



OPERAÇÕES

UNITÁRIAS II

**AULA 11: 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)

Balancos 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 (licor negro oriundo do tratamento da madeira) é concentrada até permitir sua queima nas caldeiras (recuperação dos sais de sódio)

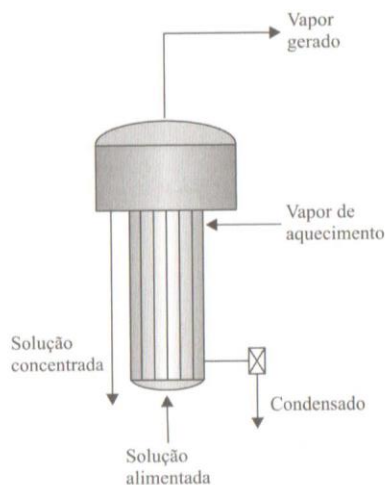


Figura 11.1 Esquema de um evaporador vertical de tubo longo.

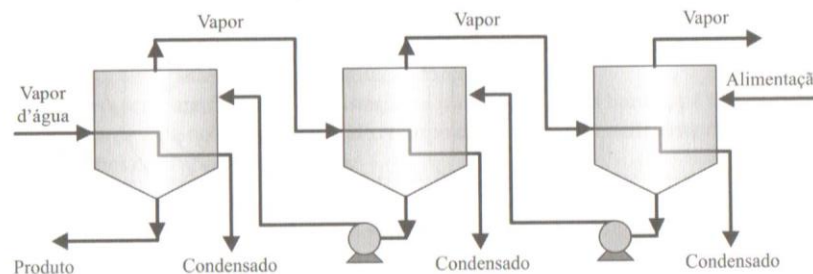


Figura 11.2 Sistema de evaporação em múltiplo efeito.



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)

Balanços 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 : 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

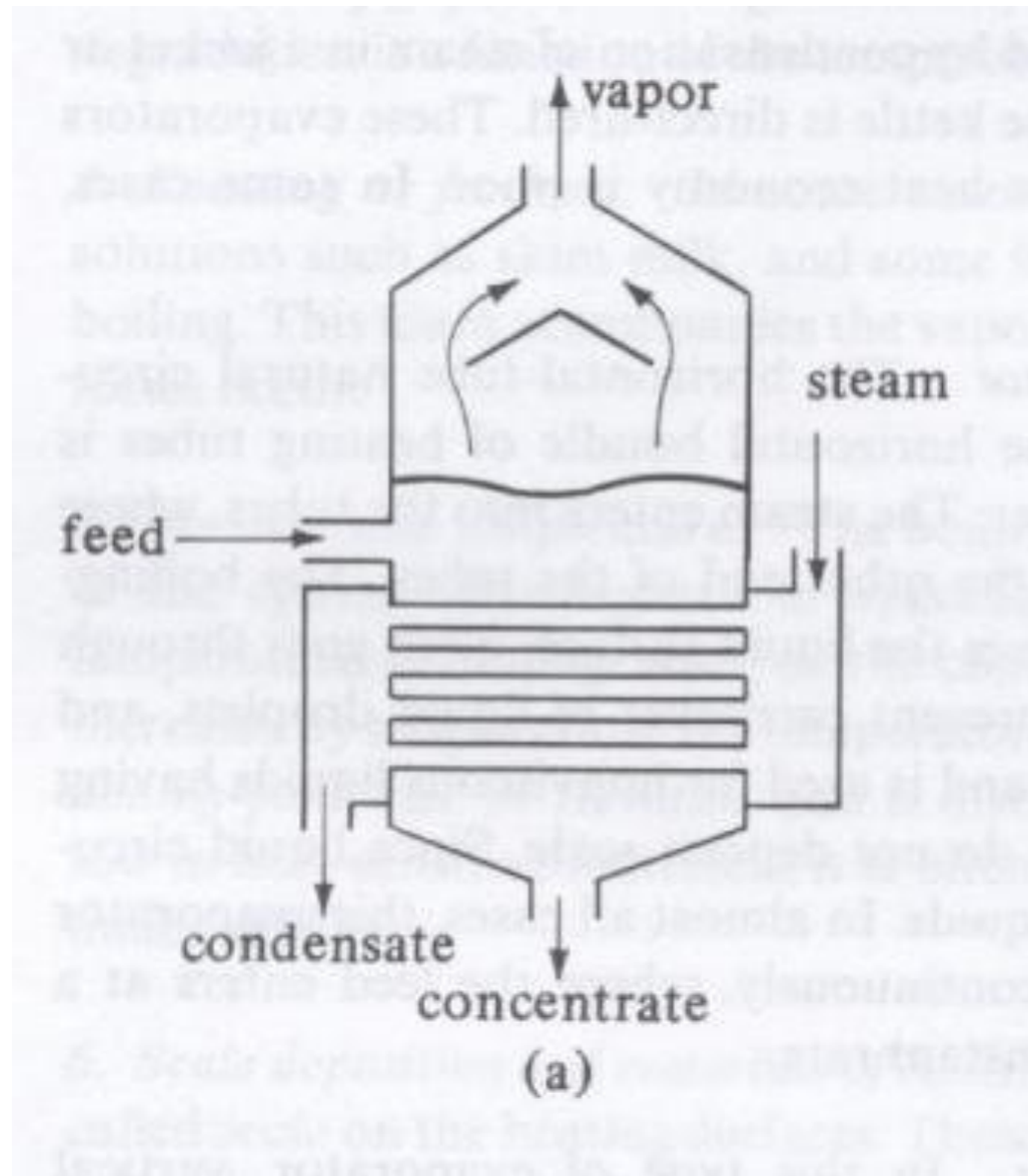
- **Tachos abertos e à vácuo**
- **Evaporadores de tubo vertical
ou horizontal com circulação natural**
- **Evaporadores de circulação forçada**
- **Evaporadores de filme ascendente**
- **Evaporadores de filme descendente**
- **Evaporadores de placas**



