



SISTEMAS TÉRMICOS E AR COMPRIMIDO

Sumário

1	SISTEMA TÉRMICO	7
1.1	O Vapor d'água	7
1.1.1	Finalidades do Vapor	7
1.2	O Processo de Vaporização da Água.....	7
1.3	Pressão e Temperatura de Saturação ...	8
1.4	Qualidade do Vapor.....	8
1.5	Entalpia ...	9
2	CALDEIRAS.....	20
2.1	Classificação quanto a montagem ...	20
2.2	Componentes	21
2.3	Funcionamento	22
2.4	Circulação de Água	22
2.5	Combustíveis	23
2.5.1	Introdução ...	23
2.5.2	Classificação	24
2.5.3	Principais Propriedades de um Combustível ...	24
2.5.4	Características Principais dos Combustíveis Gasosos	25
2.6	Teoria da Combustão.....	25
2.7	Queimadores ...	26
2.8	Pré-Aquecedores de Ar	29
2.9	Deterioração em fornos e caldeiras	31
2.9.1	Oxidação ...	31
2.10	Tratamento de Água de Caldeiras ...	32
2.10.1	Introdução	32
2.10.2	Tratamento de água para caldeiras de alta pressão	32
2.10.3	Remoção de Gases Dissolvidos ...	32
2.10.4	Desaeração Mecânica da Água ...	32
2.10.5	Desaeração Química da Água	33
2.10.6	Purga das Caldeiras.....	33
2.10.7	Presença de Algumas Substâncias na Água de Caldeiras e Seus Inconvenientes	33
2.11	Instrumentos e dispositivos de controle de caldeiras	35
2.11.1	Controle de nível.....	35
2.11.2	Controle de combustão	36
2.11.3	Controle de temperatura do vapor	37
3	DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR: UTILIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS	38
3.1	Redução de pressão	38
3.2	Níveis de pressão.....	38
3.3	Controle de pressão	39
4	CONDENSADO.....	41
4.1	Problemas devidos ao condensado.....	41
4.2	Formação do condensado ...	41
4.3	Purgadores ...	41
4.4	Coletores de condensado.....	42
4.5	Reutilização de condensado	42
4.6	Tratamento de condensado.....	43
4.7	Isolamento térmico	44
5	SISTEMA DE AR COMPRIMIDO ...	45
5.1	Ar comprimido para instrumentos ...	45
5.2	Ar comprimido de serviço.....	45

Sistema Térmico

1.1 O Vapor d'água

1.1.1 Finalidades do Vapor

Os principais usos do vapor em refinarias de petróleo, são:

- Fluido motriz, para acionamento de bombas, compressores, tubo-geradores, etc.
- Agente de aquecimento.
- Transporte de fluidos através de ejetores de vapor.
- Agente de remoção de gases tóxicos ou combustíveis de equipamentos ou tubulações.
- Agente de arraste das frações do petróleo nas torres de resfriamento, etc.

O vapor d'água apresenta várias qualidades que tornam seu uso atraente para atividades industriais, como elementos de transferência de energia, dentre as quais se destacam:

- alto poder de armazenamento de energia sob a forma de calor;
- transferência de energia à temperatura constante;
- capacidade de possibilitar transformações de energia de calor para outras formas;
- uso cíclico e em vários níveis de pressão e temperaturas;
- passível de ser gerado em equipamentos com alta eficiência;
- limpo, inodoro, insípido e não tóxico;
- de fácil distribuição e controle;
- matéria-prima (água) de baixo custo e suprimento farto.

Considerando-se as diversas qualidades citadas, o vapor d'água é largamente utilizado como:

- agente de aquecimento na injeção de poços de petróleo;
- agente de aquecimento de petróleo e seus derivados (óleo combustível, resíduo asfáltico) em tanques de armazenamento e linhas;
- agente produtor de trabalho para acionamento mecânico de bombas, turbo-geradores, compressores, etc.;
- agente de arraste em ejetores para produção de vácuo em torre de destilação a vácuo, condensadores das turbinas, etc.;
- agente de arraste na remoção de oxigênio em desaeradores de caldeiras.

1.2 O Processo de Vaporização da Água

O objetivo de um gerador de vapor consiste na transformação de água líquida em vapor, pela absorção de calor obtido a partir da queima de um combustível.

Quando o calor é fornecido a uma certa massa de água à pressão constante, observa-se aumento da temperatura da água líquida até que se inicie o processo de vaporização. A partir deste ponto, não é observada mudança de temperatura até que a vaporização se complete, quando, então, qualquer transferência de calor adicional implicará no superaquecimento do vapor.

A Figura a seguir ilustra o processo de vaporização da água na pressão atmosférica, mostrando a elevação da temperatura à medida que se fornece calor de uma fonte externa.

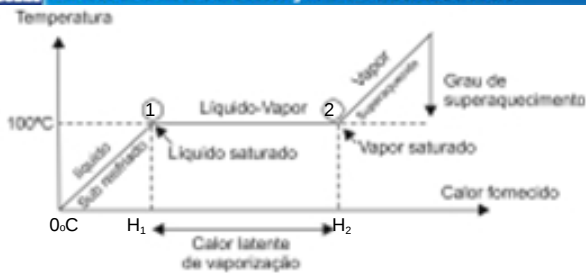


Figura 1 - Vaporização da água à pressão de 1 atm.

No trecho 0-1, entre 0°C e 100°C, tem-se a água no estado de líquido sub resfriado. O calor fornecido é denominado calor sensível, pois é utilizado somente no aquecimento da água.

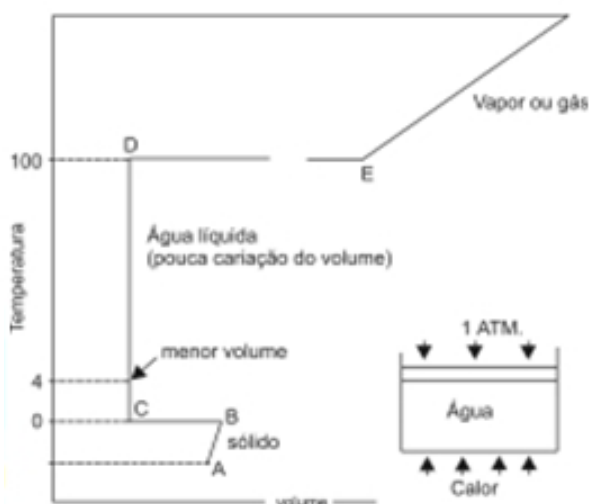
No ponto 1, a água está na temperatura de saturação (100°C a 1 atm), ou seja, é um líquido saturado. Nestas condições, qualquer calor fornecido adicionalmente é utilizado somente na vaporização da água, sem qualquer variação na temperatura. A qualidade de calor necessária à vaporização total da água denomina-se calor latente de vaporização. Na pressão de 1 atm, 1 kg de água requer 539 kcal para se transformar em vapor.

No trecho entre os pontos 1 e 2, a água está parcialmente vaporizada, ou seja, trata-se de uma mistura de líquido + vapor saturados.

No ponto 2, toda a água transformou-se em vapor, constituindo o vapor saturado seco, ou seja, sem a presença de gotículas de líquido.

Acima do ponto 2, o calor adicional fornecido é usado no aumento da temperatura (calor sensível), constituindo o vapor superaquecido. A diferença entre a temperatura do vapor e a temperatura de saturação (ou vaporização), na mesma pressão, é denominada de grau de superaquecimento (GSA) do vapor.

A Figura abaixo mostra a evolução do volume da água à medida que a temperatura é aumentada, partindo do estado sólido (ponto A).



Variação do volume com a temperatura.

Durante a fusão do gelo, ocorre uma contração de volume (trecho), em torno de 8%.

Quando a água começa a vaporizar (ponto D), o volume aumenta muito devido à formação do vapor d'água, permanecendo a temperatura constante durante a vaporização.

1.3 Pressão e Temperatura de Saturação

Repetindo-se o processo de vaporização em pressões mais elevadas, observa-se que a vaporização ocorre em temperaturas mais altas:

Pressão (kgf/cm ² abs.)	Temperatura de vaporização (°C)
1,033	100,0
12	187,1
42	252,1
88	300,3
100	309,5

Este é o princípio do funcionamento das “painelas de pressão” para uso doméstico. Da mesma forma, trabalhando-se em pressões abaixo da atmosférica, a água vaporiza-se em temperaturas inferiores a 100°C.

A pressão na qual a água se vaporiza é denominada pressão de saturação, enquanto que a temperatura de vaporização também é chamada de temperatura de saturação.

Para cada pressão de saturação corresponde uma temperatura de saturação, e vice-versa. Durante o processo de vaporização, a temperatura do líquido e do vapor permanece constante, como exposto na Figura 1.

Valores da pressão e da temperatura de saturação podem ser encontrados nas “Tabelas de Vapor Saturado”.

1.4 Qualidade do Vapor

Será focalizada, a seguir, a região de duas fases entre os pontos 1 e 2 da Figura 1, onde coexiste uma mistura de líquido e vapor em equilíbrio.

O título ou qualidade do vapor (x) pode ser definido como a relação entre a massa da fração de vapor e a massa total de líquido e vapor:

Obviamente, o título só é definido para a mistura em equilíbrio, varia entre $x = 0$ e $x = 1$, conforme seja:

- líquido saturado: $x = 0$;
- vapor saturado seco: $x = 1$ (ou 100%);
- vapor úmido: x intermediário (vaporização incompleta, presença de líquido) (L) + vapor (V).

Os geradores de vapor para injeção em poços, geralmente, operam na região de duas fases, produzindo vapor úmido de qualidade 80%, enquanto que as caldeiras e usinas termelétricas geram vapor superaquecido.

Um gerador de vapor não vaporiza toda a água que recebe. Parte é deixada como líquido para manter os sais em solução, caso contrário, haveria precipitação e formação de “scale”. O “scale” é duplamente deletério ao sistema, tanto pela perda de rendimento do gerador quanto pelo perigo de um desprendimento súbito. Esta fração líquida é necessária, pois o tratamento existente não remove totalmente os sais dissolvidos.

O título é obtido, facilmente, por comparação entre a salinidade da água que entra e a da água que sai. A massa vaporizada deixa todos seus sais na fase líquida.

Exemplo:

A salinidade aumentou 5 vezes .:

Título do vapor x =

$$1 - \frac{\text{Salinidade entra} = 1 - 1000 \text{ ppm}}{\text{Salinidade saída} = 5000 \text{ ppm}} = 0,8$$

1.5 Entalpia

Entalpia é a quantidade de calor armazenada por uma substância, desde um estado inicial de referência (0°C, 1 atm) até a pressão e temperatura consideradas.

A entalpia é, portanto, a energia térmica total contida numa unidade de massa, medida em kcal/kg ou Btu/lb.

A Figura a seguir mostra um diagrama entalpia x temperatura para diversas pressões, em que podem ser observadas as regiões de

líquido sub-resfriado, duas fases (L + V) e vapor superaquecido, além do ponto crítico, para diversas pressões.

