

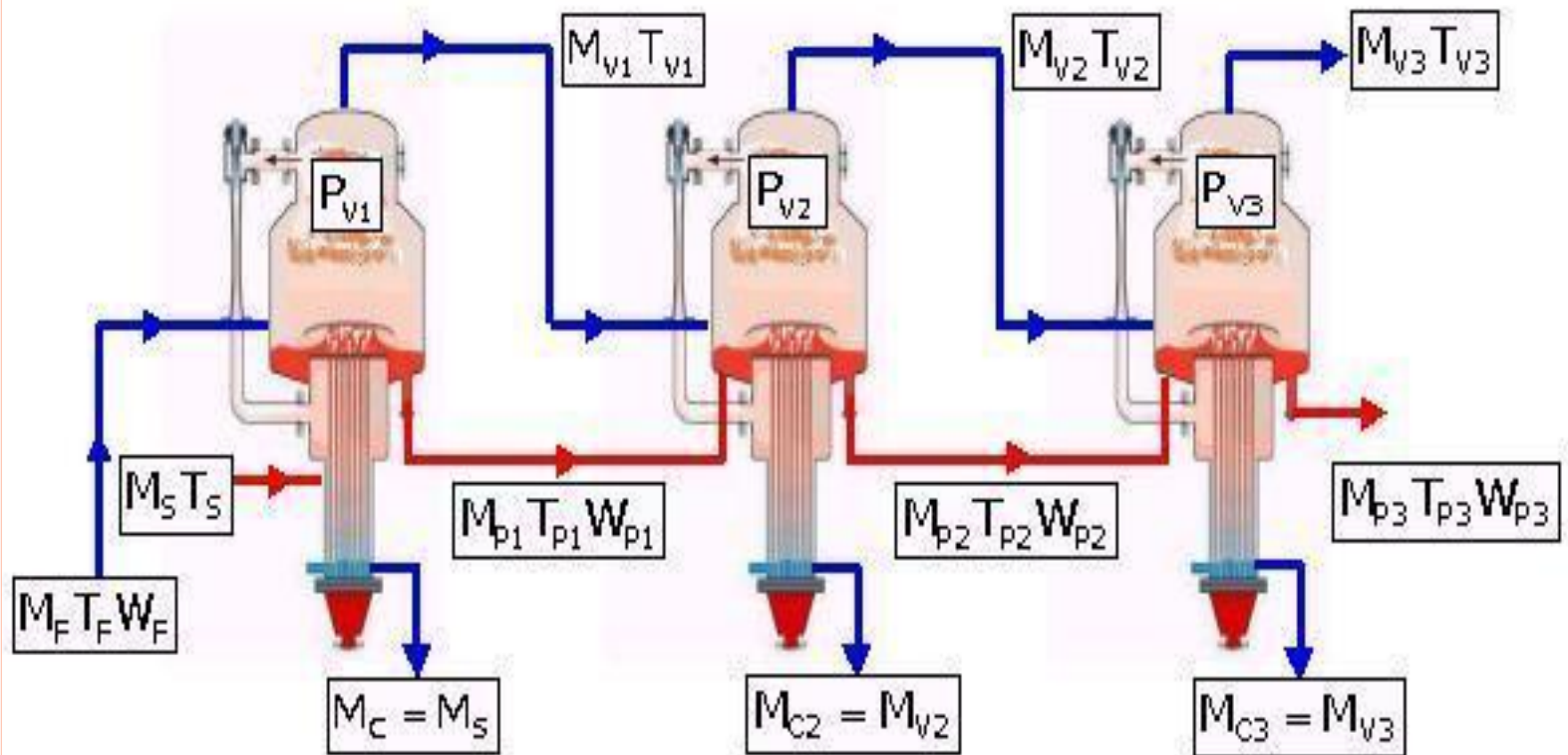


OPERAÇÕES UNITÁRIAS II

AULA 10: EVAPORAÇÃO EM MÚLTIPLO EFEITO

Profa. Dra. Milena Martelli Tosi

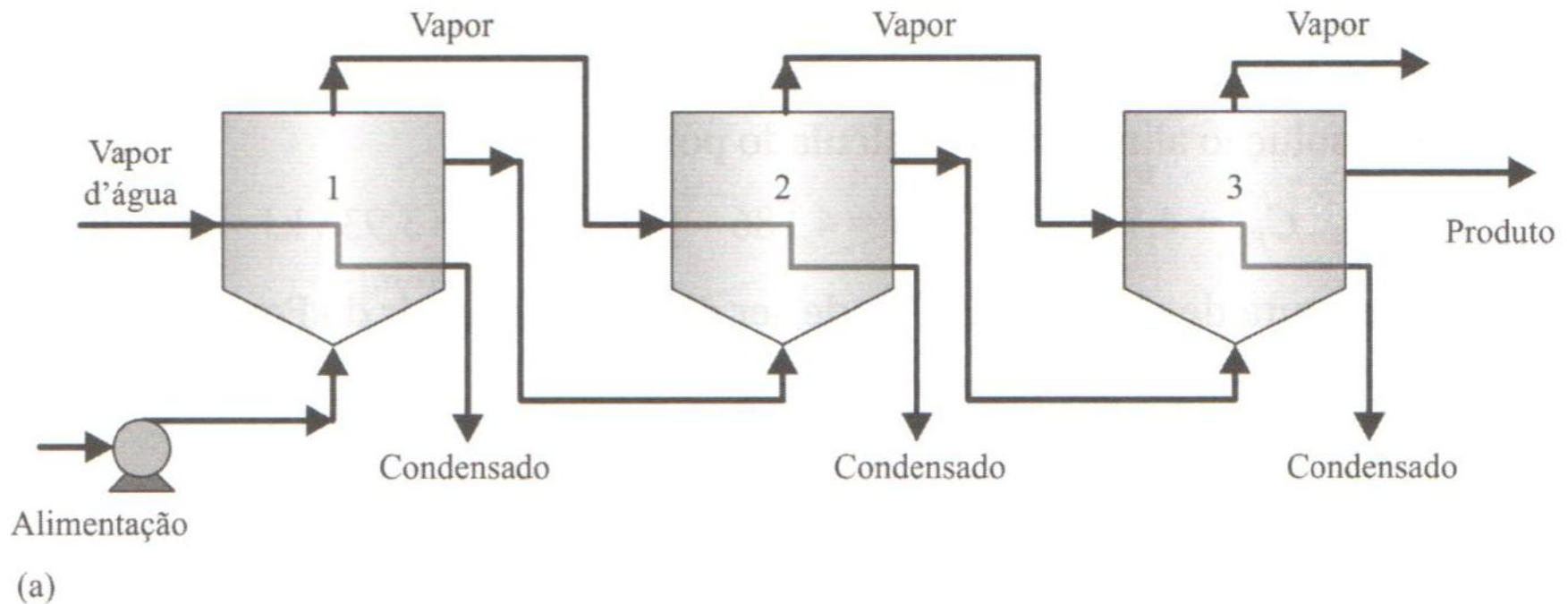
EVAPORADORES MÚLTIPLO EFEITO