Evaporador de Tubo Horizontal

-Tubo horizontal

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

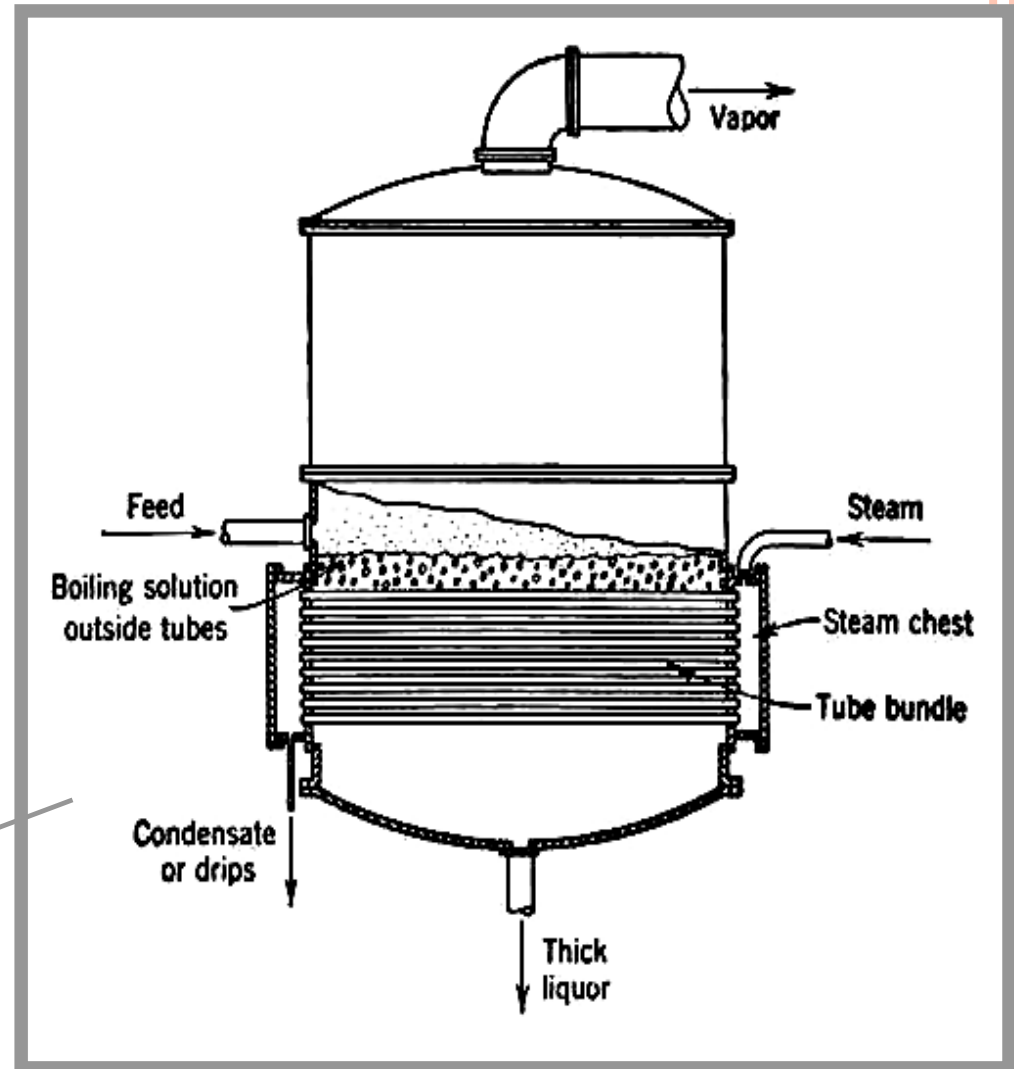


Evaporador de Tubo Horizontal

- 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.

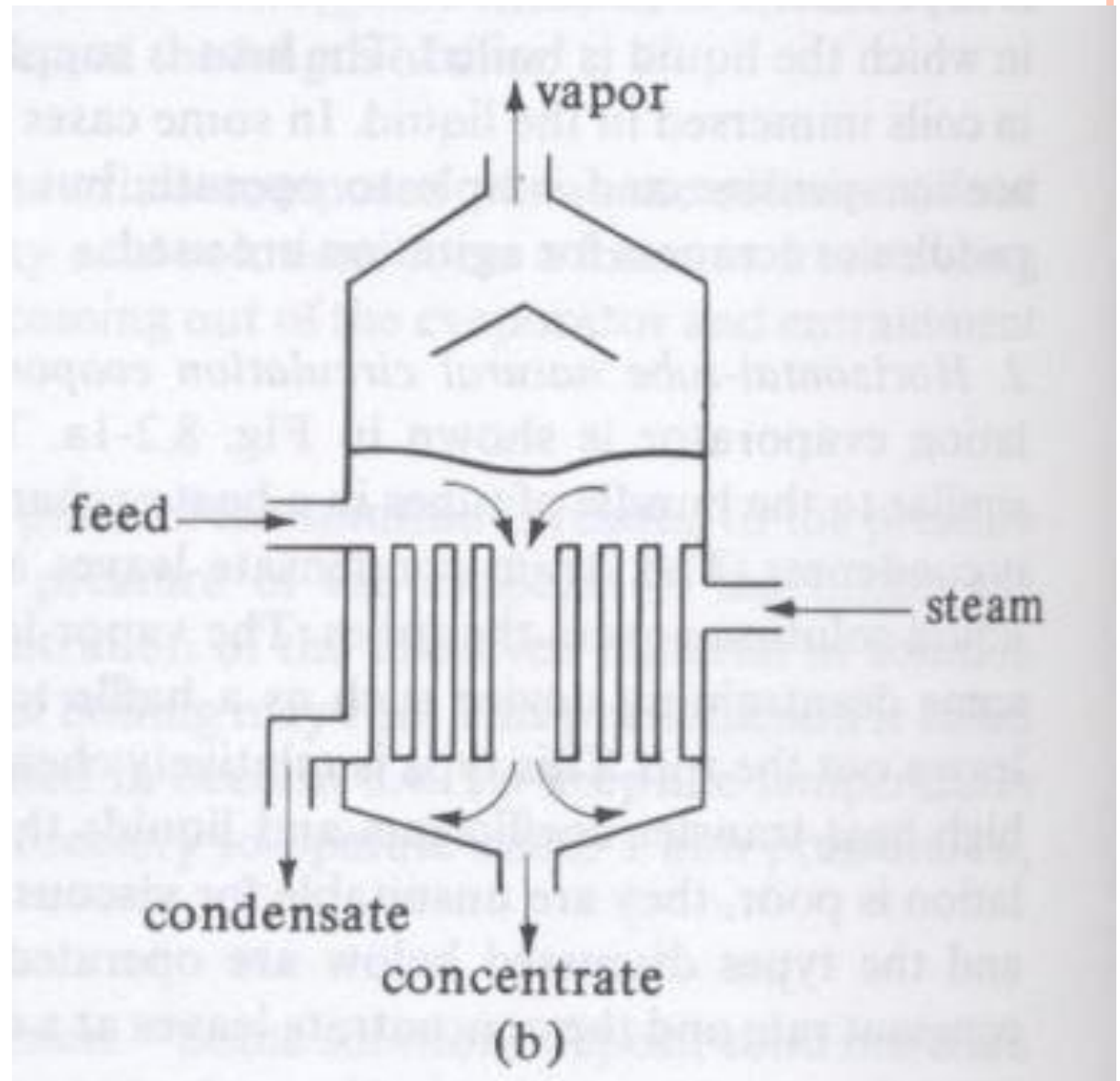
Convecção
natural



EVAPORADOR DE TUBO VERTICAL CURTO

-Tubo vertical

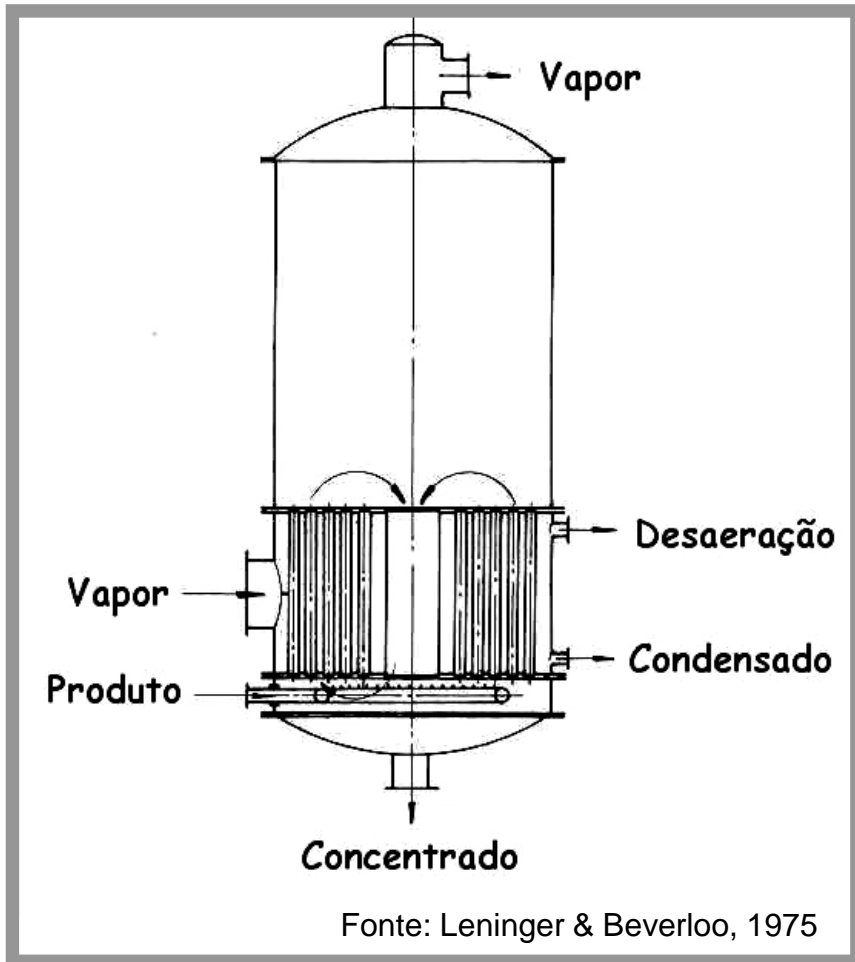
$1100 < U < 2800 \text{ W/m}^2\text{k}$



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)