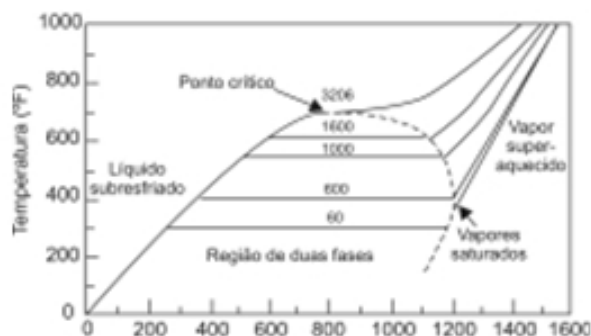


Diagrama H x T para diversas pressões.

O calor latente de vaporização corresponde, no gráfico H x T, à diferença de entalpia entre os pontos correspondentes ao líquido e vapor saturados, para um dado patamar de pressão, ou seja:

$$L_v = H_{vs} - H_{ls}$$

L_v - é o calor latente de vaporização.

H_{ls} - é a entalpia do líquido saturado, ou seja, a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura da água desde 0°C até a temperatura de saturação;

H_{vs} - é a entalpia do vapor saturado, que corresponde à soma de H_{ls} com o calor latente de vaporização L_v .

Anotações

Diagrama de “Mollier”

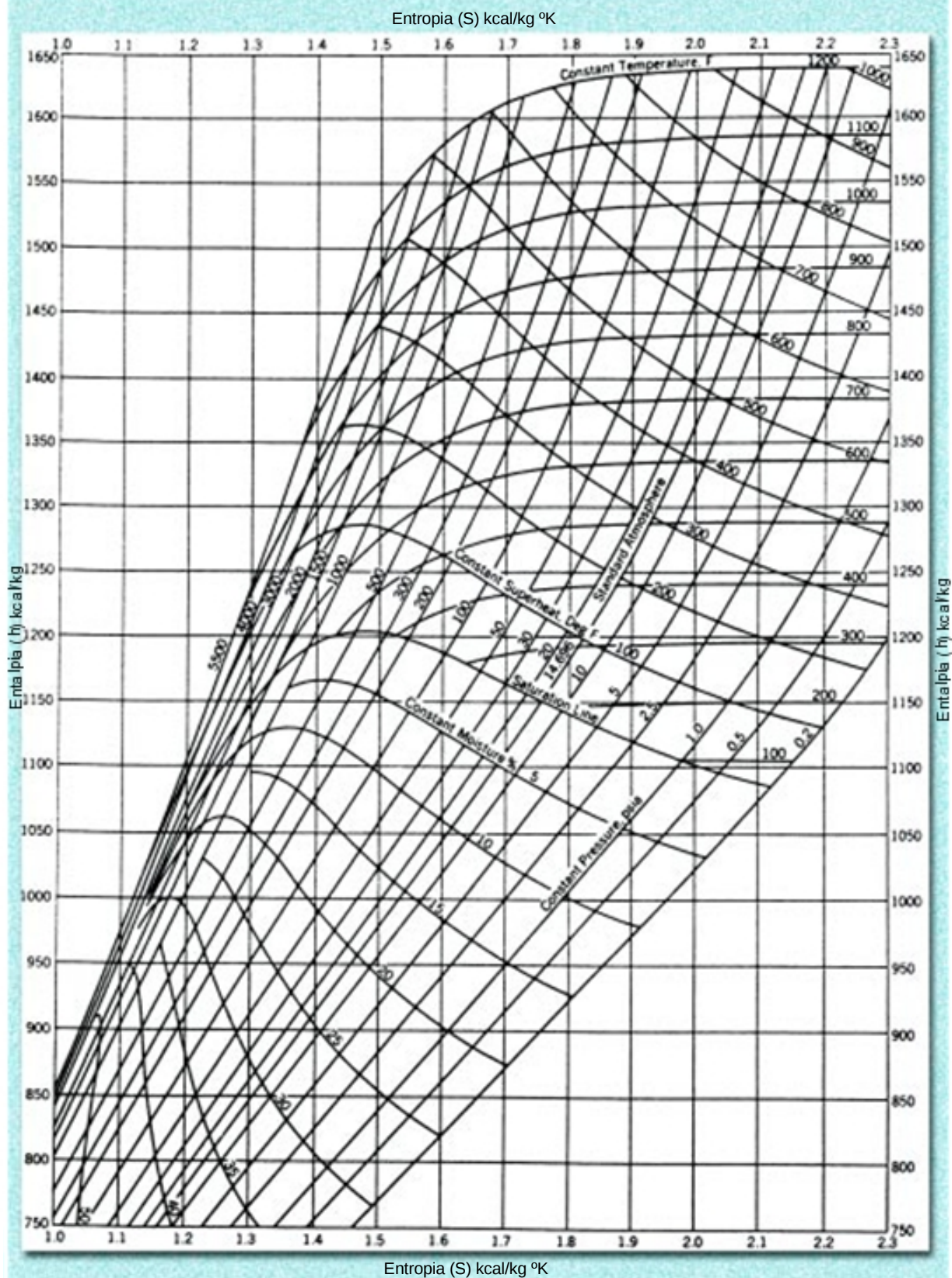


Tabela de vapor d'água saturado

(1/3)

Pressão (absoluta)	Temperatura de vaporização	Volume específico		Entalpia específica			Entropia específica	
		do líquido saturado	do vapor saturado	do líquido saturado	acréscimo na vaporização	do vapor saturado	do líquido saturado	do vapor saturado
P	t _v	v _l	v _v	h _l	h _{l-v}	h _v	s _l	s _v
kgf/cm ²	°C	m ³ /kg	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg°K	kcal/kg°K
0,01	6,7	0,0010	131,6	6,7	593,3	600,2	0,0243	2,1450
0,02	17,2	0,0010	68,27	17,2	587,6	604,8	0,0612	2,0848
0,03	23,8	0,0010	46,53	23,8	583,9	607,7	0,0835	2,0499
0,04	28,6	0,0010	35,46	28,7	581,1	609,8	0,0998	2,0253
0,05	32,6	0,0010	28,73	32,5	579,0	611,5	0,1126	2,0063
0,06	35,8	0,0010	24,19	35,8	577,1	612,9	0,1232	1,9908
0,07	38,7	0,0010	20,92	38,6	575,5	614,1	0,1323	1,9778
0,08	41,2	0,0010	18,45	41,1	574,1	615,2	0,1403	1,9665
0,09	43,4	0,0010	16,51	43,4	572,7	616,1	0,1474	1,9566
0,10	45,5	0,0010	14,95	45,4	571,6	617,0	0,1538	1,9478
0,15	53,6	0,0010	10,21	53,5	566,9	620,4	0,1790	1,9139
0,20	59,7	0,0010	7,79	59,6	563,4	623,0	0,1974	1,8899
0,25	64,6	0,0010	6,321	64,5	560,5	625,0	0,2119	1,8715
0,30	68,7	0,0010	5,328	68,6	558,0	626,6	0,2241	1,8564
0,40	75,4	0,0010	4,068	75,4	553,9	629,3	0,2436	1,8328
0,50	80,9	0,0010	3,301	80,8	550,7	631,5	0,2591	1,8145
0,60	85,5	0,0010	2,782	85,4	547,9	633,3	0,2720	1,7996
0,70	89,5	0,0010	2,408	89,4	545,4	634,8	0,2832	1,7871
0,80	93,0	0,0010	2,125	93,0	543,2	636,2	0,2929	1,7762
0,90	96,2	0,0010	1,904	96,2	541,2	637,4	0,3017	1,7667
0,95	97,7	0,0010	1,810	97,7	540,2	637,9	0,3057	1,7623
1,0	99,1	0,0010	1,725	99,1	539,3	638,4	0,3095	1,7582
1,1	101,8	0,0010	1,578	101,8	537,6	639,4	0,3167	1,7504
1,2	104,3	0,0010	1,454	104,3	530,0	640,3	0,3234	1,7434
1,3	106,6	0,0010	1,349	106,7	534,5	641,2	0,3296	1,7370
1,4	108,7	0,0011	1,259	108,9	533,0	641,9	0,3353	1,7310
1,5	110,8	0,0011	1,180	110,9	531,8	642,7	0,3407	1,7255
1,6	112,7	0,0011	1,111	112,9	530,5	643,4	0,3458	1,7203
1,7	114,6	0,0011	1,050	114,8	529,2	644,0	0,3506	1,7154
1,8	116,3	0,0011	0,9950	116,6	528,0	644,6	0,3552	1,7109
1,9	118,0	0,0011	0,9459	118,3	526,9	645,2	0,3596	1,7065
2,0	119,6	0,0011	0,9015	119,9	525,9	645,8	0,3637	1,7024
2,1	121,2	0,0011	0,8612	121,4	524,9	646,3	0,3677	1,6985
2,2	122,6	0,0011	0,8245	122,9	523,9	646,8	0,3715	1,6948
2,3	124,1	0,0011	0,7909	124,4	522,9	647,3	0,3752	1,6913
2,4	125,5	0,0011	0,7600	125,8	522,0	647,8	0,3787	1,6879
2,5	126,8	0,0011	0,7315	127,2	521,0	648,2	0,3821	1,6846
2,6	128,1	0,0011	0,7051	128,5	520,1	648,6	0,3854	1,6815
2,7	129,3	0,0011	0,6805	129,8	519,2	649,0	0,3885	1,6785
2,8	130,6	0,0011	0,6577	131,0	518,4	649,4	0,3916	1,6756
2,9	131,7	0,0011	0,6365	132,2	517,6	649,8	0,3946	1,6728
3,0	132,9	0,0011	0,6165	133,4	516,8	650,2	0,3975	1,6701
3,1	134,0	0,0011	0,5979	134,5	516,1	650,6	0,4002	1,6675
3,2	135,1	0,0011	0,5803	135,6	515,3	650,9	0,4030	1,6650
3,3	136,1	0,0011	0,5638	136,7	514,6	651,3	0,4056	1,6625
3,4	137,2	0,0011	0,5482	137,8	513,8	651,6	0,4082	1,6601

Tabela de vapor d'água saturado
 (2/3)

