



OPERAÇÕES UNITÁRIAS II

Prof. Antonio Carlos da Silva

AULAS 15 e 16 - CÁLCULO DE EVAPORADORES

TABELAS E DIAGRAMAS

TABELA A.1(a) Propriedades termodinâmicas do vapor de água*

A 1.1(a) Vapor de água saturado

t	T	p	v _l	v _v	ρ _v	h _l	h _v	h _{lv}	S _l	s _v
° C	° K	kgf/cm ²	m ³ /kg	m ³ /kg	kg/m ³	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg°K	kcal/kg°K
0	273,15	0,006228	0,0010002	206,3	0,004846	0	597,2	597,2	0	2,1863
2	275,15	0,007193	0,0010001	180,0	0,005557	2,01	598,0	596,0	0,0073	2,1736
4	277,15	0,008289	0,0010000	157,3	0,006358	4,02	599,0	595,0	0,0146	2,1613
6	279,15	0,009530	0,0010001	137,8	0,007257	6,03	599,8	593,8	0,0218	2,1489
8	281,15	0,010932	0,0010002	121,0	0,008267	8,04	600,7	592,7	0,0290	2,1370
10	283,15	0,012513	0,0010004	106,4	0,009396	10,04	601,6	591,6	0,0361	2,1253
15	288,15	0,017376	0,0010010	77,99	0,01282	15,04	603,8	588,8	0,0536	2,0970
20	293,15	0,02383	0,0010018	57,84	0,01729	20,03	606,0	586,0	0,0708	2,0697
25	298,15	0,03229	0,0010030	43,41	0,02304	25,02	608,2	583,2	0,0876	2,0436
30	303,15	0,04325	0,0010044	32,93	0,03036	30,00	610,4	580,4	0,1042	2,0187
35	308,15	0,05733	0,0010061	25,25	0,03960	34,99	612,5	577,5	0,1205	1,9947
40	313,15	0,07520	0,0010079	19,55	0,05114	39,98	614,7	574,7	0,1366	1,9718
45	318,15	0,09771	0,0010099	15,28	0,06544	44,96	616,8	571,8	0,1524	1,9498
50	323,15	0,12578	0,0010121	12,05	0,08298	49,95	619,0	569,0	0,1679	1,9287
55	328,15	0,16051	0,0010145	9,584	0,1043	54,94	621,0	566,1	0,1833	1,9085
60	333,15	0,2031	0,0010171	7,682	0,1302	59,94	623,2	563,3	0,1984	1,8891
65	338,15	0,2550	0,0010199	6,206	0,1611	64,93	625,2	560,3	0,2133	1,8702
70	343,15	0,3177	0,0010228	5,049	0,1981	69,93	627,3	557,4	0,2280	1,8522
75	348,15	0,3931	0,0010258	4,136	0,2418	74,94	629,3	554,4	0,2425	1,8349
80	353,15	0,4829	0,0010290	3,410	0,2933	79,95	631,3	551,3	0,2507	1,8178
85	358,15	0,5894	0,0010323	2,830	0,3534	84,96	633,2	548,2	0,2708	1,8015
90	363,15	0,7149	0,0010359	2,361	0,4235	89,98	635,1	545,1	0,2848	1,7858
95	368,15	0,8619	0,0010396	1,981	0,5045	95,01	637,0	542,0	0,2985	1,7708
100	373,15	1,0332	0,0010435	1,673	0,5977	100,04	638,9	538,9	0,3121	1,7561
105	378,15	1,2318	0,0010474	1,419	0,7045	105,08	640,7	535,6	0,3255	1,7419
110	383,15	1,4609	0,0010515	1,210	0,8265	110,12	642,5	532,4	0,3387	1,7282
115	388,15	1,7239	0,0010558	1,036	0,9650	115,18	644,3	529,1	0,3519	1,7150
120	393,15	2,0245	0,0010603	0,8914	1,122	120,3	646,0	525,7	0,3647	1,7018
125	398,15	2,3666	0,0010650	0,7701	1,299	125,3	647,7	522,4	0,3775	1,6895
130	403,15	2,7544	0,0010697	0,6680	1,496	130,4	649,3	518,9	0,3901	1,6772
135	408,15	3,192	0,0010746	0,5817	1,719	135,5	650,8	515,3	0,4026	1,6652
140	413,15	3,685	0,0010798	0,5084	1,967	140,6	652,5	511,9	0,4150	1,6539
145	418,15	4,237	0,0010850	0,4459	2,243	145,8	654,0	508,2	0,4272	1,6428
150	423,15	4,854	0,0010906	0,3924	2,548	150,9	655,5	504,6	0,4395	1,6320
155	428,15	5,540	0,0010663	0,3464	2,887	156,1	656,9	500,8	0,4516	1,6214
160	433,15	6,302	0,0011021	0,3068	3,260	161,3	658,3	497,0	0,4637	1,6112
165	438,15	7,146	0,0011082	0,2724	3,671	166,5	659,6	493,1	0,4756	1,6012
170	443,15	8,076	0,0011144	0,2426	4,122	171,7	660,9	489,2	0,4874	1,5914
175	448,15	9,101	0,0011210	0,2166	4,617	176,9	662,1	485,2	0,4991	1,5818
177	450,15	9,538	0,0011236	0,2071	4,828	179,0	662,6	483,6	0,5038	1,5780
178	451,15	9,763	0,0011249	0,2026	4,936	180,1	662,8	482,7	0,5061	1,5760
179	452,15	9,992	0,0011262	0,1982	5,045	181,1	663,0	481,9	0,5084	1,5741
180	453,15	10,225	0,0011275	0,1939	5,157	182,2	663,2	481,0	0,5107	1,5721
182	455,15	10,703	0,0011303	0,1856	5,387	184,3	663,6	479,3	0,5153	1,5683
183	456,15	10,950	0,0011317	0,1816	5,506	185,4	663,8	478,4	0,5176	1,5665
184	457,15	11,201	0,0011331	0,1777	5,627	186,4	664,1	477,7	0,5199	1,5647