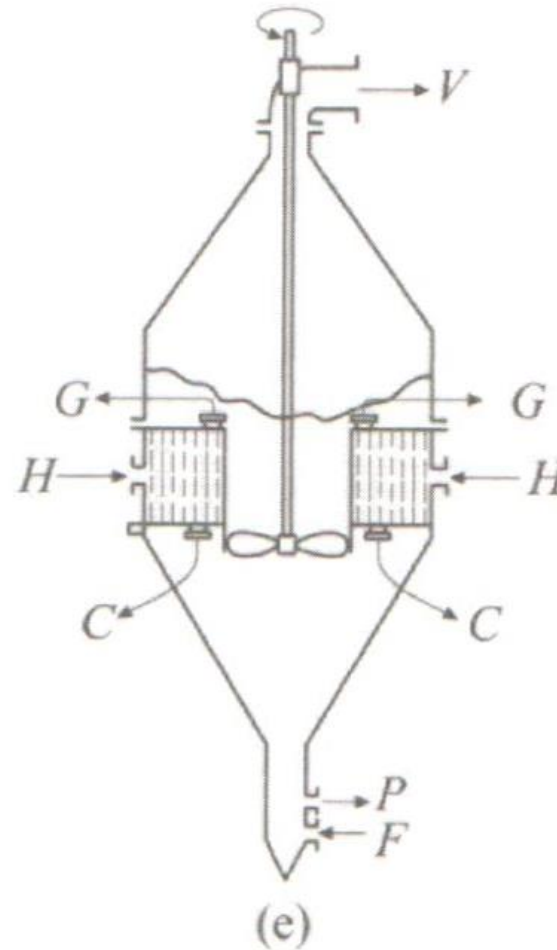


EVAPORADOR DE TUBO VERTICAL CURTO

CALANDRIA (USA)

ROBERTS (EUROPA)