Pressão (absoluta)	Tempe- raturã de va- poriza- ção	Volume específico		Entalpia específica			Entropia específica	
		do líquido saturado	do vapor saturado	do líquido saturado	acrêscimo na vapori- zação	do vapor saturado	do líquido saturado	do vapor saturado
p	t _v	v _l	v _v	h _l	h _{l v}	h _v	s _l	s _v
kgf/cm ²	°C	m ³ /kg	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/ kg°K	kcal/ kg°K
3,5	138,2	0,0011	0,5335	138,8	513,1	651,9	0,4107	1,6578
3,6	139,2	0,0011	0,5196	139,8	512,4	652,2	0,4132	1,6556
3,7	140,2	0,0011	0,5064	140,8	511,7	652,5	0,4156	1,6534
3,8	141,1	0,0011	0,4939	141,8	511,0	652,8	0,4179	1,6513
3,9	142,0	0,0011	0,4820	142,7	510,4	653,1	0,4202	1,6493
4,0	142,9	0,0011	0,4706	143,6	509,8	653,4	0,4224	1,6472
4,1	143,8	0,0011	0,4599	144,6	509,1	653,7	0,4246	1,6453
4,2	144,7	0,0011	0,4496	145,5	508,4	653,9	0,4267	1,6434
4,3	145,5	0,0011	0,4397	146,3	507,9	654,2	0,4288	1,6415
4,4	146,4	0,0011	0,4303	147,2	507,2	654,4	0,4309	1,6397
4,5	147,2	0,0011	0,4213	148,0	506,7	654,7	0,4329	1,6379
4,6	148,0	0,0011	0,4127	148,9	506,0	654,9	0,4349	1,6362
4,7	148,8	0,0011	0,4044	149,7	505,5	655,2	0,4368	1,6345
4,8	149,6	0,0011	0,3965	150,5	504,9	655,4	0,4387	1,6328
4,9	150,4	0,0011	0,3889	151,3	504,3	655,6	0,4406	1,6312
5,0	151,1	0,0011	0,3816	152,1	503,8	655,9	0,4424	1,6295
6,0	158,1	0,0011	0,3213	159,3	498,6	657,9	0,4592	1,6151
7,0	164,2	0,0011	0,2778	165,6	493,9	659,5	0,4737	1,6028
8,0	169,6	0,0011	0,2448	171,3	489,6	660,9	0,4865	1,5921
9,0	174,5	0,0011	0,2189	176,4	485,7	662,1	0,4980	1,5827
10,0	179,0	0,0011	0,1980	181,2	482,0	663,2	0,5085	1,5742
11,0	183,2	0,0011	0,1808	185,5	478,6	664,1	0,5181	1,5665
12,0	187,1	0,0011	0,1664	189,7	475,2	664,9	0,5270	1,5594
13,0	190,7	0,0011	0,1541	193,5	472,1	665,6	0,5353	1,5528
14,0	194,1	0,0011	0,1435	197,2	469,1	666,3	0,5431	1,5467
15,0	197,4	0,0012	0,1343	200,6	466,2	666,8	0,5504	1,5409
16,0	200,4	0,0012	0,1262	203,9	463,4	667,3	0,5573	1,5355
17,0	203,4	0,0012	0,1190	207,1	460,7	667,8	0,5639	1,5304
18,0	206,1	0,0012	0,1125	210,1	458,1	668,2	0,5701	1,5256
19,0	208,8	0,0012	0,1068	213,0	455,5	668,5	0,5761	1,5209
20,0	211,4	0,0012	0,1016	215,8	453,0	668,8	0,5818	1,5165
21,0	213,9	0,0012	0,0968	218,5	450,6	669,1	0,5873	1,5122
22,0	216,2	0,0012	0,0925	221,1	448,2	669,3	0,5928	1,5082
23,0	218,5	0,0012	0,0885	223,6	445,9	669,5	0,5977	1,5042
24,0	220,8	0,0012	0,0849	226,1	443,5	669,6	0,6027	1,5005
25,0	222,9	0,0012	0,0815	228,4	441,4	669,8	0,6074	1,4968
26,0	225,0	0,0012	0,0784	230,8	439,1	669,9	0,6120	1,4932
27,0	227,0	0,0012	0,0755	233,0	437,0	670,0	0,6165	1,4898
28,0	229,0	0,0012	0,0729	235,2	434,8	670,0	0,6208	1,4865
29,0	230,9	0,0012	0,0703	237,4	432,7	670,1	0,6250	1,4832
30,0	232,8	0,0012	0,0680	239,5	430,6	670,1	0,6291	1,4801
31,0	234,6	0,0012	0,0658	241,5	428,6	670,1	0,6331	1,4770
32,0	236,4	0,0012	0,0637	243,5	426,6	670,1	0,6370	1,4740
33,0	238,1	0,0012	0,0618	245,5	424,6	670,1	0,6408	1,4710
34,0	239,8	0,0012	0,0600	247,4	422,6	670,0	0,6445	1,4682
35,0	241,4	0,0012	0,0582	249,3	420,6	669,9	0,6481	1,4653
36,0	243,0	0,0012	0,0565	251,1	418,8	669,9	0,6516	1,4626
37,0	244,0	0,0012	0,0550	253,0	416,8	669,8	0,6551	1,4599
38,0	246,2	0,0012	0,0535	254,7	415,0	669,7	0,6585	1,4573
39,0	247,7	0,0012	0,0521	256,5	413,1	669,6	0,6618	1,4547

Tabela de vapor d'água saturado
 (3/3)

Pressão (absoluta)	Tempe- ratura de va- poriza- ção	Volume específico		Entalpia específica			Entropia específica	
		do líquido saturado	do vapor saturado	do líquido saturado	acrêscimo na vapori- zação	do vapor saturado	do líquido saturado	do vapor saturado
P	t _v	v _l	v _v	h _l	h _{l v}	h _v	s _l	s _v
kgf/cm ²	°C	m ³ /kg	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/ kg°K	kcal/ kg°K
40	249,18	0,0012	0,0507	258,2	411,3	669,5	0,6550	1,4521
41	250,64	0,0013	0,0495	259,9	409,4	669,3	0,6682	1,4496
42	252,07	0,0013	0,0483	261,6	407,6	669,2	0,6713	1,4472
43	253,48	0,0013	0,0471	263,2	405,8	669,0	0,6744	1,4447
44	254,87	0,0013	0,0460	264,9	404,0	668,0	0,6774	1,4424
45	256,23	0,0013	0,0449	266,5	402,2	668,7	0,6804	1,4400
46	257,56	0,0013	0,0439	268,0	400,5	668,5	0,6833	1,4377
47	258,88	0,0013	0,0429	269,6	398,7	668,3	0,6862	1,4355
48	260,17	0,0013	0,0420	271,1	397,0	668,1	0,6890	1,4332
49	261,45	0,0013	0,0411	272,6	295,3	667,9	0,6918	1,4310
50	262,70	0,0013	0,0402	274,1	393,6	667,7	0,6945	1,4289
55	268,70	0,0013	0,0363	281,3	385,2	666,5	0,7076	1,4184
60	274,29	0,0013	0,0331	288,2	377,0	665,2	0,7199	1,4086
65	279,54	0,0013	0,0303	294,7	369,1	663,8	0,7314	1,3993
70	284,48	0,0013	0,0279	300,9	361,4	662,3	0,7423	1,3904
75	289,17	0,0014	0,0258	306,9	353,8	660,7	0,7527	1,3819
80	293,62	0,0014	0,0240	312,6	346,4	659,0	0,7627	1,3738
85	297,86	0,0014	0,0224	318,2	339,1	657,3	0,7722	1,3659
90	301,92	0,0014	0,0209	323,6	331,9	655,5	0,7814	1,3584
95	305,80	0,0014	0,0196	328,9	324,7	653,6	0,7902	1,3511
100	309,53	0,0014	0,0185	334,1	317,6	651,7	0,7988	1,3440
110	316,58	0,0015	0,0164	344,0	303,7	647,7	0,8152	1,3302
120	323,15	0,0015	0,0147	353,7	289,3	643,0	0,8309	1,3160
130	329,30	0,0016	0,0132	363,1	274,4	637,5	0,8460	1,3015
140	335,09	0,0016	0,0118	372,4	259,2	631,6	0,8607	1,2868
150	340,56	0,0016	0,0107	381,6	243,5	625,1	0,8751	1,2719
160	345,74	0,0017	0,0096	390,8	227,5	618,3	0,8895	1,2571
170	350,66	0,0018	0,0087	400,2	210,6	610,8	0,9042	1,2419
180	355,35	0,0018	0,0078	410,2	192,8	603,0	0,9191	1,2259
190	359,82	0,0019	0,0070	420,5	173,0	593,5	0,9346	1,2079
200	364,08	0,0020	0,0062	431,5	150,7	582,2	0,9516	1,1880
210	368,16	0,0021	0,0054	444,7	123,1	567,8	0,9711	1,1631
220	372,1	0,0024	0,0044	464,6	81,9	545,5	0,9995	1,1264
225,65	374,15	0,0032		501,5			1,058	

Tabela de vapor d'água superaquecido
(1/6)

Pres. Temp.	p = 1,0 kgf/cm ²			p = 2 kgf/cm ²			p = 3 kgf/cm ²		
t	v	h	s	v	h	s	v	h	s
° C	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg°K	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg°K	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg°K
100	1,730	638,9	1,7595	-	-	-	-	-	-
110	1,780	644,2	1,7734	-	-	-	-	-	-
120	1,830	649,1	1,7860	0,9025	646,0	1,7030	-	-	-
130	1,879	653,9	1,7980	0,9291	651,6	1,7171	-	-	-
140	1,927	658,6	1,8095	0,9546	656,8	1,7298	-	-	-
150	1,975	663,3	1,8207	0,9795	661,7	1,7416	0,6472	659,9	1,6935
160	2,024	667,9	1,8317	1,004	666,5	1,7529	0,6643	665,0	1,7055
170	2,072	672,6	1,8423	1,029	671,3	1,7638	0,6811	670,0	1,7168
180	2,119	677,3	1,8528	1,053	676,1	1,7745	0,6977	674,9	1,7278
190	2,167	682,0	1,8630	1,078	680,9	1,7849	0,7142	679,8	1,7384
200	2,215	686,7	1,8730	1,102	685,6	1,7950	0,7306	684,6	1,7487
210	2,263	691,4	1,8829	1,126	690,4	1,8050	0,7470	689,4	1,7588
220	2,310	696,1	1,8925	1,150	695,2	1,8147	0,7633	694,2	1,7687
230	2,358	700,8	1,9020	1,174	699,9	1,8243	0,7796	699,1	1,7783
240	2,406	705,5	1,9113	1,198	704,7	1,8337	0,7958	703,9	1,7878
250	2,453	710,3	1,9204	1,222	709,5	1,8429	0,8119	708,7	1,7971
260	2,501	715,0	1,9294	1,246	714,3	1,8520	0,8281	713,5	1,8063
270	2,548	719,8	1,9383	1,270	719,1	1,8609	0,8442	718,4	1,8153
280	2,596	724,5	1,9470	1,294	723,9	1,8697	0,8603	723,2	1,8241
290	2,643	729,3	1,9555	1,318	728,7	1,8783	0,8763	728,1	1,8328
300	2,690	734,1	1,9640	1,342	733,5	1,8868	0,8923	732,9	1,8413
310	2,738	738,9	1,9723	1,366	738,3	1,8952	0,9083	737,8	1,8497
320	2,785	743,7	1,9805	1,390	743,2	1,9034	0,9243	742,6	1,8580
330	2,833	748,6	1,9886	1,413	748,0	1,9115	0,9403	747,5	1,8662
340	2,880	753,4	1,9965	1,437	752,9	1,9195	0,9562	752,4	1,8742
350	2,927	758,3	2,0044	1,461	757,8	1,9274	0,9722	757,3	1,8822
360	2,974	763,1	2,0121	1,485	762,7	1,9352	0,9881	762,2	1,8900
370	3,022	768,0	2,0198	1,508	767,6	1,9429	1,004	767,2	1,8977
380	3,069	772,9	2,0274	1,532	772,5	1,9505	1,020	772,1	1,9053
390	3,116	777,8	2,0348	1,556	777,4	1,9580	1,036	777,1	1,9128
400	3,163	782,8	2,0422	1,580	782,4	1,9654	1,052	782,0	1,9203
410	3,211	787,7	2,0495	1,603	787,4	1,9727	1,068	787,0	1,9276
420	3,258	792,7	2,0567	1,627	792,3	1,9799	1,083	792,0	1,9349
430	3,305	797,7	2,0638	1,651	797,3	1,9871	1,099	797,0	1,9420
440	3,352	802,6	2,0709	1,674	802,3	1,9941	1,115	802,0	1,9491
450	3,400	807,7	2,0778	1,698	807,3	2,0011	1,131	807,0	1,9561
460	3,447	812,7	2,0847	1,722	812,4	2,0080	1,147	812,1	1,9630
470	3,494	817,7	2,0916	1,745	817,4	2,0149	1,162	817,1	1,9699
480	3,541	822,8	2,0983	1,769	822,5	2,0216	1,178	822,2	1,9767
490	3,588	827,8	2,1050	1,793	827,6	2,0283	1,194	827,3	1,9834
500	3,635	832,9	2,1116	1,816	832,7	2,0350	1,210	832,4	1,9900
510	3,683	838,0	2,1182	1,840	837,8	2,0415	1,226	837,5	1,9966
520	3,730	843,1	2,1247	1,864	842,9	2,0480	1,241	842,6	2,0031
530	3,777	848,3	2,1311	1,887	848,0	2,0545	1,257	847,8	2,0096
540	3,824	853,4	2,1375	1,911	853,2	2,0609	1,273	853,0	2,0160
550	3,871	858,6	2,1438	1,934	858,4	2,0672	1,289	858,1	2,0223
600	4,107	884,7	2,1745	2,052	884,5	2,0980	1,368	884,3	2,0531
650	4,342	911,1	2,2040	2,170	911,0	2,1275	1,446	910,8	2,0827
700	4,578	938,0	2,2324	2,288	937,9	2,1559	1,525	937,8	2,1111
800	5,049	993,1	2,2863	2,524	993,0	2,2098	1,682	992,9	2,1650