ESQUEMA DE EVAPORADOR TRIPLO EFEITO

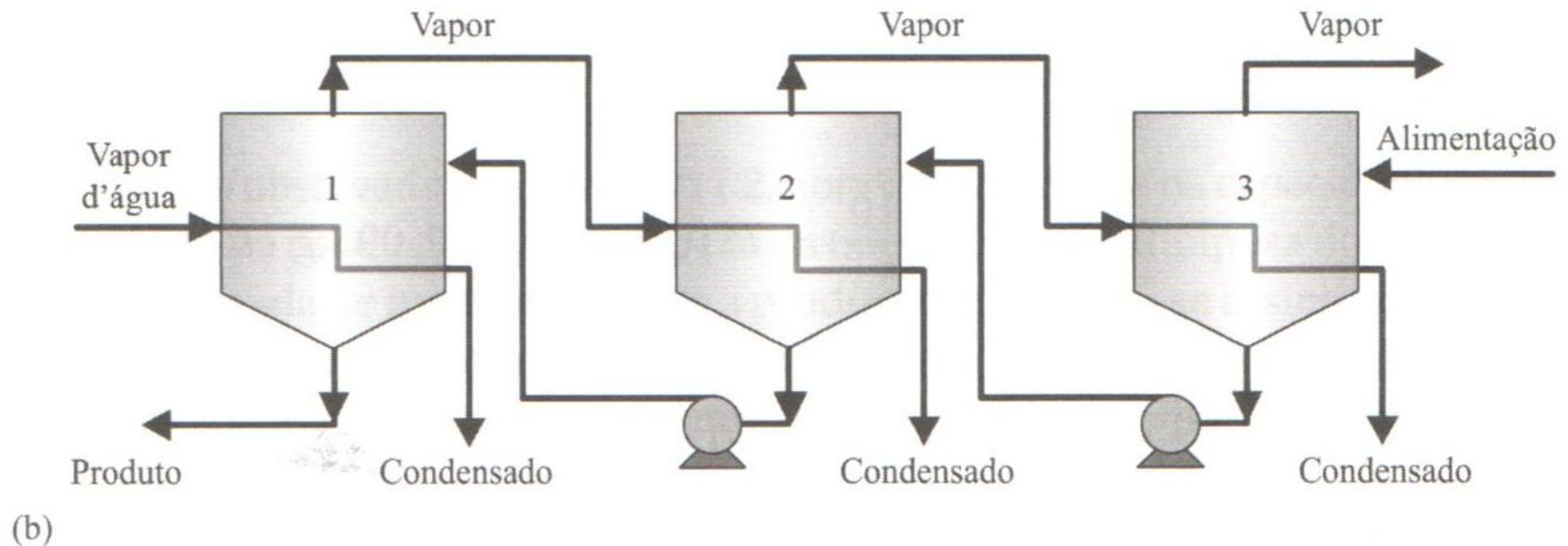
EVAPORADORES MÚLTIPLO EFEITO

- Podem ser acoplados em diferentes formas:
 - Alimentação direta: correntes de alimentação e líquido são alimentadas no mesmo sentido