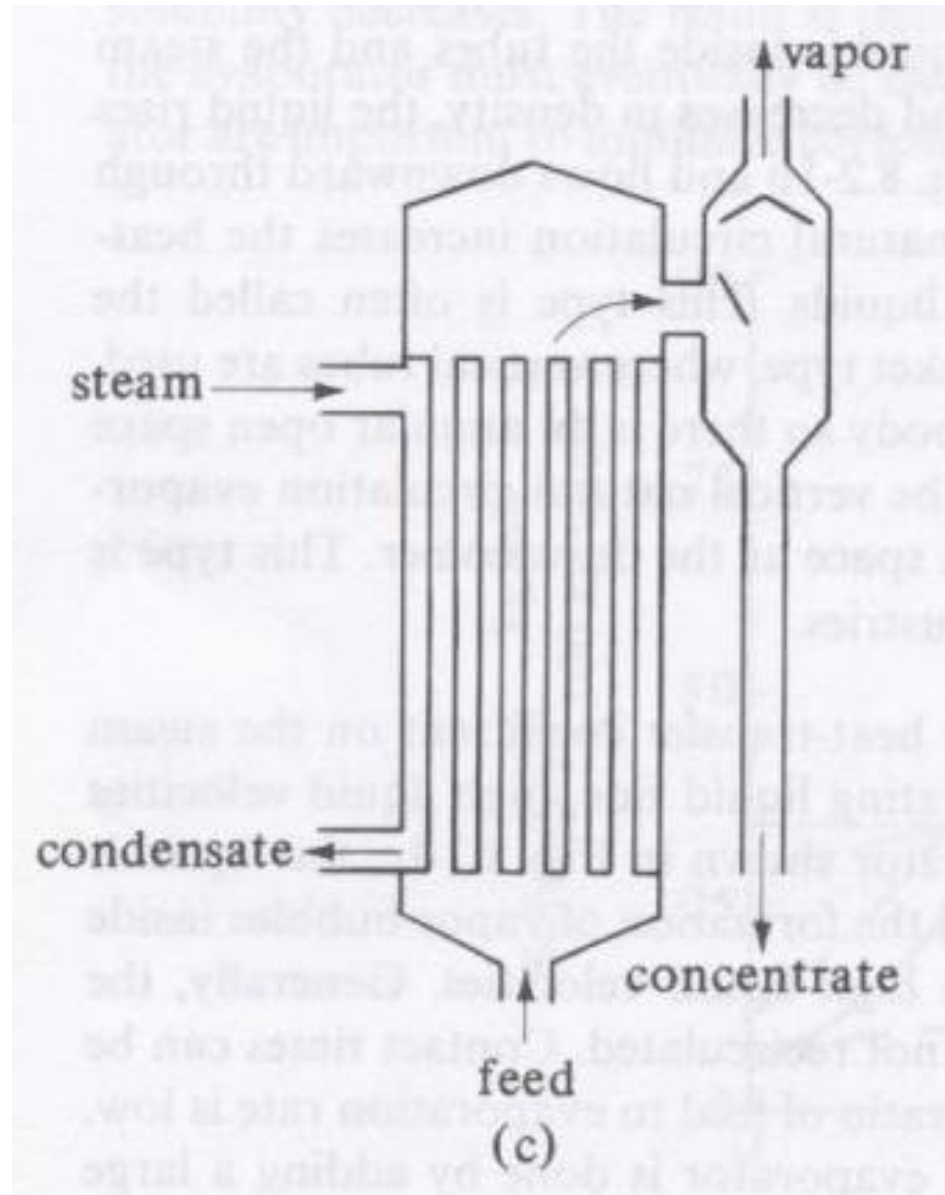
- Com agitação



EVAPORADOR DE TUBO VERTICAL LONGO

-Tubo longo vertical

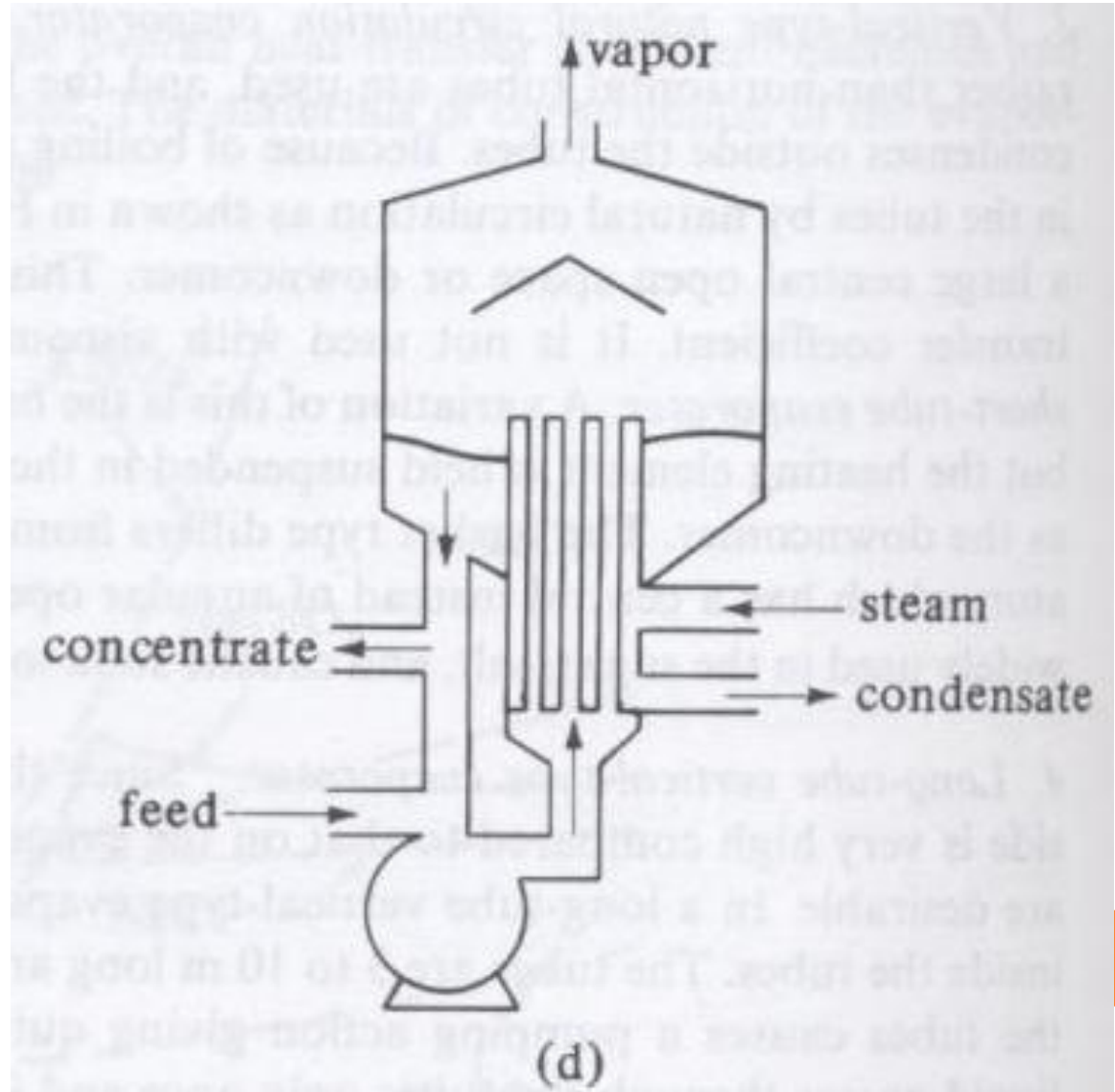
$1100 < U < 4500 \text{ W/m}^2\text{k}$



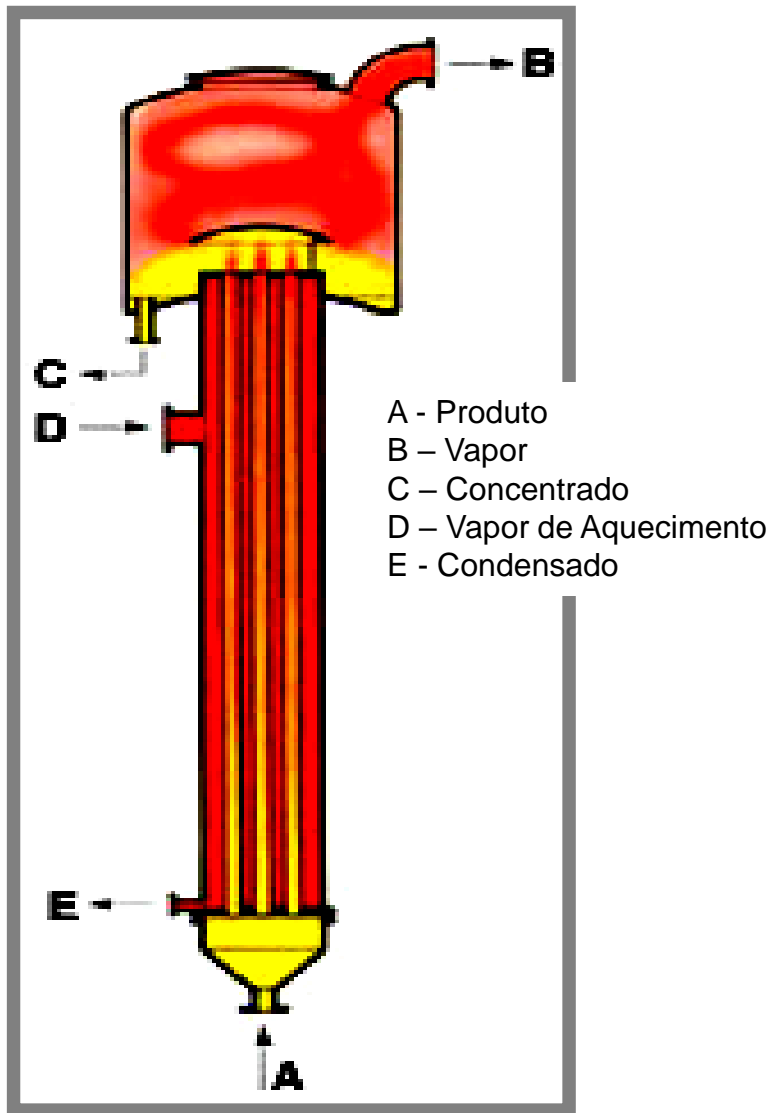
EVAPORADOR DE TUBO VERTICAL LONGO

-Circulação forçada

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



EVAPORADOR DE TUBO VERTICAL LONGO



Fonte: www.niro.com

Filme Ascendente “Rising film”

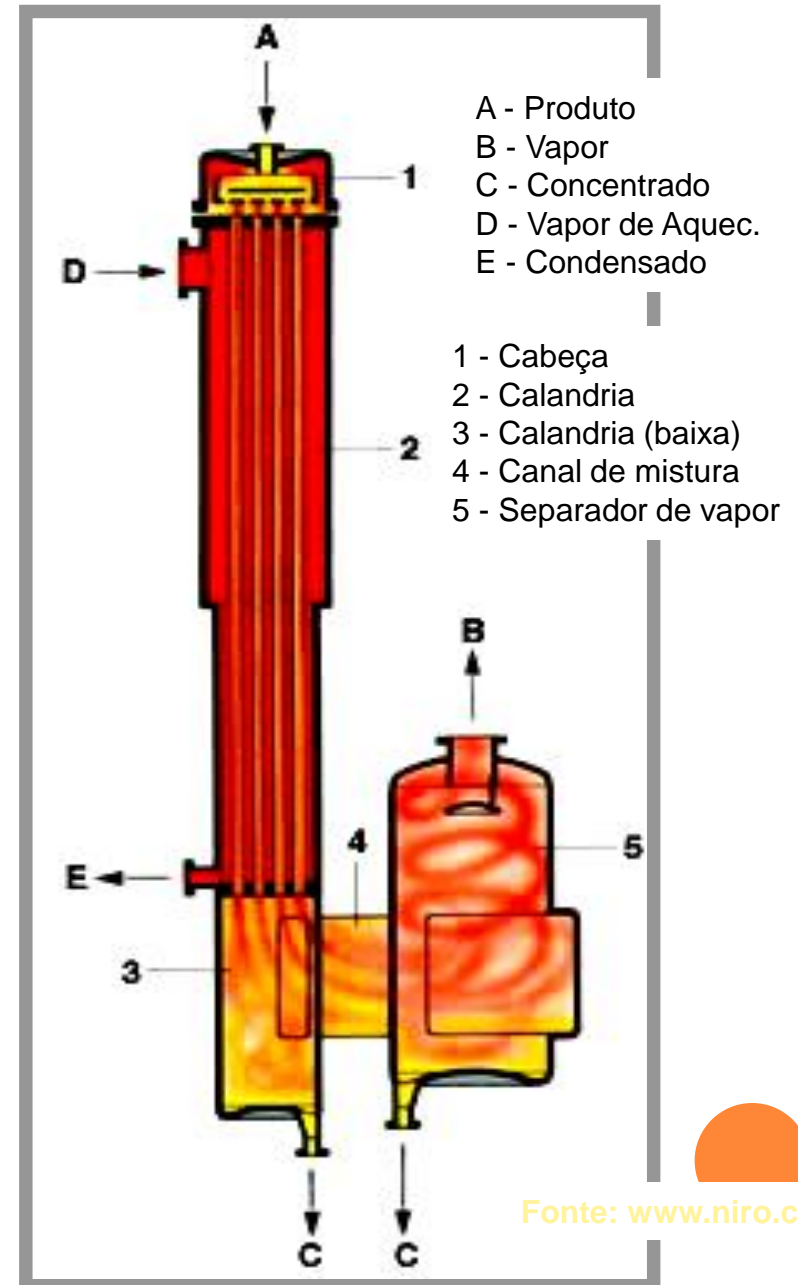
- Circulação natural com fluxo ascendente
- Tubos de 1 1/4” a 2” de diâmetro e 3,5 a 5,5 m de comprimento para movimentar o líquido dentro dos tubos, aquecimento é com vapor por fora do tubo
- Prato defletor está no topo do feixe de tubos para evitar o arraste de líquido e reduzir perdas