Tabela de vapor d'água superaquecido
 (2/6)

Press. Temp.	p = 4 kgf/cm ²			p = 5 kgf/cm ²			p = 7,5 kgf/cm ²		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
° C	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg°K	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg°K	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg°K
150	0,4806	657,8	1,6577	-	-	-	-	-	-
160	0,4941	663,3	1,6707	0,3917	661,4	1,6425	-	-	-
170	0,5071	668,6	1,6826	0,4026	667,0	1,6553	0,2627	662,3	1,6020
180	0,5199	673,6	1,6939	0,4131	672,3	1,6671	0,2704	668,5	1,0158
190	0,5325	678,6	1,7048	0,4234	677,4	1,6782	0,2778	674,2	1,6282
200	0,5450	683,5	1,7153	0,4337	682,4	1,6890	0,2850	679,6	1,6397
210	0,5575	688,4	1,7256	0,4438	687,4	1,6994	0,2921	684,8	1,6506
220	0,5699	693,3	1,7356	0,4538	692,4	1,7096	0,2990	690,0	1,6612
230	0,5822	698,2	1,7454	0,4638	697,3	1,7195	0,3059	695,1	1,6714
240	0,5945	703,1	1,7549	0,4738	702,2	1,7291	0,3127	700,1	1,6814
250	0,6068	707,9	1,7643	0,4837	707,1	1,7386	0,3195	705,2	1,6911
260	0,6190	712,8	1,7736	0,4935	712,1	1,7479	0,3263	710,2	1,7007
270	0,6312	717,7	1,7826	0,5034	717,0	1,7571	0,3330	715,2	1,7100
280	0,6433	722,5	1,7915	0,5132	721,9	1,7660	0,3396	720,2	1,7191
290	0,6555	727,4	1,8003	0,5230	726,8	1,7748	0,3463	725,2	1,7281
300	0,6676	732,3	1,8089	0,5327	731,7	1,7835	0,3529	730,2	1,7368
310	0,6797	737,2	1,8173	0,5424	736,6	1,7920	0,3595	735,2	1,7455
320	0,6917	742,1	1,8256	0,5522	741,6	1,8004	0,3661	740,2	1,7540
330	0,7038	747,0	1,8338	0,5619	746,5	1,8088	0,3726	745,2	1,7623
340	0,7158	751,9	1,8419	0,5715	751,4	1,8167	0,3792	750,2	1,7705
350	0,7278	756,8	1,8499	0,5812	756,4	1,8247	0,3857	755,2	1,7786
360	0,7398	761,8	1,8578	0,5908	761,3	1,8326	0,3922	760,2	1,7866
370	0,7518	766,7	1,8655	0,6005	766,3	1,8404	0,3987	765,2	1,7945
380	0,7638	771,7	1,8731	0,6101	771,3	1,8481	0,4052	770,2	1,8022
390	0,7757	776,7	1,8807	0,6197	776,3	1,8557	0,4116	775,3	1,8099
400	0,7877	781,6	1,8881	0,6293	781,3	1,8631	0,4181	780,3	1,8174
410	0,7996	786,6	1,8955	0,6389	786,3	1,8705	0,4245	785,3	1,8248
420	0,8115	791,6	1,9028	0,6484	791,3	1,8778	0,4310	790,4	1,8322
430	0,8235	796,6	1,9100	0,6580	796,3	1,8850	0,4374	795,5	1,8394
440	0,8354	801,7	1,9171	0,6676	801,3	1,8921	0,4438	800,5	1,8466
450	0,8473	806,7	1,9241	0,6771	806,4	1,8992	0,4503	805,6	1,8537
460	0,8592	811,8	1,9310	0,6867	811,5	1,9061	0,4567	810,7	1,8607
470	0,8711	816,8	1,9379	0,6962	816,5	1,9130	0,4631	815,8	1,8676
480	0,8829	821,9	1,9447	0,7057	821,6	1,9198	0,4695	820,9	1,8744
490	0,8948	827,0	1,9514	0,7153	826,8	1,9266	0,4758	826,1	1,8812
500	0,9067	832,1	1,9581	0,7248	831,9	1,9332	0,4822	831,2	1,8879
510	0,9186	837,3	1,9647	0,7343	837,0	1,9398	0,4886	836,4	1,8945
520	0,9304	842,4	1,9712	0,7438	842,2	1,9464	0,4950	841,6	1,9011
530	0,9423	847,6	1,9776	0,7533	847,3	1,9528	0,5014	846,7	1,9076
540	0,9541	852,7	1,9840	0,7628	852,5	1,9592	0,5077	851,9	1,9140
550	0,9660	857,9	1,9904	0,7725	857,7	1,9656	0,5141	857,2	1,9204
560	0,9778	863,1	1,9967	0,7818	862,9	1,9719	0,5204	862,4	1,9267
570	0,9897	868,3	2,0029	0,7913	868,1	1,9781	0,5268	867,6	1,9330
580	1,002	873,6	2,0091	0,8008	873,4	1,9843	0,5331	872,9	1,9392
590	1,013	878,8	2,0152	0,8103	878,6	1,9904	0,5395	878,1	1,9453
600	1,025	884,1	2,0213	0,8198	883,9	1,9965	0,5458	883,4	1,9514
650	1,084	910,7	2,0508	0,8671	910,5	2,0261	0,5775	910,1	1,9811
700	1,143	937,6	2,0793	0,9144	937,5	2,0545	0,6091	937,1	2,0098
750	1,202	965,0	2,1067	0,9617	964,9	2,0820	0,6407	964,6	2,0371
800	1,261	992,8	2,1332	1,009	992,7	2,1085	0,6723	992,4	2,0637

Tabela de vapor d'água superaquecido
 (3/6)

Pres. Temp.	p = 10 kgf/cm ²			p = 15 kgf/cm ²			p = 20 kgf/cm ²		
t	v	h	s	v	h	s	v	h	s
+ C	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/ kg°K	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/ kg°K	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/ kg°K
180	0,1986	663,9	1,5757	-	-	-	-	-	-
190	0,2047	670,5	1,5901	-	-	-	-	-	-
200	0,2105	676,4	1,6028	0,1355	668,8	1,5451	-	-	-
210	0,2161	682,0	1,6145	0,1397	675,6	1,5593	-	-	-
220	0,2215	687,4	1,6256	0,1438	681,8	1,5721	0,1046	675,2	1,5297
230	0,2269	692,7	1,6362	0,1477	687,7	1,5839	0,1078	682,0	1,5432
240	0,2322	698,0	1,6465	0,1515	693,4	1,5951	0,1109	688,3	1,5557
250	0,2374	703,1	1,6565	0,1552	698,9	1,6057	0,1139	694,3	1,5673
260	0,2426	708,3	1,6663	0,1588	704,4	1,6161	0,1169	700,2	1,5783
270	0,2477	713,4	1,6758	0,1624	709,7	1,6260	0,1197	705,9	1,5889
280	0,2528	718,5	1,6851	0,1660	715,1	1,6358	0,1225	711,5	1,5991
290	0,2579	723,6	1,6942	0,1695	720,3	1,6452	0,1253	717,0	1,6090
300	0,2630	728,7	1,7032	0,1730	725,6	1,6545	0,1280	722,4	1,6186
310	0,2680	733,8	1,7119	0,1765	730,8	1,6635	0,1307	727,8	1,6280
320	0,2730	738,8	1,7206	0,1800	736,0	1,6724	0,1334	733,2	1,6371
330	0,2780	743,9	1,7290	0,1834	741,2	1,6811	0,1360	738,6	1,6461
340	0,2830	748,9	1,7373	0,1868	746,4	1,6896	0,1387	743,9	1,6548
350	0,2879	754,0	1,7455	0,1902	751,6	1,6980	0,1413	749,2	1,6634
360	0,2929	759,1	1,7536	0,1936	756,8	1,7062	0,1439	754,5	1,6718
370	0,2978	764,1	1,7615	0,1969	761,9	1,7143	0,1465	759,7	1,6801
380	0,3027	769,2	1,7693	0,2003	767,1	1,7223	0,1490	765,0	1,6882
390	0,3076	774,3	1,7770	0,2036	772,3	1,7301	0,1516	770,2	1,6962
400	0,3125	779,3	1,7846	0,2069	777,4	1,7378	0,1541	775,5	1,7040
410	0,3174	784,4	1,7921	0,2102	782,6	1,7455	0,1566	780,7	1,7117
420	0,3223	789,5	1,7995	0,2135	787,7	1,7530	0,1592	786,0	1,7194
430	0,3271	794,6	1,8068	0,2168	792,9	1,7604	0,1617	791,2	1,7269
440	0,3320	799,7	1,8140	0,2201	798,1	1,7677	0,1642	796,5	1,7343
450	0,3368	804,8	1,8212	0,2234	803,3	1,7749	0,1667	801,7	1,7416
460	0,3417	810,0	1,8282	0,2267	808,5	1,7820	0,1692	806,9	1,7488
470	0,3465	815,1	1,8352	0,2299	813,6	1,7890	0,1716	812,2	1,7559
480	0,3513	820,2	1,8420	0,2332	818,8	1,7960	0,1741	817,4	1,7629
490	0,3561	825,4	1,8489	0,2364	824,1	1,8029	0,1766	822,7	1,7698
500	0,3610	830,6	1,8556	0,2397	829,3	1,8096	0,1790	828,0	1,7767
510	0,3658	835,8	1,8622	0,2429	834,5	1,8164	0,1815	833,2	1,7835
520	0,3706	840,9	1,8688	0,2462	839,7	1,8230	0,1839	838,5	1,7902
530	0,3754	846,2	1,8754	0,2494	845,0	1,8296	0,1864	843,8	1,7968
540	0,3802	851,4	1,8818	0,2526	850,2	1,8361	0,1888	849,1	1,8033
550	0,3850	856,6	1,8882	0,2558	855,5	1,8425	0,1914	854,4	1,8098
560	0,3897	861,9	1,8945	0,2591	860,8	1,8489	0,1937	859,7	1,8162
570	0,3945	867,1	1,9008	0,2623	866,1	1,8552	0,1961	865,1	1,8226
580	0,3993	872,4	1,9070	0,2655	871,4	1,8615	0,1986	870,4	1,8289
590	0,4041	877,7	1,9132	0,2687	876,7	1,8677	0,2010	875,7	1,8351
600	0,4089	883,0	1,9193	0,2719	882,0	1,8738	0,2034	881,1	1,8413
650	0,4327	909,7	1,9491	0,2879	908,9	1,9037	0,2155	908,1	1,8713
700	0,4565	936,8	1,9776	0,3038	936,1	1,9324	0,2275	935,4	1,9001
750	0,4802	964,3	2,0052	0,3197	963,6	1,9600	0,2395	963,0	1,9278
800	0,5039	992,1	2,0317	0,3356	991,6	1,9867	0,2514	991,0	1,9546