*VDI – Wasserdampfatafeln – Ernst Schmidt

A.1.1(a) (Continuação)

t	T	p	v _l	v _v	ρ _v	h _l	h _v	h _{lv}	S _l	s _v
°C	°K	kgf/cm ²	m ³ /kg	m ³ /kg	kg/m ³	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg°K	kcal/kg°K
185	458,15	11,456	0,0011345	0,1739	5,749	187,5	664,3	476,8	0,5222	1,5629
187	460,15	11,979	0,0011372	0,1667	5,999	189,6	664,7	475,1	0,5268	1,5593
188	461,15	12,248	0,0011386	0,1632	6,127	190,6	664,9	474,3	0,5290	1,5575
189	462,15	12,522	0,011400	0,1598	6,258	191,7	665,1	473,4	0,5313	1,5556
190	463,15	12,800	0,0011415	0,1564	6,392	192,8	665,3	472,5	0,5336	1,5538
192	465,15	13,371	0,0011445	0,1500	6,666	194,9	665,7	470,8	0,5381	1,5502
193	466,15	13,664	0,0011460	0,1469	6,806	196,0	665,8	469,8	0,5404	1,5484
194	467,15	13,962	0,0011475	0,1439	6,949	197,0	666,0	469,0	0,5427	1,5466
195	468,15	14,265	0,0011490	0,1410	7,094	198,1	666,2	468,1	0,5449	1,5448
197	470,15	14,886	0,0011520	0,1353	7,390	200,2	666,5	466,3	0,5495	1,5412
198	471,15	15,204	0,0011535	0,1326	7,543	201,3	666,7	465,4	0,5517	1,5394
199	472,15	15,528	0,0011550	0,1299	7,699	202,4	666,8	464,4	0,5540	1,5376
200	473,15	15,857	0,0011565	0,1273	7,857	203,5	667,0	463,5	0,5562	1,5358
202	475,15	16,532	0,0011597	0,1222	8,181	205,6	667,3	461,7	0,5607	1,5323
203	476,15	16,877	0,0011613	0,1198	8,347	206,7	667,4	460,7	0,5630	1,5305
204	477,15	17,228	0,0011629	0,1174	8,516	207,8	667,6	459,8	0,5653	1,5288
205	478,15	17,585	0,0011645	0,1151	8,687	208,9	667,7	458,8	0,5675	1,5270
207	480,15	18,316	0,0011677	0,1107	9,038	211,0	668,0	457,0	0,5720	1,5236
208	481,15	18,690	0,0011693	0,1085	9,217	212,1	668,1	456,0	0,5743	1,5219
209	482,15	19,070	0,0011710	0,1064	9,400	213,2	668,2	455,0	0,5765	1,5202
210	483,15	19,456	0,0011726	0,1043	9,585	214,3	668,3	454,0	0,5788	1,5184
212	485,15	20,246	0,0011766	0,1004	9,965	216,5	668,5	452,0	0,5832	1,5150
213	486,15	20,651	0,0011778	0,09842	10,16	217,6	668,6	451,0	0,5854	1,5133
214	487,15	21,061	0,0011795	0,09655	10,36	218,7	668,7	450,0	0,5876	1,5116
215	488,15	21,477	0,0011812	0,09472	10,56	219,8	668,8	449,0	0,5899	1,5099
220	493,15	23,659	0,0011900	0,08614	11,61	225,3	669,2	443,9	0,6010	1,5012
225	498,15	26,007	0,0011991	0,07845	12,75	230,8	669,5	438,7	0,6120	1,4926
230	503,15	28,531	0,0012088	0,07153	13,98	236,4	669,7	433,3	0,6229	1,4840
235	508,15	31,239	0,0012186	0,06530	15,31	242,1	669,7	427,6	0,6339	1,4755
240	513,15	34,140	0,0012291	0,05970	16,75	247,7	669,6	421,9	0,6448	1,4669
245	518,15	37,244	0,0012400	0,05465	18,30	253,5	669,4	415,9	0,6558	1,4584
250	523,15	40,56	0,0012512	0,05006	19,98	259,2	669,0	409,8	0,6667	1,4499
255	528,15	44,10	0,0012629	0,04591	21,78	265,0	668,4	403,4	0,6776	1,4413
260	533,15	47,87	0,0012755	0,04213	23,74	271,0	667,8	396,8	0,6886	1,4327
270	543,15	56,14	0,0013023	0,03557	28,11	283,0	665,9	382,9	0,7103	1,4153
280	553,15	65,46	0,0013321	0,03010	33,22	295,3	663,5	368,2	0,7321	1,3978
290	563,15	75,92	0,0013655	0,02552	39,18	308,0	660,2	352,2	0,7542	1,3797
300	573,15	87,61	0,0014036	0,02163	46,24	321,0	656,1	335,1	0,7767	1,3613
310	583,15	100,64	0,001448	0,01830	54,64	334,6	650,8	316,2	0,7994	1,3415
320	593,15	115,13	0,001499	0,01544	64,79	349,0	644,2	295,2	0,8229	1,3206
330	603,15	131,18	0,001562	0,01295	77,20	364,2	636,0	271,8	0,8476	1,2982
340	613,15	148,96	0,001641	0,01076	92,90	380,7	625,6	244,9	0,8734	1,2728
350	623,15	168,63	0,001747	0,008803	113,6	398,9	611,9	213,0	0,9015	1,2433
360	633,15	190,42	0,001907	0,006963	143,6	420,9	593,1	172,2	0,9353	1,2072
370	643,15	214,68	0,00223	0,00498	201	452,0	558,1	106,1	0,9824	1,1474
374,15*	647,3	225,65		0,00318	315		501,5	0		1,058