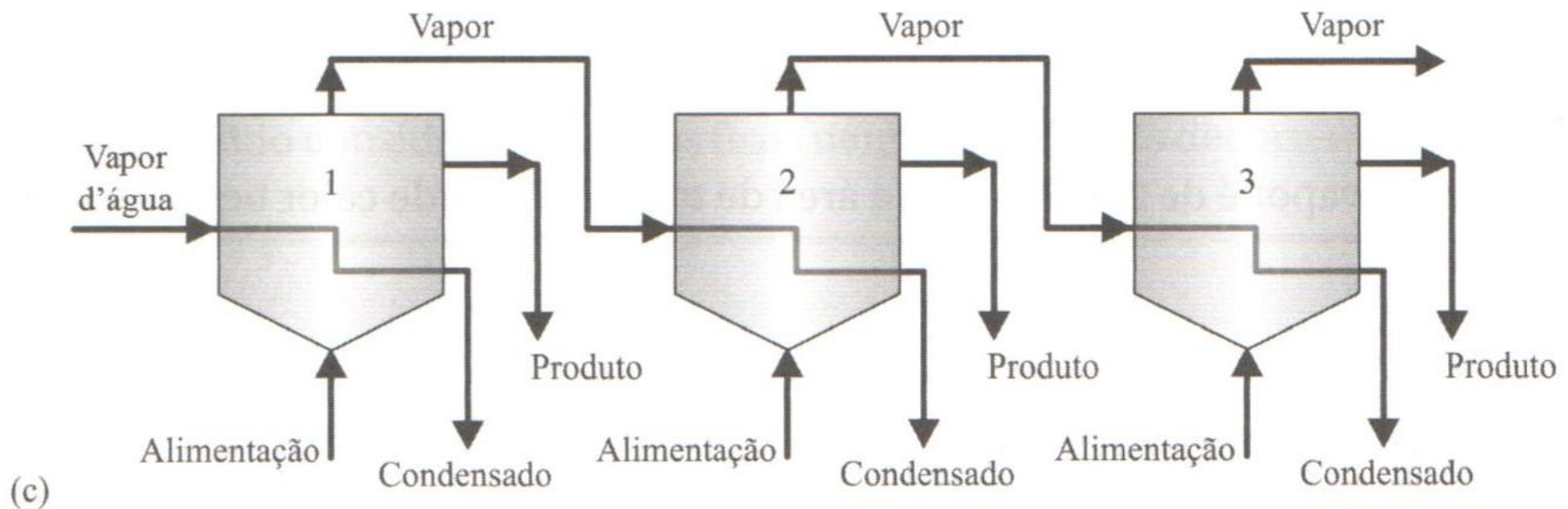
EVAPORADORES MÚLTIPLO EFEITO

- Podem ser acoplados em diferentes formas:
 - Alimentação inversa: correntes de vapor e líquido são alimentadas no sentido inverso