Tabela de vapor d'água superaquecido
 (4/6)

Pres. Temp.	p = 25 kgf/cm ²			p = 30 kgf/cm ²			p = 40 kgf/cm ²		
t	v	h	s	v	h	s	v	h	s
° C	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/ kg°K	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/ kg°K	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/ kg°K
230	0,0836	675,4	1,5080	-	-	-	-	-	-
240	0,0864	682,6	1,5222	0,0699	676,1	1,4918	-	-	-
250	0,0891	689,3	1,5352	0,723	683,7	1,5065	0,0509	670,2	1,4536
260	0,0916	695,6	1,5472	0,0746	690,7	1,5197	0,0530	679,1	1,4704
270	0,0940	701,7	1,5585	0,0768	697,3	1,5320	0,0550	687,2	1,4854
280	0,0964	707,7	1,5693	0,0789	703,6	1,5435	0,0568	694,6	1,4990
290	0,0987	713,7	1,5797	0,0809	709,7	1,5545	0,0586	701,6	1,5115
300	0,1010	719,2	1,5897	0,0829	715,7	1,5650	0,0602	708,3	1,5233
310	0,1032	724,8	1,5994	0,0849	721,6	1,5752	0,0618	714,8	1,5345
320	0,1054	730,3	1,6089	0,0868	727,3	1,5850	0,0634	721,0	1,5451
330	0,1076	735,8	1,6181	0,0887	733,0	1,5945	0,0649	727,2	1,5554
340	0,1098	741,3	1,6271	0,0905	738,7	1,6037	0,0664	733,2	1,5652
350	0,1119	746,7	1,6359	0,0924	744,2	1,6128	0,0679	739,1	1,5748
360	0,1141	752,1	1,6445	0,0942	749,8	1,6216	0,0693	744,9	1,5841
370	0,1162	757,5	1,6529	0,0960	755,3	1,6302	0,0707	750,7	1,5931
380	0,1183	762,9	1,6612	0,0978	760,7	1,6386	0,0721	756,4	1,6019
390	0,1204	768,2	1,6693	0,0995	766,2	1,6469	0,0735	762,0	1,6105
400	0,1224	773,6	1,6773	0,1013	771,6	1,6550	0,0749	767,6	1,6189
410	0,1245	778,9	1,6851	0,1031	777,0	1,6630	0,0762	773,2	1,6272
420	0,1265	784,2	1,6929	0,1048	782,4	1,6709	0,0776	778,8	1,6353
430	0,1286	789,5	1,7005	0,1065	787,8	1,6786	0,0789	784,3	1,6432
440	0,1306	794,8	1,7080	0,1082	793,2	1,6862	0,0803	789,9	1,6510
450	0,1326	800,1	1,7154	0,1099	798,5	1,6936	0,0816	795,4	1,6587
460	0,1347	805,4	1,7226	0,1117	803,9	1,7010	0,0829	800,9	1,6662
470	0,1367	810,7	1,7298	0,1133	809,3	1,7083	0,0842	806,3	1,6736
480	0,1387	816,0	1,7369	0,1150	814,6	1,7154	0,0855	811,8	1,6809
490	0,1407	821,4	1,7439	0,11671	820,2	1,7225	0,0868	817,3	1,6882
500	0,1427	826,7	1,7508	0,1184	825,4	1,7295	0,0881	822,7	1,6953
510	0,1446	832,0	1,7577	0,1201	830,7	1,7364	0,0894	828,2	1,7023
520	0,1466	837,3	1,7644	0,1217	836,1	1,7432	0,0906	833,7	1,7092
530	0,1486	842,6	1,7711	0,1234	841,5	1,7499	0,0919	839,1	1,7160
540	0,1506	848,0	1,7777	0,1251	846,8	1,7566	0,0932	844,6	1,7228
550	0,1525	853,3	1,7842	0,1267	852,2	1,7632	0,0944	850,0	1,7295
560	0,1545	858,7	1,7907	0,1284	857,6	1,7697	0,0957	855,5	1,7361
570	0,1565	864,0	1,7971	0,1300	863,0	1,7761	0,0970	860,9	1,7426
580	0,1584	869,4	1,8034	0,1317	868,4	1,7825	0,0982	866,4	1,7490
590	0,1604	874,8	1,8097	0,1333	873,8	1,7888	0,0995	871,9	1,7554
600	0,1623	880,2	1,8159	0,1349	879,2	1,7950	0,1007	877,4	1,7617
610	0,1643	885,6	1,8221	0,1366	884,7	1,8012	0,1019	882,8	1,7679
620	0,1662	891,0	1,8281	0,1382	890,1	1,8073	0,1032	888,3	1,7741
630	0,1682	896,4	1,8342	0,1398	895,5	1,8134	0,1044	893,8	1,7803
640	0,1701	901,8	1,8402	0,1415	901,0	1,8194	0,1057	899,3	1,7863
650	0,1721	907,3	1,8461	0,1431	906,5	1,8253	0,1069	904,9	1,7923
700	0,1817	934,7	1,8750	0,1512	934,0	1,8544	0,1130	932,6	1,8216
750	0,1913	962,4	1,9028	0,1593	961,8	1,8822	0,1191	960,5	1,8496
800	0,2009	990,5	1,9296	0,1673	989,9	1,9091	0,1252	988,8	1,8766

Tabela de vapor d'água superaquecido
(5/6)

Pres. Temp.	p = 50 kgf/cm ²			p = 100 kgf/cm ²			p = 200 kgf/cm ²		
t	v	h	s	v	h	s	v	h	s
° C	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg ^{°K}	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg ^{°K}	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg ^{°K}
270	0,0416	675,0	1,4423	-	-	-	-	-	-
280	0,0433	684,0	1,4588	-	-	-	-	-	-
290	0,0449	692,3	1,4736	-	-	-	-	-	-
300	0,0464	700,0	1,4872	-	-	-	-	-	-
310	0,0479	707,2	1,4997	0,0185	652,4	1,3452	-	-	-
320	0,0492	714,2	1,5115	0,0198	666,3	1,3688	-	-	-
330	0,0506	720,8	1,5227	0,0210	678,6	1,3893	-	-	-
340	0,0519	727,3	1,5333	0,0221	689,6	1,4074	-	-	-
350	0,0531	733,6	1,5435	0,0230	699,6	1,4236	-	-	-
360	0,0543	739,8	1,5534	0,0239	708,9	1,4384	-	-	-
370	0,0555	745,9	1,5629	0,0248	717,6	1,4519	0,0075	610,8	1,2330
380	0,0567	751,8	1,5721	0,0256	725,7	1,4646	0,0087	639,6	1,2780
390	0,0579	757,7	1,5811	0,0264	733,5	1,4764	0,0096	660,2	1,3080
400	0,0590	763,6	1,5898	0,0271	741,0	1,4876	0,0103	675,7	1,3316
410	0,0606	769,4	1,5983	0,0278	748,2	1,4982	0,0110	689,4	1,3518
420	0,0613	775,1	1,6067	0,0285	755,2	1,5084	0,0115	701,8	1,3699
430	0,0624	780,8	1,6149	0,0292	762,0	1,5181	0,0121	713,2	1,3862
440	0,0635	786,5	1,6229	0,0298	768,7	1,5276	0,0126	723,8	1,4012
450	0,0646	792,2	1,6308	0,0305	775,2	1,5367	0,0131	733,7	1,4150
460	0,0656	797,8	1,6385	0,0311	781,7	1,5455	0,0135	743,1	1,4279
470	0,0667	803,4	1,6461	0,0317	788,0	1,5541	0,0140	752,0	1,4399
480	0,0678	809,1	1,6535	0,0323	794,3	1,5625	0,0144	760,5	1,4513
490	0,0688	814,5	1,6609	0,0329	800,5	1,5707	0,0148	768,7	1,4620
500	0,0699	820,1	1,6681	0,0335	806,6	1,5787	0,0152	776,5	1,4723
510	0,0709	825,7	1,6753	0,0341	812,7	1,5865	0,0155	784,2	1,4822
520	0,0720	831,2	1,6823	0,0346	818,8	1,5942	0,0159	791,7	1,4916
530	0,0730	836,8	1,6893	0,0352	824,8	1,6017	0,0163	799,0	1,5008
540	0,0741	842,3	1,6961	0,0358	830,7	1,6091	0,0166	806,1	1,5096
550	0,0751	847,8	1,7029	0,0363	836,7	1,6163	0,0169	813,1	1,5182
560	0,0761	853,4	1,7096	0,0369	842,6	1,6235	0,0173	820,0	1,5265
570	0,0771	858,9	1,7162	0,0375	848,5	1,6305	0,0176	826,8	1,5346
580	0,0781	864,4	1,7227	0,0380	854,4	1,6375	0,0180	833,5	1,5426
590	0,0792	870,0	1,7291	0,0385	860,2	1,6443	0,0182	840,2	1,5503
600	0,0802	875,5	1,7355	0,0391	866,1	1,6510	0,0185	846,8	1,5579
610	0,0812	881,0	1,7418	0,0396	871,9	1,6577	0,0188	853,3	1,5653
620	0,0822	886,6	1,7481	0,0402	877,8	1,6642	0,0191	859,8	1,5726
630	0,0832	892,1	1,7542	0,0407	883,6	1,6707	0,0195	866,2	1,5797
640	0,0842	897,7	1,7604	0,0412	889,4	1,6771	0,0197	872,6	1,5868
650	0,0852	903,2	1,7664	0,0418	895,2	1,6834	0,0200	878,9	1,5937
660	0,0862	908,8	1,7724	0,0423	901,0	1,6897	0,0203	885,2	1,6005
670	0,0872	914,4	1,7784	0,0428	906,8	1,6959	0,0206	891,5	1,6072
680	0,0882	920,0	1,7842	0,0433	912,6	1,7020	0,0209	897,7	1,6138
690	0,0892	925,6	1,7901	0,0438	918,4	1,7080	0,0212	904,0	1,6203
700	0,0901	931,2	1,7959	0,0444	924,2	1,7140	0,0215	910,2	1,6267
750	0,0951	959,3	1,8241	0,0469	953,2	1,7331	0,0229	941,0	1,6576
800	0,0999	987,7	1,8512	0,0495	982,3	1,7709	0,0242	971,6	1,6867