* Ponto crítico

Fonte: Fundamentos da Termodinâmica Clássica – Van Wylen & Sonntag

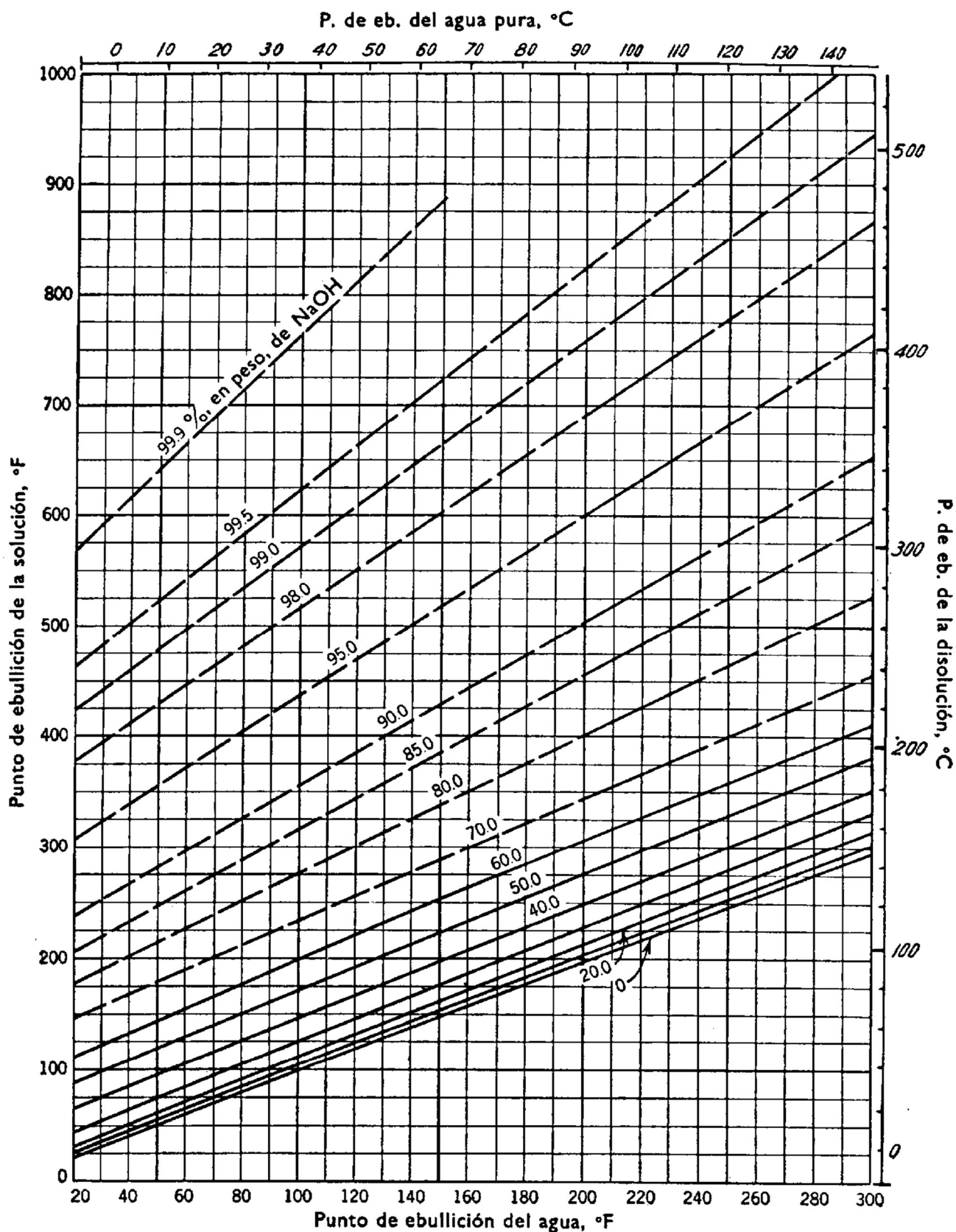


Fig. 467. Diagrama de Dühring para disoluciones acuosas de hidróxido sódico.

