do solvente puro na mesma pressão



# ELEVAÇÃO DO PONTO DE EBULIÇÃO

## PELO EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DO LÍQUIDO

### ○ Regra de Duhring:

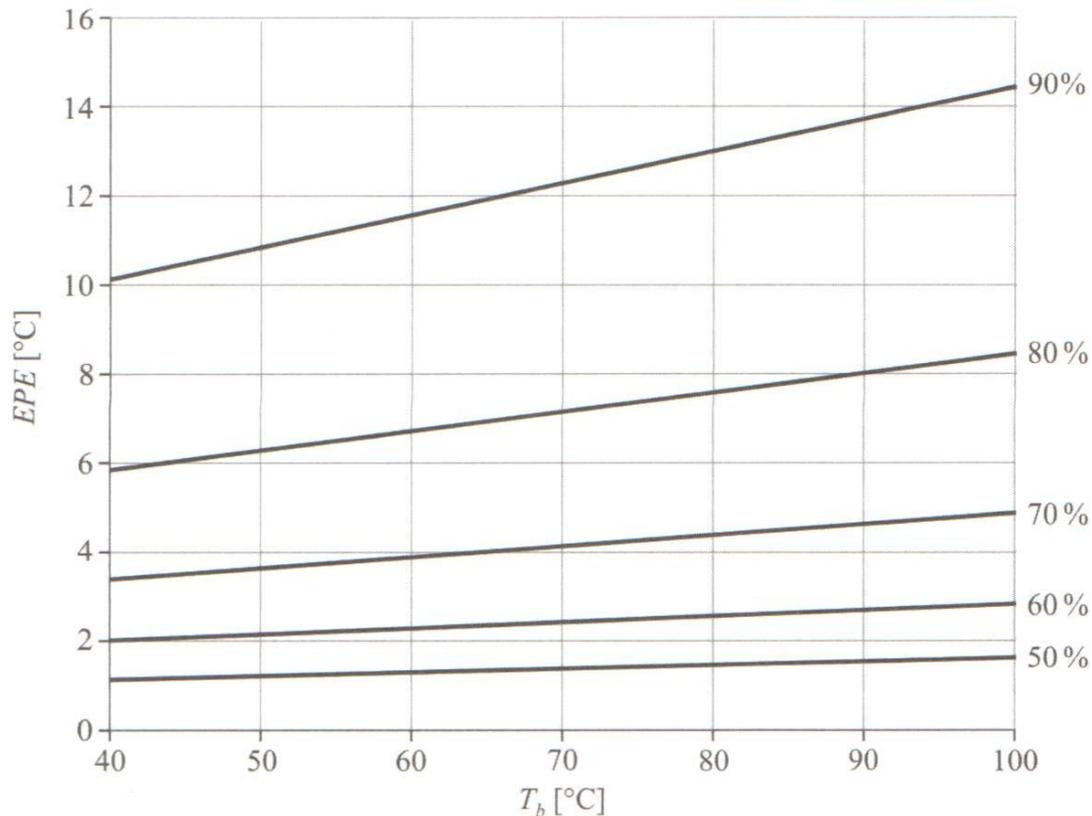


Figura 11.4 Elevação da temperatura de ebulição (EPE) de soluções aquosas de sacarose.

# ELEVAÇÃO DO PONTO DE EBULIÇÃO

## PELO EFEITO DA CONCENTRAÇÃO DO LÍQUIDO

### ○ Regra de Duhring:

No caso de soluções diluídas em situações compatíveis com a Lei de Raoult, a  $T_{eb}$  (K) da solução  $T$  pode ser calculada pela expressão:

$$\frac{1}{T_{eb_{solução}}} = \frac{1}{T_{eb_{solvente.puro}}} + \frac{R \cdot \ln x_1}{\Delta_{vap} \hat{H}_1}$$

Soluções diluídas: pode ser expressa em termos de concentração de soluto

$\Delta_{vap} H_1$ : Entalpia molar de vaporização do solvente puro  
 $x_1$ : fração molar de solvente na solução  
 $x_2$ : fração molar de soluto na solução

$$EPE = \frac{R \cdot T_{eb_{solvente.puro}}^2}{\Delta_{vap} \hat{H}_1} x_2$$



# USO DE EQUAÇÕES PARA DETERMINAR A ELEVAÇÃO DO PONTO DE EBULIÇÃO

- Elevação do ponto de ebulição:

$$\Delta T_b = \alpha C^\beta P^\delta \exp(\gamma C) \quad \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{C}: \text{concentração (°Brix)} \\ \mathbf{P}: \text{pressão (mbar)} \end{array} \right.$$

Parameters  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ , and  $\gamma$

Sample	$\alpha \times 10^2$	$\beta$	$\delta$	$\gamma \times 10^2$
Sucrose	3.061	0.094	0.136	5.328
Reducing sugars	2.227	0.588	0.119	3.593
Juices	1.360	0.749	0.106	3.390

Source: Crapiste, G.H. and Lozano, J.E., *J. Food Sci.*, 53(3), 865–868, 1988.