Tabela de vapor d'água superaquecido
 (6/6)

Pres. Temp.	p = 300 kgf/cm ²			p = 400 kgf/cm ²			p = 500 kgf/cm ²		
	v	h	s	v	h	s	v	h	s
t									
° C	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg°K	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg°K	m ³ /kg	kcal/kg	kcal/kg°K
0	0,00099	7,0	0,0003	0,00098	9,3	0,0002	0,00098	11,6	0,0000
10	0,00099	16,8	0,0353	0,00098	19,0	0,0349	0,00098	21,2	0,0345
20	0,00099	26,6	0,0692	0,00098	28,7	0,0686	0,00098	30,8	0,0680
30	0,00099	36,3	0,1020	0,00099	38,4	0,1012	0,00098	40,5	0,1004
40	0,00100	46,1	0,1338	0,00099	48,2	0,1329	0,00099	50,2	0,1319
50	0,00100	56,0	0,1647	0,00100	57,9	0,1636	0,00099	59,9	0,1625
60	0,00100	65,8	0,1946	0,00100	67,7	0,1934	0,00100	69,7	0,1923
70	0,00101	75,6	0,2238	0,00101	77,6	0,2225	0,00100	79,5	0,2212
80	0,00102	85,5	0,2522	0,00101	87,4	0,2507	0,00101	89,2	0,2493
90	0,00102	95,4	0,2798	0,00102	97,2	0,2782	0,00101	99,1	0,2767
100	0,00103	105,3	0,3067	0,00103	107,1	0,3050	0,00102	108,9	0,3034
110	0,00104	115,3	0,3330	0,00103	117,0	0,3312	0,00103	118,7	0,3294
120	0,00105	125,2	0,3587	0,00104	126,9	0,3567	0,00104	128,6	0,3549
130	0,00105	135,2	0,3838	0,00105	136,9	0,3817	0,00104	138,5	0,3797
140	0,00106	145,2	0,4083	0,00106	146,8	0,4061	0,00105	148,4	0,4040
150	0,00107	155,3	0,4324	0,00107	156,8	0,4301	0,00106	158,4	0,4278
160	0,00108	165,4	0,4560	0,00108	166,9	0,4536	0,00107	168,4	0,4512
170	0,00109	175,6	0,4792	0,00109	177,0	0,4766	0,00108	178,4	0,4741
180	0,00111	185,8	0,5020	0,00110	187,1	0,4992	0,00109	188,5	0,4966
190	0,00112	196,1	0,5245	0,00111	197,3	0,5215	0,00110	198,6	0,5187
200	0,00113	206,4	0,5466	0,00112	207,6	0,5435	0,00112	208,8	0,5405
210	0,00115	216,9	0,5684	0,00113	218,0	0,5651	0,00113	219,1	0,5620
220	0,00116	227,4	0,5900	0,00115	228,4	0,5865	0,00114	229,4	0,5831
230	0,00118	238,1	0,6114	0,00117	238,9	0,6076	0,00116	239,8	0,6040
240	0,00119	248,9	0,6326	0,00118	249,6	0,6286	0,00117	250,4	0,6247
250	0,00121	259,8	0,6537	0,00120	260,3	0,6493	0,00119	261,0	0,6452
260	0,00123	270,9	0,6747	0,00122	271,2	0,6700	0,00121	271,7	0,6656
270	0,00125	282,1	0,6956	0,00124	282,3	0,6905	0,00122	282,6	0,6858
280	0,00128	293,6	0,7165	0,00126	293,5	0,7110	0,00124	293,6	0,7059
290	0,00130	305,3	0,7375	0,00128	304,9	0,7314	0,00127	304,8	0,7259
300	0,00133	317,3	0,7586	0,00131	316,5	0,7519	0,00129	316,1	0,7458
310	0,00137	329,6	0,7799	0,00134	328,4	0,7724	0,00132	327,6	0,7658
320	0,00140	342,3	0,8016	0,00137	340,5	0,7931	0,00134	339,4	0,7857
330	0,00145	355,6	0,8237	0,00141	353,0	0,8139	0,00137	351,3	0,8057
340	0,00149	369,4	0,8464	0,00145	365,9	0,8351	0,00141	363,6	0,8259
350	0,00155	384,1	0,8700	0,00149	379,3	0,8560	0,00145	376,2	0,8460
360	0,00163	399,9	0,8955	0,00155	393,3	0,8790	0,00150	389,1	0,8670
370	0,00172	417,8	0,9235	0,00161	408,2	0,9020	0,00154	402,7	0,8885
380	0,00188	439,5	0,9565	0,00168	424,4	0,9270	0,00160	416,9	0,9100
390	0,00217	470,4	1,0040	0,00179	442,1	0,9540	0,00167	431,8	0,9335
400	0,00301	523,4	1,0835	0,00192	462,3	0,9845	0,00175	447,8	0,9570
450	0,00695	677,8	1,3070	0,00381	604,9	1,1890	0,00254	548,6	1,1015
500	0,00891	740,4	1,3903	0,00575	698,7	1,3146	0,00400	656,4	1,2455
550	0,01040	786,8	1,4486	0,00711	757,8	1,3889	0,00519	728,1	1,3355
600	0,01166	826,2	1,4951	0,00822	804,3	1,4437	0,00617	781,7	1,3987
650	0,01280	862,1	1,5350	0,00918	844,6	1,4886	0,00701	826,6	1,4489
700	0,01385	896,0	1,5708	0,01005	881,6	1,5277	0,00777	866,9	1,4913
750	0,01486	928,8	1,6037	0,01086	916,6	1,5628	0,00846	904,3	1,5289
800	0,01582	961,0	1,6344	0,01162	950,4	1,5951	0,00911	940,0	1,5629

Caldeiras

2

A NR-13, redação aprovada pela portaria 23 de 26/04/95, define caldeira a vapor como todo equipamento destinado a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia.

Quanto à pressão de operação, podem ser classificadas como:

- caldeiras de baixa pressão	6 a 16 kgf/cm ²
- caldeiras de média pressão	22 a 39 kgf/cm ²
- caldeiras de alta pressão	60 kgf/cm ² acima

Como pode ser visto, a interface entre tipos é um dado referencial não rígido, que serve para estudos comparativos.

Quando a energia utilizada na produção de vapor é retirada de uma fonte como escape de motores ou gases residuais de processo, a caldeira é dita caldeira de recuperação.

Para efeito da NR-13, as caldeiras são classificadas em categorias:

- A pressão de operação igual ou superior a 1960 kPa (19,98 kgf/cm²)
- C pressão de operação igual ou inferior a 588 kgf/cm² (5,99 kgf/cm²) e volume igual ou inferior a 100 litros.
- B todas as outras não enquadradas nas categorias anteriores.

2.1 Classificação quanto a montagem

As caldeiras também podem ser classificadas quanto ao seu grau de pré-fabricação. Por este critério, as caldeiras são agrupadas em:

- caldeiras compactas;
 - caldeiras montadas parcialmente no local;
 - caldeiras montadas totalmente no local.
- Considera-se uma caldeira como compacta

quando a mesma é embarcada pelo fornecedor completamente montada com: queimadores, ventiladores, controles e acessórios. Estas caldeiras são mais baratas, mais fáceis de ins-

talar e têm menor prazo de entrega. A grande restrição prende-se a problemas de transporte, quando se necessitam de caldeiras de maior porte ou de pressões mais elevadas. Assim, caldeiras de capacidades acima de 250 t/h são totalmente montadas no local, caldeiras na faixa de 100 a 250 t/h são, geralmente, montadas no local, embora tenham parte de seus componentes montados na fábrica, já as caldeiras até 100 t/h são, em geral, compactas.

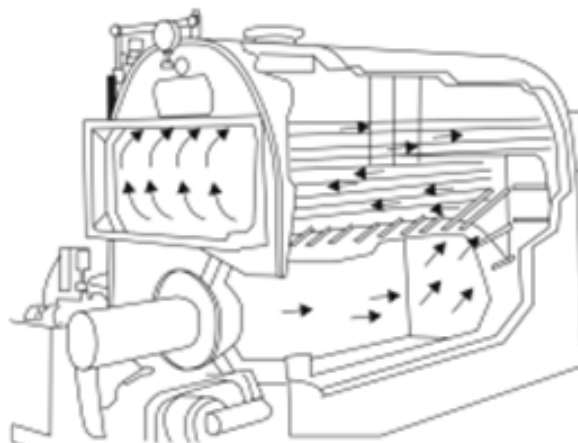
Classificação quanto a concepção

As caldeiras podem ser agrupadas em: -

- Flamotubulares
- Aquotubulares

Caldeiras Flamotubulares - Estas caldeiras caracterizam-se pela passagem dos gases quentes por dentro de tubos, geralmente em três passes antes de saírem para a chaminé. Todo este conjunto de tubos, por onde passam os gases está imerso na água a ser vaporizada. São empregadas para baixas pressões (até 10 kgf/cm²), baixas capacidades (até 15 t/h) e onde possa ser utilizado vapor saturado (título normal 80/90%).

São os equipamentos mais baratos, compactos e que requerem menos cuidados de operação e manutenção.



Caldeira flamotubular de três passes

Caldeiras Aquotubulares - Estas caldeiras caracterizam-se pela combustão em uma câmara denominada fornalha, enquanto a água a ser vaporizada circula no interior de tubos que cobrem as paredes da fornalha.