EVAPORADOR DE TUBO VERTICAL LONGO

Filme descendente “Falling film”

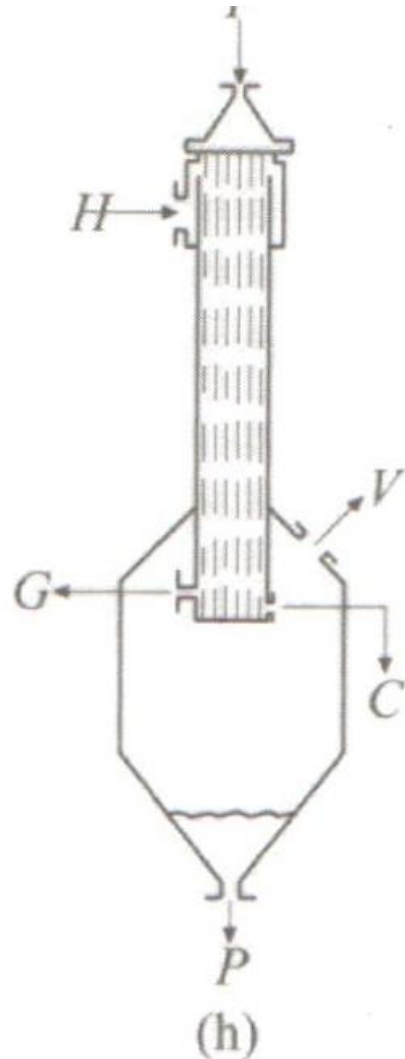
- Reduz a quantidade de tratamento ou exposição do produto ao calor
- Tubos de 1 1/2” a 2” de diâmetro e acima de 9 m de comprimento.

<https://www.youtube.com/watch?v=3T8Km9BYHeg>



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.

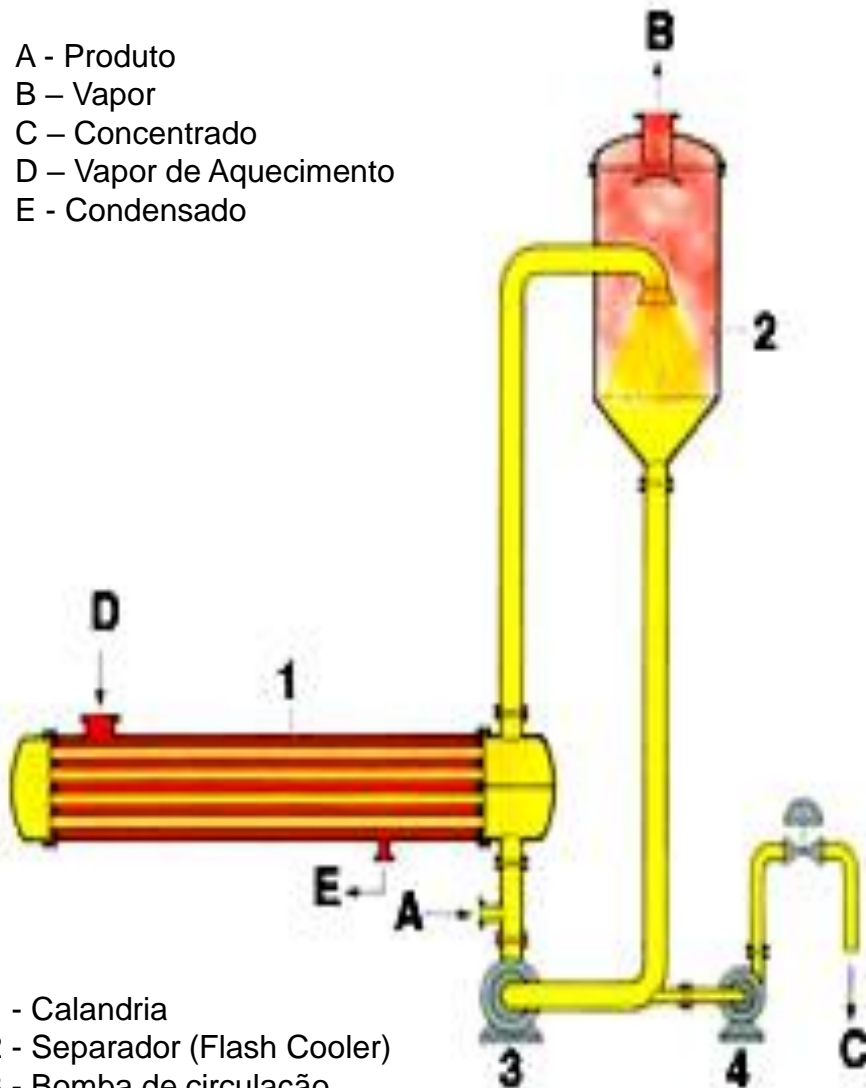
Ex: soluções termicamente sensíveis (suco de laranja)

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

Evaporadores em convecção natural

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

Circulação forçada

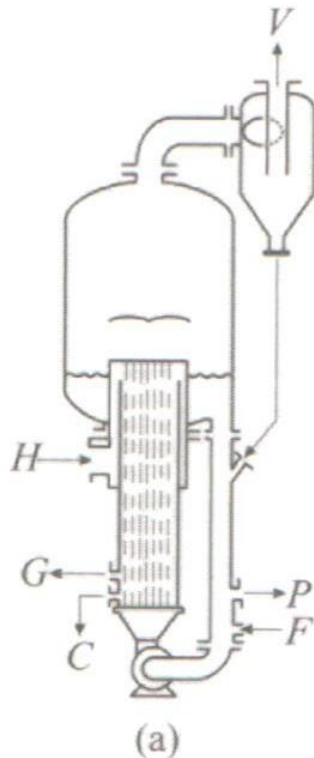
- velocidade do fluido = $4,5$ a $4,8$ m/s
- Tubo vertical ou horizontal



TIPOS DE EVAPORADORES: VERTICAIS DE TUBO LONGO

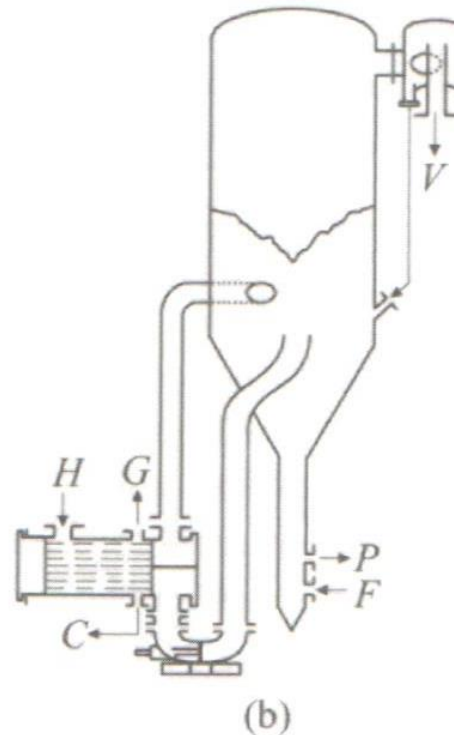
Adequado para maioria das aplicações (menos econômicos) –
garantia de circulação por meio de uma bomba
- Maiores coef. TC são obtidos quando solução entra em eb.
nos tubos.