# ELEVAÇÃO DO PONTO DE EBULIÇÃO

## PELO EFEITO DA ALTURA DE LÍQUIDO (CARGA HIDROSTÁTICA)

- Denomina-se EH: a  $T_{eb}$  em um ponto situado abaixo da superfície do líquido se maior do que aquele da superfície. Esse efeito será mais pronunciado quanto maior a profundidade e quanto maior a velocidade no tubo.
- Dessa maneira, tem-se a diminuição da diferença de temperatura entre o vapor e a solução, reduzindo assim a capacidade de evaporação



# EVAPORAÇÃO EM SIMPLES EFEITO

Características da evaporação e do líquido a ser evaporado

Principais tipos de evaporadores

Elevação do ponto de ebulição  
(concentração e altura do líquido)

Balanços de Massa e Energia / Coef.  
Global de troca térmica

# BALANÇOS DE MASSA E DE ENERGIA

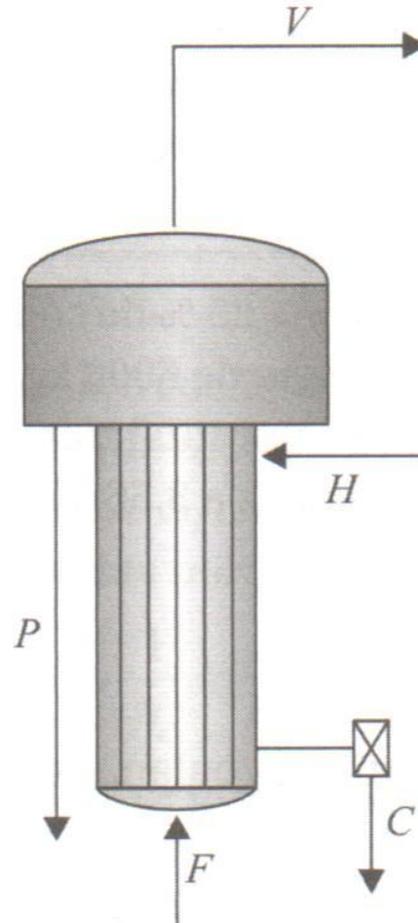


Figura 11.5 Esquema geral de um evaporador.

## EXERCÍCIO 1 – AULA 9

Uma solução aquosa a 5% em sólido é concentrada até 25% de sólidos em um evaporador empregando-se vapor saturado a 1,5 bar. A solução é alimentada a 40°C e com vazão de 6000 kg.h<sup>-1</sup>. A pressão absoluta no espaço de evaporação é de 27kPa. As perdas térmicas correspondem a 5% do calor total transferido. Os calores específicos das soluções podem ser admitidos como independentes da temperatura e iguais a 3,56 kJ.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>, e a EPE pode ser desconsiderada. Calcular a taxa de evaporação e o consumo de vapor.



**Tabela 11.3** Coeficiente convectivo de condensação  $h_e$

NÚMERO DE REYNOLDS [ADIMENSIONAL]	COEFICIENTE DE CONDENSAÇÃO $h_e$ [W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> ]
$N_{Re} \leq 30$	$h_e = 1,47 N_{Re}^{-1/3} \frac{k}{(V_L^2/g)^{1/3}} \quad (11.16)$
$30 < N_{Re} \leq 1800$	$h_e = \frac{N_{Re}}{(1,08 N_{Re}^{1,22} - 5,2)} \frac{k}{(V_L^2/g)^{1/3}} \quad (11.17)$
$N_{Re} > 1800$	$h_e = \frac{N_{Re}}{[8750 + 58 N_{Pr}^{-0,5} (N_{Re}^{0,75} - 253)]} \frac{k}{(V_L^2/g)^{1/3}} \quad (11.18)$