Nos modernos projetos industriais, são usados, quase completamente, caldeiras tipo tubo de água, dando ensejo, a que se produzam grandes quantidades de vapor e elevadas pressões e temperaturas. A produção de vapor, nestes tipos de caldeiras atinge até 750 toneladas vapor/hora com pressões que já ultrapassam 200 kg/cm².

2.2 Componentes

As caldeiras aquotubulares têm como característica principal a formação do vapor no interior dos tubos, por onde também circula a água. Os principais elementos que compõem o corpo de uma caldeira aquotubular à combustão típica são:

- tubulão superior;
- tubos de circulação ascendente (“risers”);
- tubos de circulação descendente (downcomers”);
- tubulão inferior;
- fornalha (onde ocorre a queima combustíveis).

Podem existir também:

- superaquecedor;
- pré-aquecedor de ar;
- economizador;
- bomba de circulação forçada.

Os cinco primeiros elementos são fundamentais para o funcionamento de qualquer caldeira aquotubular, gerando somente vapor saturado, no entanto são raros os casos de equipamentos contando apenas com eles. Normalmente, devido ao porte, utilização do vapor e economicidade do sistema, vários dos outros itens citados estão presentes.

As funções destes componentes são as seguintes:

Tubulão superior - separar, coletar, acumular o vapor d’água gerado e receber a água de alimentação;

Tubos ascendentes - gerar e conduzir o vapor ao tubulão superior;

Tubos descendentes - conduzir a água líquida ao tubulão inferior;

Tubulão inferior - acumular água líquida e coletar depósitos, de onde podem ser drenados;

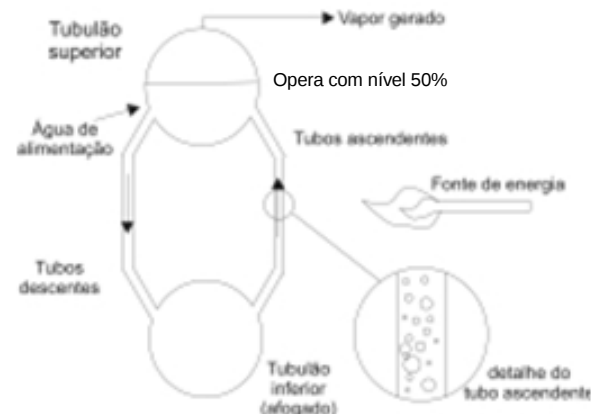
Fornalha - gerar e fornecer a energia necessária ao processo de vaporização de água e superaquecimento do vapor;

Superaquecedor - elevar a temperatura do vapor, secando-o;

Pré-aquecedor de ar - aquecer o ar da combustão, normalmente, aproveitando o calor dos gases da combustão, por economicidade;

Economizador - aquecer a água de alimentação da caldeira, também utilizando os gases de combustão;

Bomba de circulação forçada - manter a circulação de água e vapor no interior dos tubos da caldeira, conforme a pressão da caldeira e projeto da configuração das tubulações.



Modelo esquemático de caldeira aquotubular.

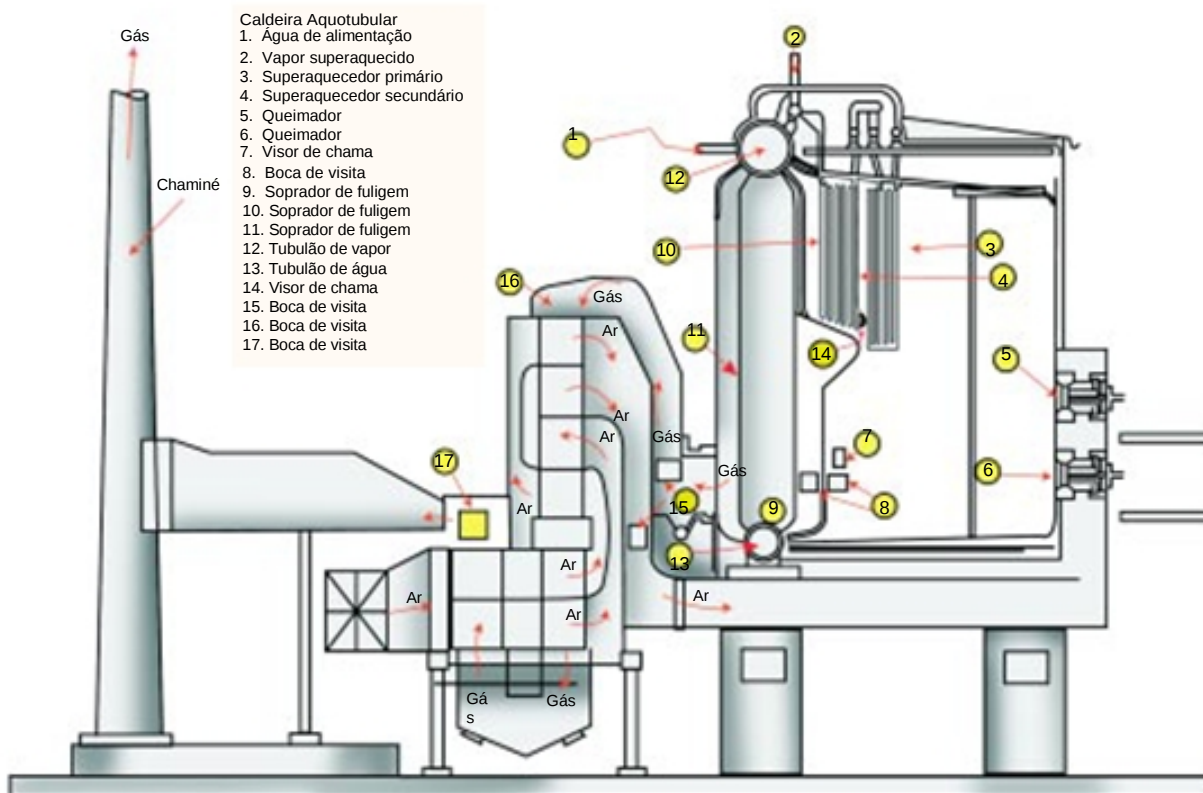
Na Figura a seguir, são apresentados os principais componentes encontrados nos geradores de vapor (caldeiras), que passaremos a descrever sucintamente:

1. Tambor de vapor (“Steam Drum”): é um vaso fechado, localizado no ponto mais alto da caldeira, onde se encontram em equilíbrio água líquida e vapor de água.
2. Tambor de lama (“Mud Drum”): fica localizado no ponto mais baixo do sistema de tubos e tem por finalidade acumular lama, ferrugem e outros materiais. Fazendo-se periodicamente a descarga desses materiais. Este tambor trabalha cheio de água, conforme mostra a Figura a seguir.
3. Feixe tubular: como o próprio nome indica, é constituído de tubos de vários perfis que interligam os tambores. Esses tubos, colocados sobre as paredes da fornalha e no percurso dos gases quentes, integram a superfície de troca de calor da caldeira.

4. Fornalha: é o local destinado à queima de combustível, que pode ser sólido, líquido ou gasoso.
5. Superaquecedor: tem por finalidade transformar o vapor saturado proveniente do tambor de vapor (1) em vapor superaquecido, ou seja, com uma temperatura maior.
6. Economizador: tem por finalidade aumentar a temperatura da água de alimentação, às expensas do calor residual dos gases de combustão. Com isto, consegue-se melhorar o rendimento da caldeira.

deira, e ainda evitar possíveis choques térmicos no tambor de vapor.

7. Pré-aquecedor de ar: tem por finalidade elevar a temperatura do ar de combustão. Com isto, consegue-se melhor queima, aumentando o rendimento da caldeira.
8. Chaminé: é o componente que permite o escoamento dos gases de combustão. A circulação dos gases pode ser obtida por efeito de tiragem natural ou tiragem forçada.



Componentes principais de um gerador de vapor.

2.3 Funcionamento

O ar, à temperatura ambiente, antes de entrar na fornalha, é pré-aquecido no pré-aquecedor de ar (7) pelos gases de combustão. A queima do combustível libera gases à alta temperatura, que se deslocarão por efeito de tiragem da chaminé (8) trocando calor com a água, através dos respectivos componentes. A água de alimentação passa no economizador (6), onde é pré-aquecida e entra no tambor de vapor (1). Deste tambor desce pelos tubos economizadores até o tambor de lama (2), sobe pelos tubos vaporizantes e volta como vapor ao tambor (1). Tem-se, aí, o vapor saturado. Saindo do tambor (1), o vapor saturado passa

pelo superaquecedor (5), onde tem sua temperatura elevada, constituindo-se em vapor superaquecido.

2.4 Circulação de Água

A circulação de água é fundamental para a operação e funcionamento contínuo da caldeira aquotubular. É ela que permite a vazão do vapor para o tubulão superior e sua consequente separação e acúmulo, bem como, a renovação da massa de água aquecida que será vaporizada.

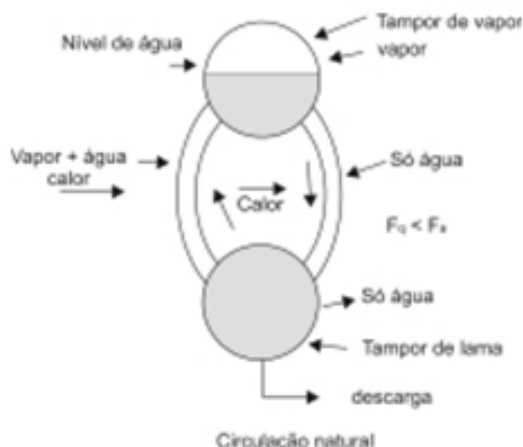
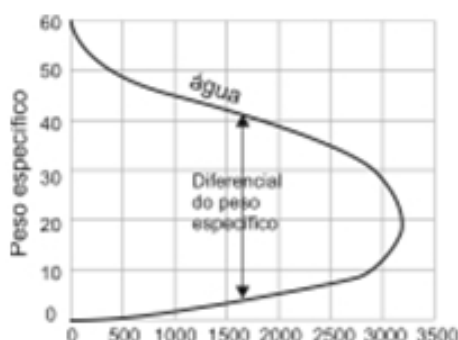
A vazão adequada de água, necessária ao bom desempenho dos diversos circuitos de um gerador de vapor, pode ser obtida, naturalmen-

te, pela ação da gravidade, mecanicamente pela ação de uma bomba ou pela combinação dos dois.

A circulação natural é decorrente da diferença de densidade entre o fluido no interior dos circuitos descendentes (“downcomers”) e dos circuitos ascendentes (“risers”). Basicamente, tem-se água líquida nos “downcomers” e mistura líquido-vapor nos “risers”. A absorção preferencial de calor nos risers em detrimento dos “downcomers” é, em essência, o efeito responsável pelo estabelecimento da circulação.

Já que a diferença de densidade entre a água líquida e a mistura líquido-vapor é o principal fator do estabelecimento da circulação natural, o aumento na pressão de geração de vapor, com a conseqüente diminuição desta diferença, poderá tornar impraticável a circulação natural.