Fonte: Operaciones básicas de la Ingeniería Química – George G. Brown

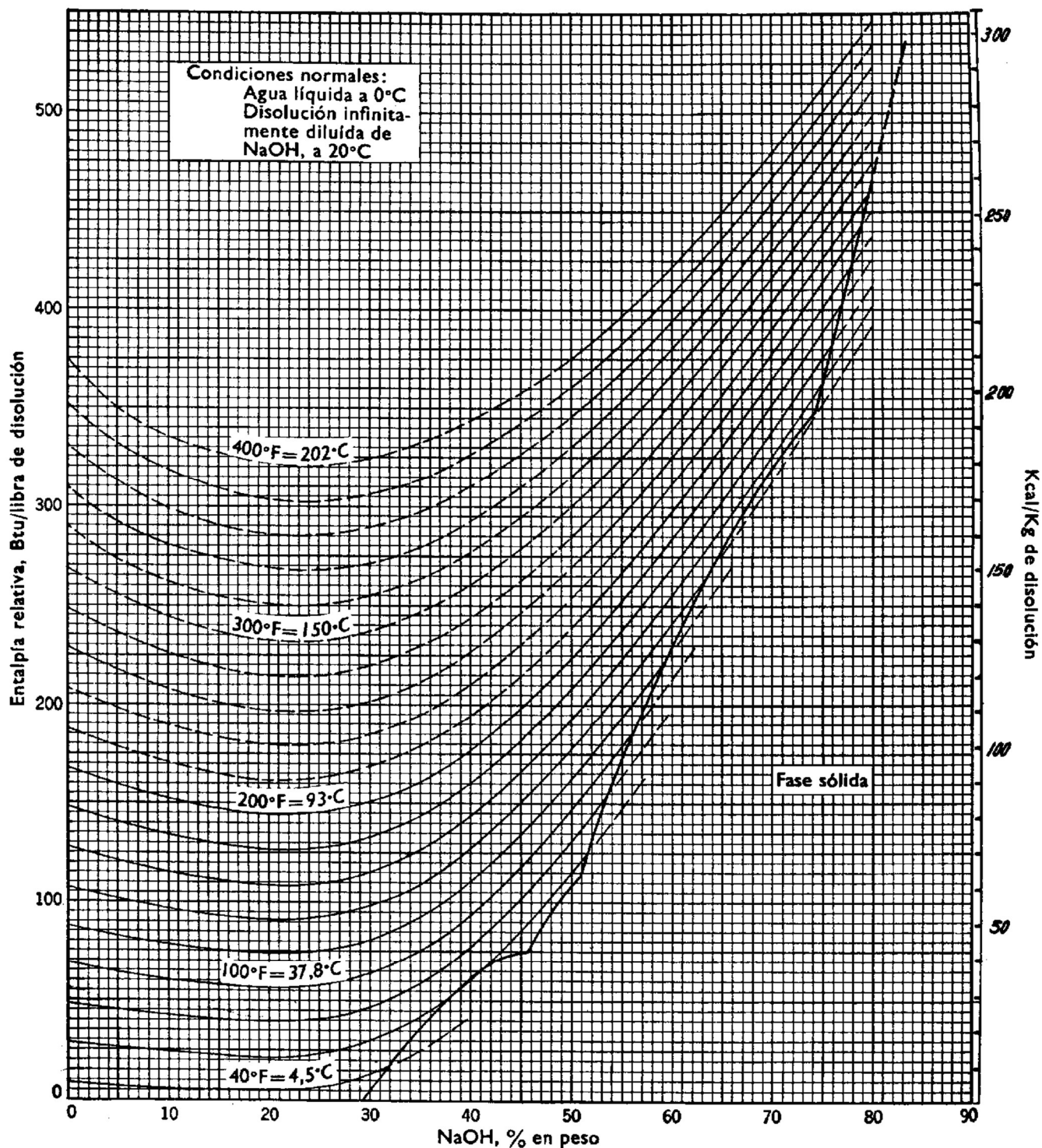


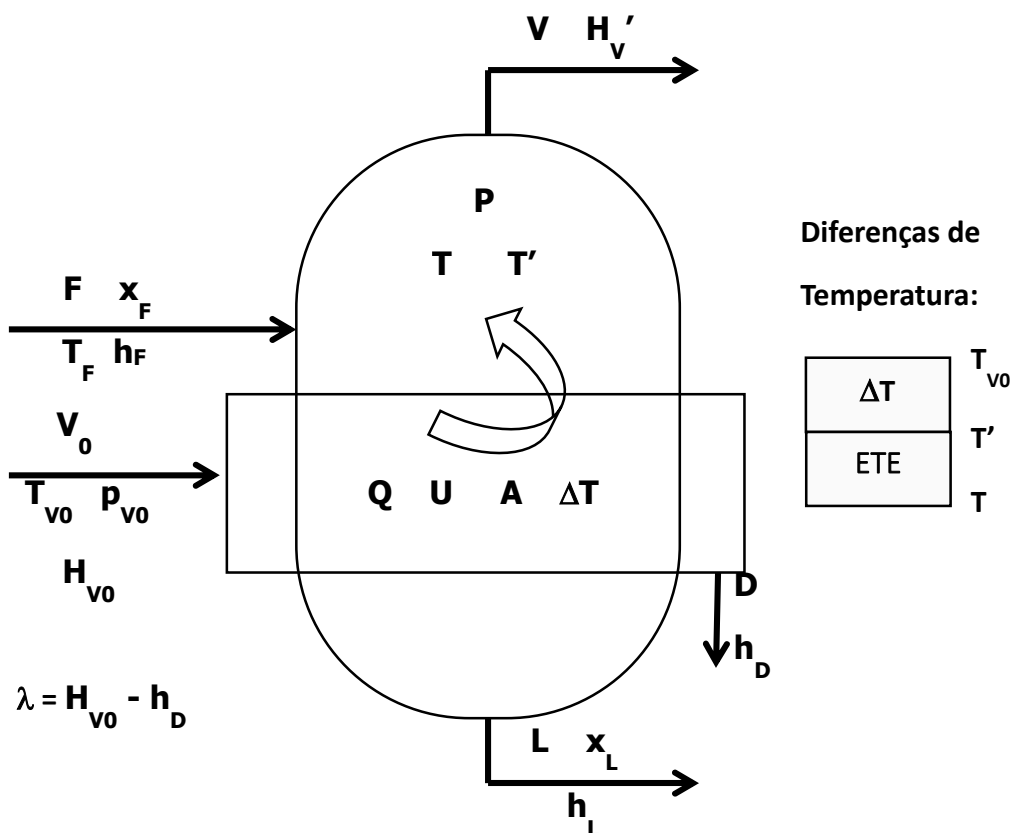
Fig. 468. Diagrama entalpia-concentración para soluciones acuosas de sosa. Se ha tomado, arbitrariamente, como estado de referencia el agua líquida a 0°C, a su propia presión de vapor.