**Tabela 11.4** Coeficientes globais típicos de evaporadores

TIPO DE EVAPORADOR	$U$ (W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> )
Vertical de tubo longo:	
Circulação natural	1000 – 2500
Circulação forçada	2000 – 5000
.....	
Filme agitado, líquido newtoniano, viscosidade:	
$1 \times 10^{-3}$ Pa · s	2000
$10^{-1}$ Pa · s	1500
10 Pa · s	600

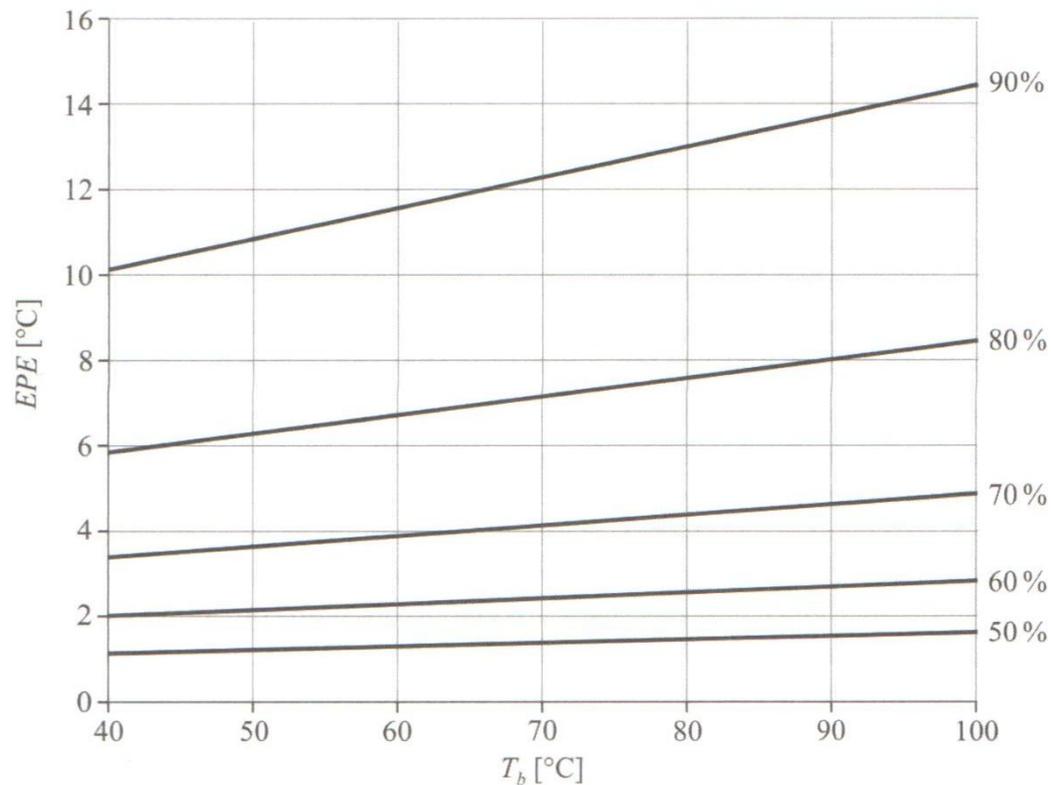
## EXERCÍCIO 2 – AULA 9

Concentram-se  $10000 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$  de uma solução a 10% em açúcar até 30% em um evaporador, empregando-se vapor saturado 1,5 bar. A pressão absoluta no espaço de evaporação é de 0,132 bar. O coeficiente global de transferência de calor é estimado em  $2000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ . A temperatura de alimentação é  $30^\circ\text{C}$ . Os calores específicos das soluções podem ser admitidos como independentes da temperatura e expressos por:  $C_F = 4,186 - 0,025B$ , sendo B a concentração da solução em °Brix e  $C_F$  em  $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Calcular o consumo de vapor e a área de transferência de calor necessária.



**Tabela 11.2** Parâmetros da Equação 11.3

SOLUÇÃO AQUOSA	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
Sacarose	0,030612	0,09417	0,05329	0,1356
Açúcar redutor	0,022271	0,5878	0,03593	0,1186
Suco de maçã	0,013602	0,7489	0,03390	0,1054



**Figura 11.4** Elevação da temperatura de ebulição (EPE) de soluções aquosas de sacarose.



# *Alternativas para economia de energia na evaporação*

- Múltiplos efeitos
- Recompressão de vapor (mecânica ou térmica)
- Pré-aquecimento do produto
- Aproveitamento da energia do concentrado