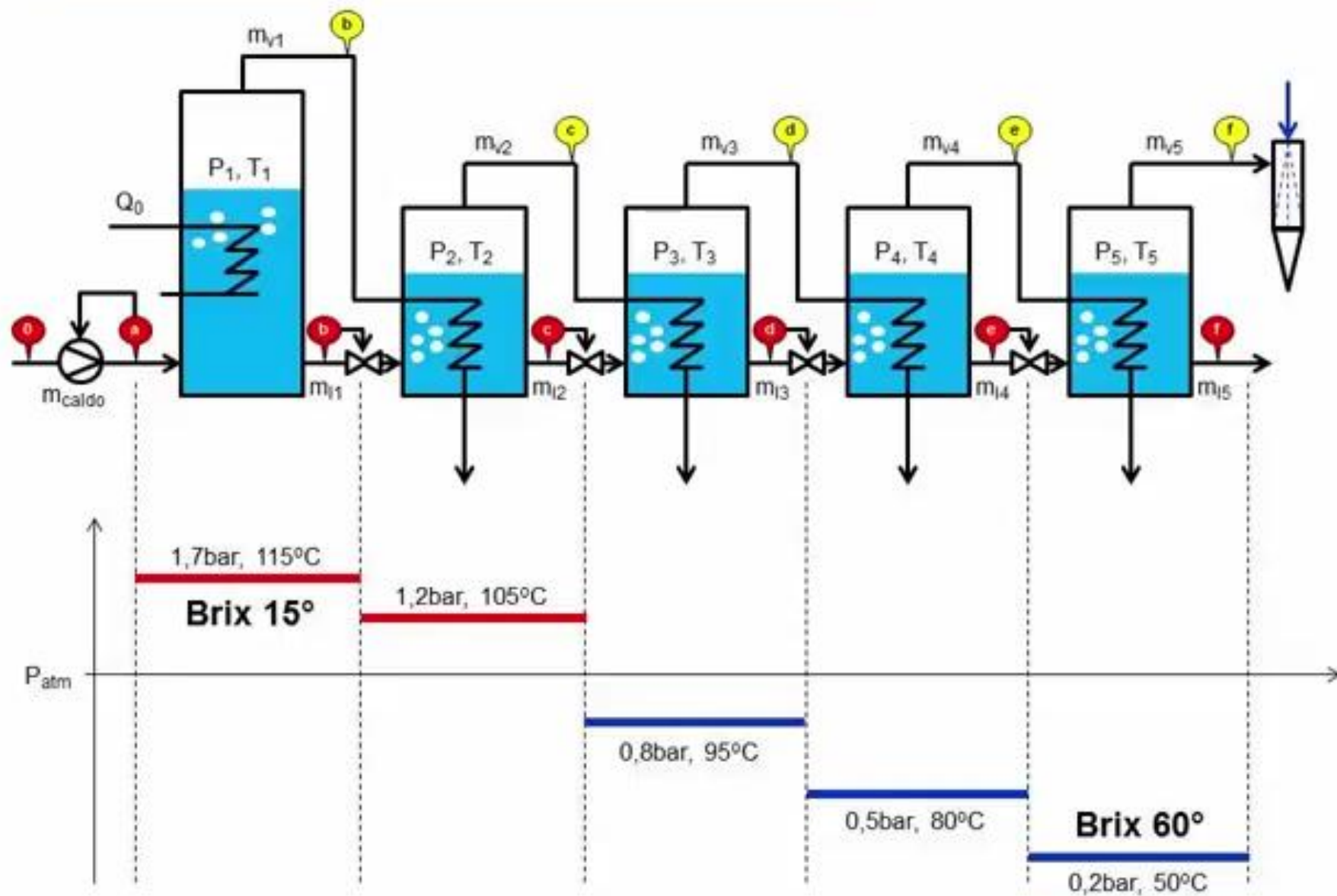


EVAPORADORES MÚLTIPLO EFEITO

- Podem ser acoplados em diferentes formas:
 - Alimentação paralela



Princípio de funcionamento



CÁLCULOS DE SISTEMAS DE EVAPORAÇÃO EM MÚLTIPLOS EFEITOS

- Alimentação inversa: correntes de vapor e líquido são alimentadas no sentido inverso