Fonte: Operaciones básicas de la Ingeniería Química – George G. Brown

VER VIDEOAULA EXPLICANDO A UTILIZAÇÃO
 DAS TABELAS E DIAGRAMAS

EXERCÍCIOS DE EVAPORAÇÃO

Em um Evaporador de Simples Efeito tem-se os seguintes parâmetros (conforme Apresentação e Videoaulas postadas):



As equações de Balanço de Massa e de Energia são:

$$F = L + V \quad (1)$$

$$F \cdot x_F = L \cdot x_L \quad (2)$$

$$V_0 = D \quad (3)$$

$$Q = V_0 \cdot \lambda = L \cdot h_L + V \cdot H_v' - F \cdot h_F \quad (4)$$

A troca de calor é dada pela relação: $Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (5)$

Observações:

1) O vapor produzido pela evaporação do solvente da solução (fluxo V) é superaquecido, pois o solvente puro entra em ebulição na temperatura T, mas a solução entra em ebulição na temperatura T' (ebuliometria). O equilíbrio líquido-vapor da solução se dá na temperatura T', mas o vapor, ao deixar a câmara de evaporação, é puro e assim será superaquecido.

2) Para o cálculo de evaporadores, serão utilizados os diagramas e tabelas:

- Tabelas de vapor saturado

Para obtenção de valores de entalpia específica de água e vapor d'água.

- Diagrama de Dühring para solução de aquosa de hidróxido de sódio

Diagrama para obtenção da temperatura de ebulição da solução de NaOH em função da temperatura de ebulição da água pura (na pressão de operação da câmara de evaporação) e da concentração da solução.

- Diagrama entalpia-concentração para soluções aquosas de hidróxido de sódio

Diagrama para determinação de entalpia específica de soluções de NaOH em função da temperatura e da concentração da solução

Os diagramas e tabelas constam do arquivo “Diagramas e tabelas – evaporação” também postado.

Exemplos de utilização:

- Uma solução é evaporada à pressão de 0,3931 kgf/cm²; determine a temperatura da evaporação da água pura e a entalpia de vapor d’água:

*na tabela de propriedades termodinâmicas da água, encontramos para a pressão dada (3ª coluna) a temperatura de saturação (temperatura de ebulição da água pura) igual a **75°C** (1ª coluna) ou **348,15 K** (2ª coluna) e a entalpia específica de vapor de **629,3 kcal/kg** na coluna h_v (8ª coluna) – quando necessário, interpolar.*

- Na pressão de 0,3931 kgf/cm², determine a temperatura de evaporação de uma solução de NaOH a 20% em peso de soluto:

*no diagrama de Dühring, para 75°C (temperatura de ebulição da água, no eixo horizontal, escala superior), na reta correspondente a 20% em peso, rebatendo no eixo vertical, escala da direita, encontra-se a temperatura de **90°C**.*