○ Circulação forçada

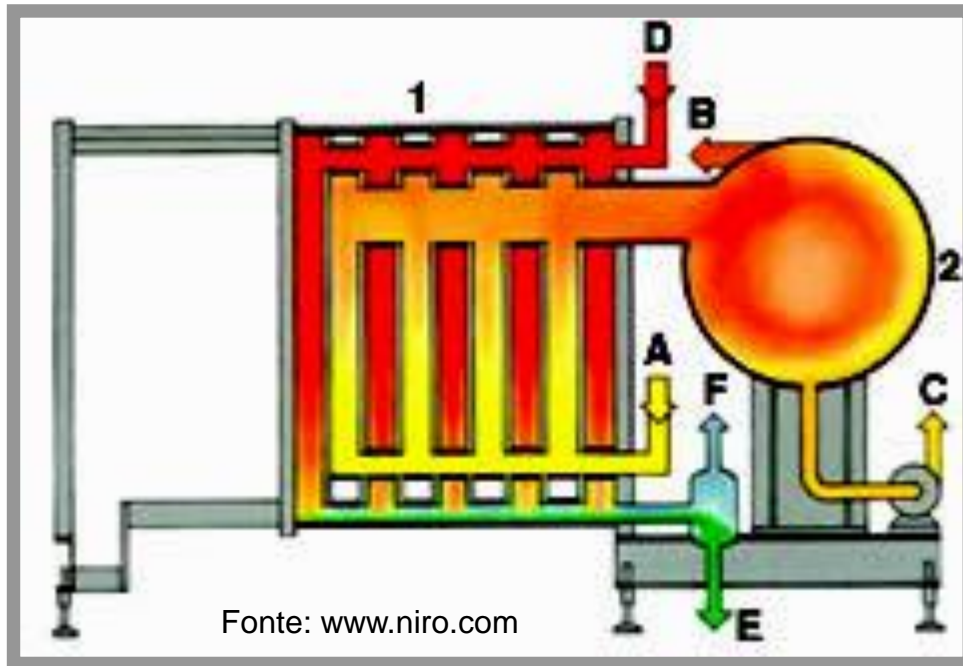


○ CF com tubo submerso

(+ 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

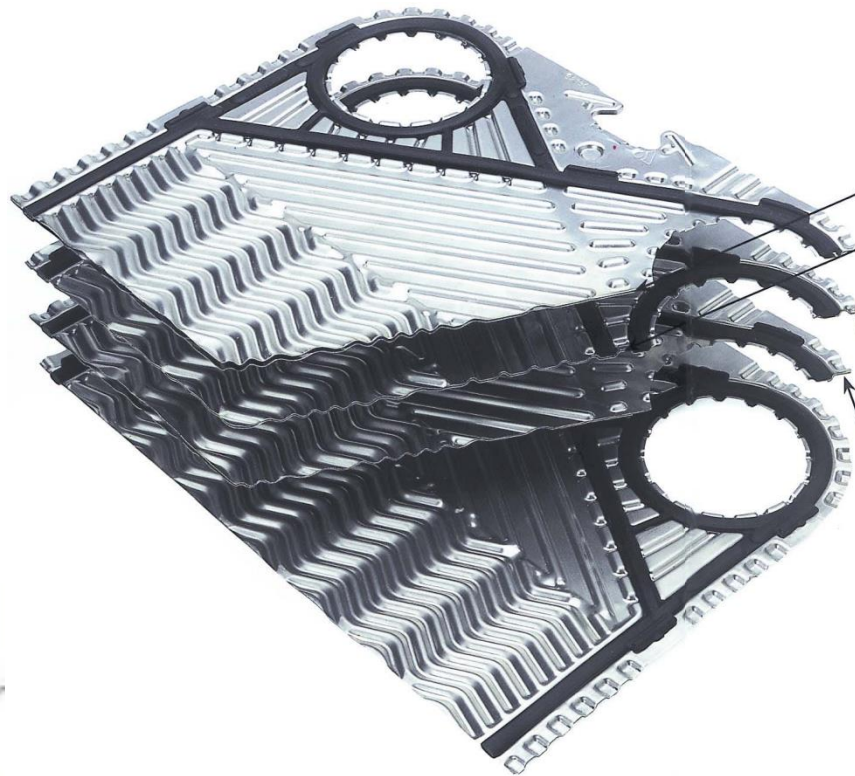
Evaporação pode ocorrer no interior dos canais das placas ou na câmara de separação de concentrado e vapor.

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

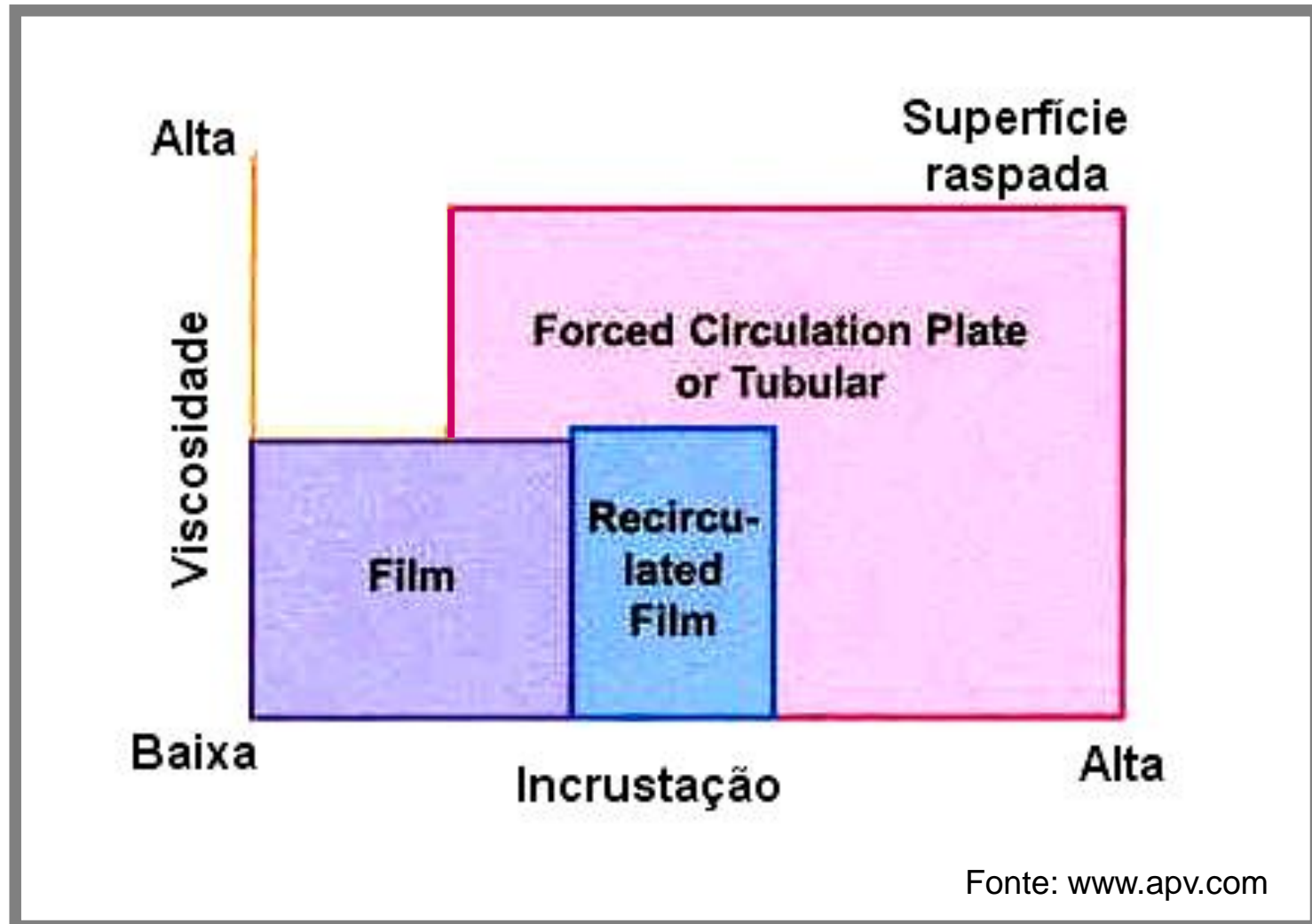
Ex: concentração de suco de frutas

Evaporadores de Placas



Fonte: www.apv.com

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:

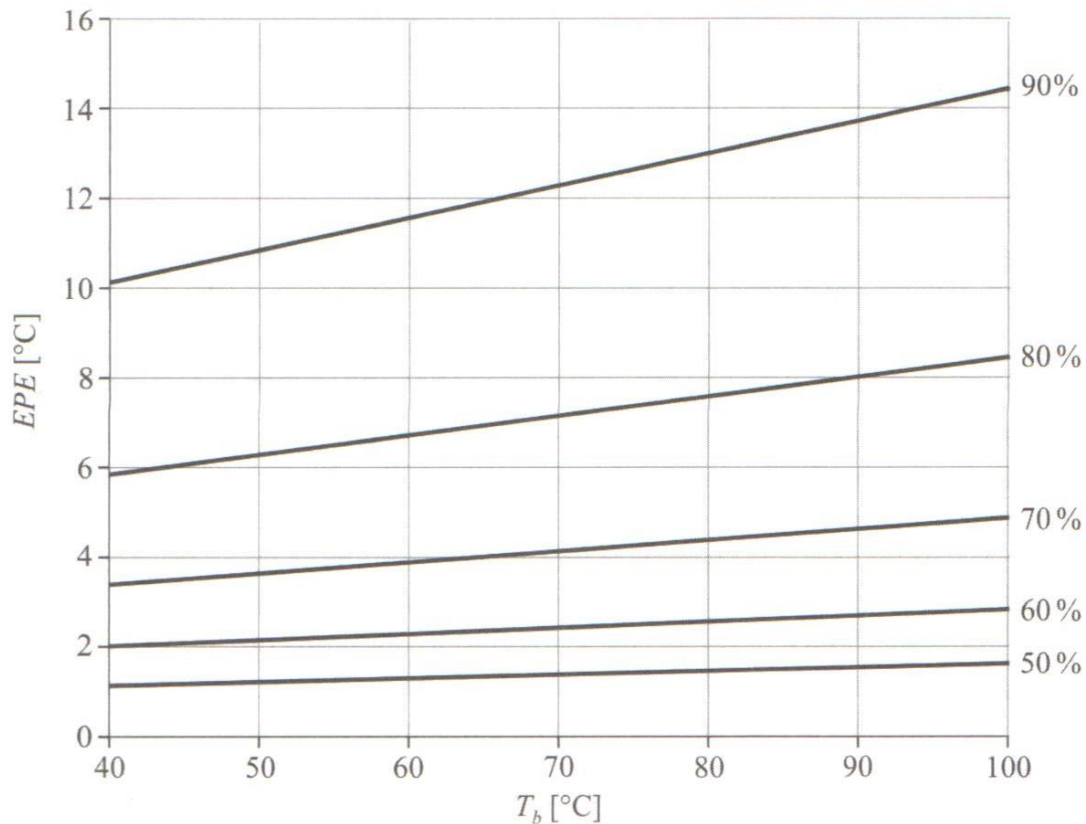


Figura 11.4 Elevação da temperatura de ebulição (EPE) de soluções aquosas de sacarose.

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 α , β , δ , and γ

Sample	$\alpha \times 10^2$	β	δ	$\gamma \times 10^2$
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

ESQUEMATIZE OS BALANÇOS DE MASSA E DE ENERGIA:

Evaporador com trocador de tubo vertical

Correntes indicadas:

F: Alimentação

P: Produto concentrado

V: vapor do solvente

H: vapor de aquecimento

C: Condensado

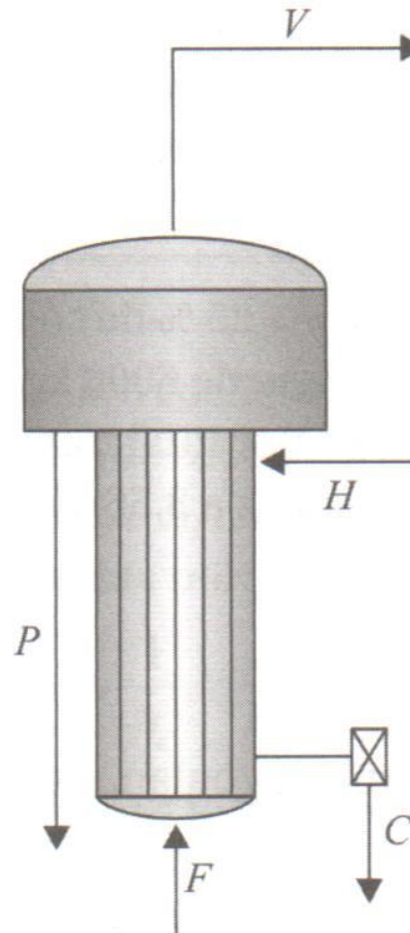


Figura 11.5 Esquema geral de um evaporador.

EXERCÍCIO 1 – AULA 11

Uma solução aquosa com 5% de sólidos 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⁻¹. 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⁻¹.K⁻¹, e a EPE pode ser desconsiderada. Calcular a taxa de evaporação e o consumo de vapor.