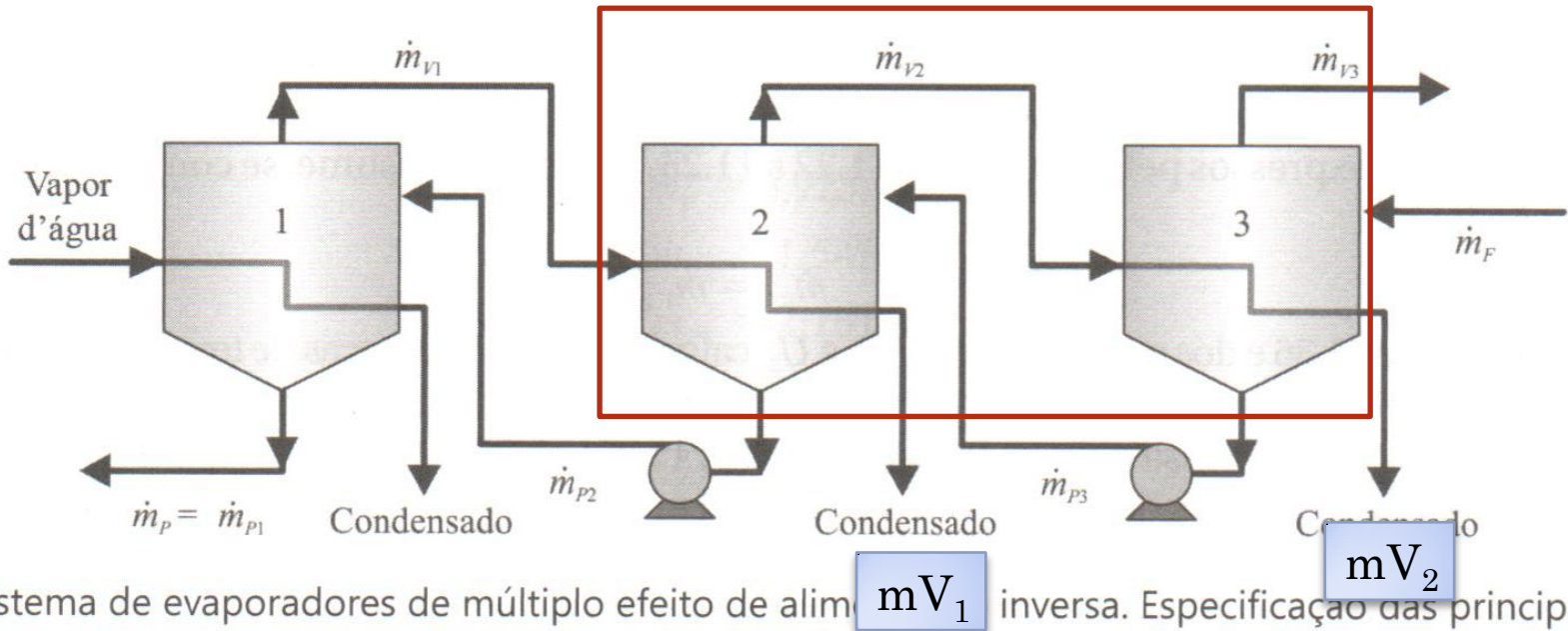


Figura 11.8 Sistema de evaporadores de múltiplo efeito de alimentação inversa. Especificação das principais correntes

Balço de massa

EXERCÍCIO 1 – AULA 10

- Utilizando um evaporador de três efeitos, deve-se concentrar **suco de laranja** a 10.000 kg/h que esta com 15% de sólidos solúveis inicial, a uma temperatura de 30°C até uma concentração final de 60% de sólidos solúveis. A temperatura do vapor no primeiro efeito é de 120°C e, a pressão do vapor no último efeito é $P_{V3} = 0,1994$ bar. O coeficiente de transferência de calor para cada efeito é $U=1.000$ W/m².
- Considere alimentação direta e vazões de vapor de cada efeito iguais. Desconsiderar perdas térmicas.
- Determine:
 - O consumo de vapor;
 - Área total de troca térmica.