- Para uma solução a 20% em peso de NaOH, evaporando a 0,3931 kgm/cm², determine a entalpia específica:

Convertendo a temperatura de 75°C para a escala Fahrenheit, obtemos:

$$(100 - 75)/(100-0) = (212-T)/(212-32) \therefore 25/100 = (212-T)/180 \therefore T = 167^{\circ}F$$

*no diagrama Entalpia-Concentração para soluções de NaOH, para 167°F e 20%, encontra-se no eixo vertical, escala da direita: **72 kcal/kg***

Pode-se converter a temperatura pela expressão: $T_c = 5/9.(T_f - 32)$

Os Diagramas para soluções de NaOH são facilmente encontrados na literatura (livros de Operações Unitárias, Transferência de Calor e Manuais de Engenharia Química). Isso se deve ao fato de que a operação de evaporação encontra sua maior aplicação no processo de produção eletrolítico de NaOH (processo que produz Cl₂, H₂ e solução de NaOH diluída, entre 5% e 10%).

3) Se a solução em evaporação não for aquosa, é necessário ter as tabelas de vapor correspondentes ao solvente e dados para cálculo das propriedades da solução (temperatura de ebulição e entalpia específica). Utilizaremos somente soluções aquosas com os diagramas e tabelas apresentados.

4) Se o soluto não for NaOH, é necessário conhecer relações para cálculo de temperatura de evaporação da solução e entalpia específica.

5) Para o cálculo da Entalpia de vapor superaquecido do vapor produzido (H_v') usa-se a referência do calor específico a pressão constante, C_p :

$$C_p = \left(\frac{\delta H}{\delta T} \right)_{p \text{ cte}}$$

Que pode ser aproximada por:

$$C_p = \frac{\Delta H}{\Delta T}$$

Considerando o estado 1: na temperatura de saturação do solvente, à temperatura T e entalpia H_v

Considerando o estado 2: na saída do vapor, à temperatura T' e a entalpia H_V'

$$\begin{aligned}\Delta H &= C_p \cdot \Delta T \\ H_V' - H_V &= C_p \cdot (T' - T) \\ H_V' &= H_V + C_p \cdot (ETE)\end{aligned}$$

EXEMPLO

Em um evaporador de simples efeito, uma solução de NaOH a 10% em peso é evaporada até 50% em peso. A solução é alimentada a 32°C, com vazão de 3.600 kg/h. O coeficiente global de troca de calor é 1.200 kcal/h.m².°C. Dispõe-se de vapor para aquecimento a 8,5 kgf/cm². Na câmara de evaporação, a pressão é mantida a 0,285 kgf/cm². Determinar a área de troca de calor necessária.

Tabela para lançamento dos parâmetros calculados:

Parâmetro	Valor	Unidades
F		
L		
V		
x_F		
x_L		
V₀ (=D)		
T_F		
T_{V0}		
T		
T'		
$\Delta T = T_{V0} - T'$		
ETE = T' - T		
p		
P_{V0}		
h_F		
h_L		
H_{V0}		
H_V		
H_{V'}		
h_D		
λ		
U		
Q		
A		

EXERCÍCIOS

1) Uma solução de um sal inorgânico a 40°C deve ser alimentada em um evaporador de simples efeito, para ser concentrada de 20% até 40%, à taxa de 8.000 kg/h. Deve ser empregado vapor para aquecimento a 181,5°C. A câmara de evaporação deverá ser operada sob vácuo, a 0,2031 kgf/cm² abs. O coeficiente global de troca de calor é 1480 kcal/h.m².°C. Determinar a área de troca de calor que deverá ter o evaporador. Dados para a solução:

Concentração da solução, % em peso de soluto	5	10	20	30	40
Elevação da Temperatura de Ebulição, °C	3,8	6,9	14,8	24,4	33,2
Calor específico, kcal/kg	0,96	0,91	0,86	0,80	0,72

Parâmetro	Valor	Unidades
F		
L		
V		
x_F		
x_L		
V₀ (=D)		
T_F		
T_{v0}		
T		
T'		
ΔT = T_{v0} - T'		
ETE = T' - T		
p		
P_{v0}		
h_F		
h_L		
H_{v0}		
H_v		
H_{v'}		
h_D		
λ		
U		
Q		
A		