Tabela A.1 Tabela de propriedades termodinâmicas de água saturada

T [K]	P _w [kPa]*	ρ [kg · m ⁻³]		H [kJ · kg ⁻¹]		Δ _{vap} H [kJ · kg ⁻¹]	C _v [kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹]		C _p [kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹]		μ [10 ⁻⁶ Pa · s]**		k [W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	
		L**	V	L	V	L	V	L	V	L	V	L	V	
273,16	0,612	999,8	4,85×10 ⁻³	0,0	2500,5	2500,5	4,217	1,418	4,220	1,884	1749,8	7,98	0,5676	0,0181
275	0,699	999,9	5,51×10 ⁻³	7,77	2504,1	2496,3	4,213	1,420	4,214	1,886	1651,8	8,07	0,5716	0,0183
280	0,992	999,9	7,68×10 ⁻³	28,80	2513,5	2484,7	4,200	1,424	4,201	1,891	1421,9	8,29	0,5818	0,0186
285	1,389	999,5	1,06×10 ⁻²	49,79	2522,8	2473,0	4,185	1,429	4,193	1,897	1226,0	8,50	0,5912	0,0189
290	1,920	998,8	1,44×10 ⁻²	70,73	2531,9	2461,2	4,168	1,433	4,187	1,902	1080,3	8,71	0,5998	0,0193
295	2,621	997,8	1,93×10 ⁻²	91,66	2541,0	2449,4	4,150	1,438	4,183	1,908	958,8	8,91	0,6078	0,0196
300	3,537	996,5	2,56×10 ⁻²	112,57	2550,1	2437,5	4,131	1,442	4,181	1,914	854,8	9,11	0,6151	0,0198
305	4,720	995,0	3,36×10 ⁻²	133,47	2559,1	2425,6	4,110	1,447	4,180	1,920	768,6	9,31	0,6219	0,0201
310	6,232	993,3	4,37×10 ⁻²	154,37	2568,0	2413,6	4,088	1,452	4,180	1,927	694,7	9,51	0,6282	0,0204
315	8,146	991,4	5,62×10 ⁻²	175,27	2576,9	2401,6	4,065	1,457	4,180	1,934	630,8	9,71	0,6342	0,0207
320	10,55	989,4	7,17×10 ⁻²	196,18	2585,8	2389,6	4,042	1,463	4,181	1,942	576,8	9,90	0,6397	0,0210
325	13,53	987,1	9,06×10 ⁻²	217,09	2594,6	2377,5	4,017	1,469	4,182	1,950	528,1	10,1	0,6449	0,0213
330	17,22	984,7	1,14×10 ⁻¹	238,01	2603,4	2365,4	3,993	1,475	4,184	1,959	488,9	10,3	0,6498	0,0216
335	21,72	982,2	1,41×10 ⁻¹	258,93	2612,1	2353,2	3,967	1,482	4,186	1,968	452,9	10,5	0,6543	0,0219
340	27,19	979,5	1,74×10 ⁻¹	279,87	2620,8	2340,9	3,942	1,489	4,189	1,979	420,1	10,7	0,6586	0,0223
345	33,79	976,7	2,14×10 ⁻¹	300,83	2629,3	2328,5	3,916	1,497	4,191	1,991	389,4	10,9	0,6626	0,0226
350	41,69	973,7	2,60×10 ⁻¹	321,80	2637,8	2316,0	3,890	1,505	4,195	2,003	365,3	11,1	0,6664	0,0229
355	51,08	970,6	3,15×10 ⁻¹	342,79	2646,2	2303,4	3,863	1,515	4,198	2,017	343,2	11,3	0,6699	0,0233
360	62,20	967,4	3,79×10 ⁻¹	363,80	2654,5	2290,7	3,837	1,525	4,202	2,033	324,1	11,5	0,6731	0,0237
365	75,27	964,0	4,53×10 ⁻¹	384,83	2662,7	2277,9	3,811	1,536	4,207	2,049	306,1	11,7	0,6760	0,0241
370	90,54	960,6	5,38×10 ⁻¹	405,89	2670,8	2264,9	3,785	1,548	4,212	2,068	289,1	11,9	0,6787	0,0245
373,16	101,3	958,3	5,98×10 ⁻¹	419,17	2675,8	2256,6	3,768	1,556	4,216	2,080	279,1	12,0	0,6803	0,0248
375	108,3	957,0	6,36×10 ⁻¹	426,98	2678,7	2251,7	3,759	1,561	4,218	2,088	274,1	12,1	0,6811	0,0249
380	128,9	953,3	7,48×10 ⁻¹	448,09	2686,5	2238,4	3,733	1,575	4,224	2,110	260,1	12,3	0,6832	0,0254
385	152,5	949,5	8,76×10 ⁻¹	469,25	2694,1	2224,8	3,707	1,590	4,231	2,134	248,0	12,5	0,6851	0,0258

Tabela 11.3 Coeficiente convectivo de condensação h_e

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

Tabela 11.4 Coeficientes globais típicos de evaporadores

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

EXERCÍCIO 2 – AULA 11

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°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.



335	21,72	982,2	$1,41 \times 10^{-1}$	258,93	2612,1	2353,2	3,967	1,482	4,186	1,96
340	27,19	979,5	$1,74 \times 10^{-1}$	279,87	2620,8	2340,9	3,942	1,489	4,189	1,97
345	33,79	976,7	$2,14 \times 10^{-1}$	300,83	2629,3	2328,5	3,916	1,497	4,191	1,99
350	41,69	973,7	$2,60 \times 10^{-1}$	321,80	2637,8	2316,0	3,890	1,505	4,195	2,00
355	51,08	970,6	$3,15 \times 10^{-1}$	342,79	2646,2	2303,4	3,863	1,515	4,198	2,01
360	62,20	967,4	$3,79 \times 10^{-1}$	363,80	2654,5	2290,7	3,837	1,525	4,202	2,03
365	75,27	964,0	$4,53 \times 10^{-1}$	384,83	2662,7	2277,9	3,811	1,536	4,207	2,04
370	90,54	960,6	$5,38 \times 10^{-1}$	405,89	2670,8	2264,9	3,785	1,548	4,212	2,06
373,16	101,3	958,3	$5,98 \times 10^{-1}$	419,17	2675,8	2256,6	3,768	1,556	4,216	2,08
375	108,3	957,0	$6,36 \times 10^{-1}$	426,98	2678,7	2251,7	3,759	1,561	4,218	2,08
380	128,9	953,3	$7,48 \times 10^{-1}$	448,09	2686,5	2238,4	3,733	1,575	4,224	2,11
385	152,5	949,5	$8,76 \times 10^{-1}$	469,25	2694,1	2224,8	3,707	1,590	4,231	2,13
390	179,7	945,8	$1,00$	489,46	2701,6	2211,1	3,681	1,605	4,238	2,15

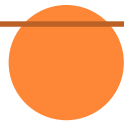


Tabela 11.2 Parâmetros da Equação 11.3

SOLUÇÃO AQUOSA	α	β	γ	δ
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

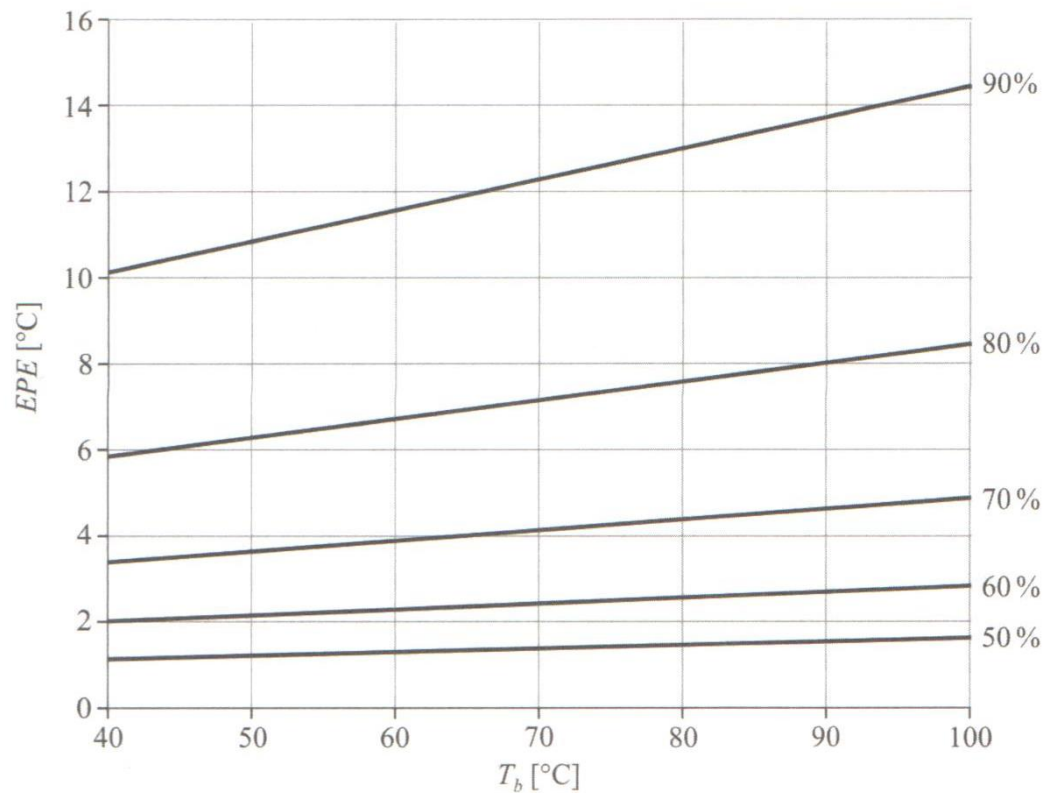


Figura 11.4 Elevação da temperatura de ebulição (EPE) de soluções aquosas de sacarose.



Alternativas para economia de energia na evaporação

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