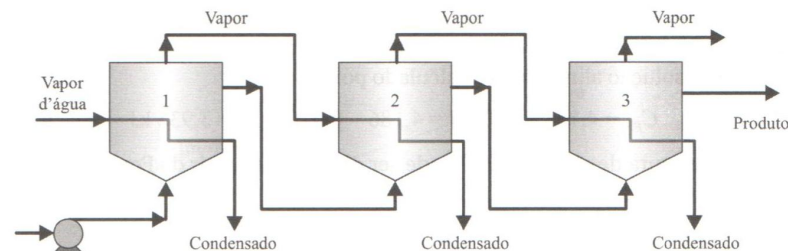
Dados:

C_{pF} do suco “in natura”: 4,0 kJ/kg°C

C_{p1} do suco após efeito 1: 3,6 kJ/kg°C

C_{p2} do suco após efeito 1: 3,2 kJ/kg°C

C_{p3} do suco após efeito 1: 3,1 kJ/kg°C



(a)

Tabela A.1 Tabela de propriedades termodinâmicas de água saturada

T [K]	P_w [kPa]*	ρ [kg · m ⁻³]		H [kJ · kg ⁻¹]		$\Delta_{\text{vap}}H$ [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

Tabela A.1 Tabela de propriedades termodinâmicas de água saturada

T [K]	P_w [kPa]*	ρ [kg · m ⁻³]		H [kJ · kg ⁻¹]		$\Delta_{\text{vap}}H$ [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

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

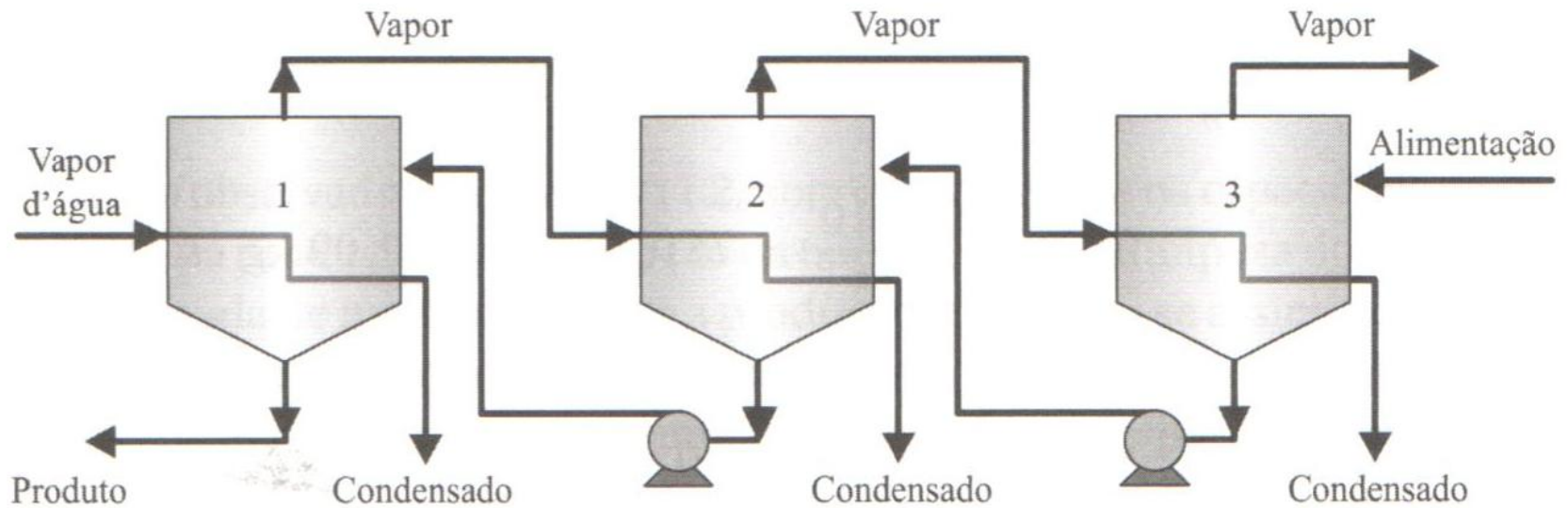
Sample	$\alpha \times 10^2$	β	δ	$\gamma \times 10^2$
Sucrose	3.061	0.094	0.136	5.328
Reducing sugars	2.227	0.588	0.119	3.593
Juices	1.360	0.749	0.106	3.390

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



HOMEWORK...

RESOLVER EXERCÍCIO 2 P/ PARA ALIMENTAÇÃO INVERSA.



(b)