Observa-se no gráfico a seguir que a diferença entre a água líquida e o vapor saturado diminui com o aumento da pressão, tornando-se nula na pressão crítica.



Assim, é que caldeiras gerando vapor acima de 180 kg/cm² utilizam circulação forçada, enquanto que caldeiras gerando vapor abaixo de 140 kg/cm² utilizam circulação natural. No intervalo, dependendo de outros fatores, a

circulação poderá ser natural, forçada ou eventualmente, mista.

Em geradores de vapor projetados para circulação forçada, há dois tipos de arranjo:

- “once-through” ou de uma só passagem;
- com recirculação.

Nos geradores de vapor do tipo “once through” a água é bombeada contra os circuitos de troca de calor, onde gradualmente irá se vaporizar ao longo desses circuitos. Quando a vaporização se processa, o fluxo através de circuitos adicionais resultará no superaquecimento do vapor. Este tipo de arranjo é aplicado para altas pressões de geração de vapor e não necessita tubulação superior para a separação líquido-vapor.

Nos geradores de vapor do tipo “recirculação”, assim como nos de circulação natural, é exigido o uso de um tubulão onde a separação líquido-vapor se verificará. A água líquida será dirigida através dos “downcomers” para a sucção das bombas de circulação e será bombeada contra os circuitos ascendentes (risers), onde a vaporização irá se proceder.

Com o objetivo de manter “molhada” a superfície interna dos risers, é usual limitar-se de projeto, a percentagem de vapor em peso nas partes superiores dos mesmos. Dessa forma, obtêm-se uma vaporização nucleada possibilitando o estabelecimento de um alto coeficiente de película de lado da água, conduzindo a temperatura das paredes metálicas relativamente baixas, compatíveis com o uso de aço-carbono nestas regiões. O valor desta limitação é da ordem de 5 a 20% em massa, dependendo, dentre outros fatores, da pressão de geração.

2.5 Combustíveis

2.5.1 Introdução

O termo “combustível” está, atualmente, ligado diretamente à idéia de fonte de energia calorífica. Desta forma, o termo dificilmente se dissocia de outras formas de energia, que também podem fornecer calor. Fala-se, por exemplo, em combustível nuclear, quando se faz referência a substâncias que por meio da fissão nuclear, produzem calor.

Mas, no sentido exato do termo, combustível é a substância susceptível que, ao se combinar quimicamente com outra, gera uma reação exotérmica, isto é, uma reação que desprende calor.

Praticamente inúmeros elementos e compostos químicos possuem esta propriedade, principalmente quando a reação é feita entre eles e o oxigênio.

Ainda que se utilizem, em certas circunstâncias, elementos como o “berílio” como combustível, apenas algumas substâncias são consideradas “combustíveis industriais”.

Define-se como combustível industrial, toda substância (no estado sólido, líquido ou gasoso) que, ao reagir com o oxigênio (O₂), libera calor.

Combustível + O₂ → gases + calor

Exemplo:



2.5.2 Classificação

Os “combustíveis industriais” podem ser classificados em:

- Naturais (sólidos, líquidos e gasosos);
- Artificiais (sólidos, líquidos e gasosos).

Dentre os mais importantes na classificação anterior, pode-se citar:

Naturais

a) Sólidos

- carvão mineral (turfa, hulha)
- madeira (nó de pinho, lenha)
- xisto (betuminoso)
- resíduos industriais (bagaço de cana, casca de cereais).

b) Líquidos

- petróleo

c) Gasosos

- gás natural.

Artificiais

a) Sólidos

- carvão vegetal
- coque de petróleo

b) Líquidos

- álcool
- derivados de petróleo (exemplos: gasolina, querosene, óleos)
- óleo de xisto

c) Gasosos

- GLP
- gás CO
- gás de gasogênio
- gás de alto forno
- gás natural.

2.5.3 Principais Propriedades de um Combustível

Em função do uso cada vez menor dos combustíveis sólidos, para geração de vapor, serão abordadas as principais propriedades dos combustíveis líquidos e gasosos.

Características Principais dos Combustíveis Líquidos

Além da composição elementar, que indica as percentagens em peso de carbono (C), hidrogênio (H) e enxofre (S) e principais elementos químicos existentes na maioria dos combustíveis industriais, outras três características são muito importantes, tais como o “poder calorífico”, a “viscosidade” e o “ponto de fulgor”, quando se trata de combustíveis líquidos.

Poder Calorífico

É a quantidade de calor que um combustível pode liberar por unidade de peso ou volume. É dado em calorias e normalmente expresso em kcal/kg, Btu/lb, kcal/mol e kcal/m³.

O poder calorífico é determinado em laboratório por um aparelho denominado calorímetro, ou é determinado por uma tabela da National Bureau of Standards que correlaciona o poder calorífico de óleos combustíveis com a densidade.

A presença de hidrogênio (H) no combustível faz com que apareça água nos produtos de combustão, o que determina dois valores diferentes para o Poder Calorífico:

- a) Poder Calorífico Superior (PCS);
- b) Poder Calorífico Inferior (PCI).

Poder Calorífico Superior (PCS) é definido como a quantidade de calor que o combustível libera na queima, por unidade de massa (peso) do combustível, supondo que o mesmo seja submetido à combustão completa.

Poder Calorífico Inferior (PCI) é definido como a quantidade de calor que o combustível libera na queima, por unidade de massa (peso) do combustível, menos o calor necessário para evaporar a água existente no combustível.

Nos cálculos de combustão, é aplicado o Poder Calorífico Inferior (PCI) do combustível.

Viscosidade

É a resistência ao escoamento apresentada pelo óleo combustível. Dá informações sobre a facilidade de movimentação e transferência do óleo combustível, na temperatura vigente e também o grau de pré-aquecimento a que o óleo deve ser submetido, a fim de obter-se uma temperatura correta de atomização, para uma combustão eficiente. Este grau de aquecimento, a que o óleo deve ser submetido, é obtido através de um gráfico de viscosidade da ASTM Standard Viscosity Temperature Charts.

A determinação da Viscosidade do óleo combustível é feita em laboratório em aparelhos denominados viscosímetros Saybolt.

O viscosímetro Saybolt é operado fazendo escoar a amostra através de orifícios denominados “Furol” - SSF (Segundos Saybolt Furol) e “Universal” - SSU (Segundos Saybolt Universal).

A viscosidade SSU possui um valor aproximado 10 (dez) vezes maior que a SSF, isto é, o orifício Furol é maior para dar maior vazão.

$$SSU = SSF \times 10$$

São, portanto, empregados para óleos mais viscosos o SSF e para óleos menos viscosos o SSU.

Outra unidade empregada na determinação de viscosidade de óleos combustíveis é o “Centistokes” (cts). Nesta unidade, são obtidas as viscosidades dos óleos mais pesados, mais viscosos.

Quando a viscosidade SSU é maior que 80 (oitenta), utiliza-se a seguinte relação:

$$SSU = cts \times 4,63$$

Ponto de Fulgor

Ponto de Fulgor de um combustível é a menor temperatura na qual um produto (óleo, por exemplo) é vaporizado, em quantidade suficiente para formar com o ar uma mistura capaz de se inflamar momentaneamente, quando se incide uma chama sobre a mesma.

O Ponto de Fulgor determina condições seguras de armazenamento do óleo, além de detectar se o mesmo contém produtos mais leves.

2.5.4 Características Principais dos Combustíveis Gasosos

O gás combustível e o gás natural são considerados combustíveis de fácil queima, bastando uma mistura adequada de gás e ar para

que entrem em combustão com a simples aproximação de uma chama.

A combustão desses gases proporciona uma queima completa, com pequeno excesso de ar e sem presença de fumaça.

O gás combustível é constituído de uma mistura de hidrocarbonetos que são compostos de hidrogênio e carbono, além de pequenas quantidades de CO, O₂ e H.

Duas características são muito importantes no gás combustível, o “poder calorífico” e a “densidade”.

Poder Calorífico

Da mesma forma que os combustíveis líquidos, os combustíveis gasosos também apresentam Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI), expressos em kcal/kg e kcal/m³.

O Poder Calorífico de um gás é maior se esse gás conter mais átomos de carbono (C) e hidrogênio (H).

Assim, o gás natural, basicamente metano (CH₄) tem menor poder calorífico do que GLP, constituído de propano (C₃H₈) e butano (C₄H₁₀).

Densidade

A Densidade relativa de um gás é dada sob a forma de um número adimensional, assim no gás natural que é mais leve que o ar, tem densidade relativa de 0,6 e, o GLP que é mais pesado que o ar, tem densidade relativa de 1,7.

Portanto, através de exemplos anteriores, pode-se dizer que a densidade relativa de um gás é a relação entre a massa desse gás e uma massa igual de ar atmosférico, estando ambos (gás e ar) nas mesmas condições de temperatura e pressão.

A propriedade de Densidade de um gás é importante na sua própria combustão.

2.6 Teoria da Combustão

A combustão é definida como a combinação rápida do oxigênio com os elementos combustíveis, produzindo luz e calor.

A eficiência da combustão está diretamente relacionada à combinação de três fatores:

- temperatura suficiente para a ignição;
- tempo necessário para uma combustão completa;
- turbulência.

Estes três fatores governam a velocidade e o processo de reação do combustível após a sua iniciação.

A temperatura é mantida pelo balanço de calor na fornalha, onde se conseguem manter as temperaturas razoavelmente estáveis, desde que não se interrompa o fluxo de combustível ou ar.

O tempo necessário para a reação de combustível é assegurado por projeto. Depende do tipo da fornalha, principalmente quanto ao seu dimensionamento no que se refere ao tipo e volume do combustível usado na queima.

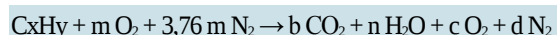
A turbulência é o fator mais difícil de se conseguir e se torna necessário para assegurar uma boa mistura combustível/ar, forma de chama e queima completa do combustível.

Reação de combustão

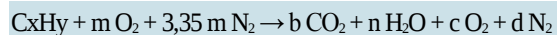
As reações químicas que ocorrem na combustão de um hidrocarboneto são muito complexas, havendo na maioria dos casos, reações intermediárias antes de se chegar aos produtos finais da combustão - CO_2 , H_2O , O_2 e N_2 .

A reação geral completa ocorre:

a) em volume:



b) em peso:



As reações de combustão podem ser representadas conforme se segue:

- a) $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 97.200 \text{ kcal}$
- b) $2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + 136.400 \text{ kcal}$
- c) $\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2 + 70.400 \text{ kcal}$
- d) $\text{C} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 28.880 \text{ kcal}$
- e) $\text{CO} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 68.320 \text{ kcal}$

Pode-se dizer que nas reações acima:

- a) 12 kg de C reagem com 32 kg de O_2 , formando 44 kg de CO_2 e liberando 97.200 kcal. Se 12 kg de C, para formar CO_2 , liberam 97.200 kcal, 1 kg libera 8.100 kcal.
- b) 4 kg de H_2 reagem com 32 kg de O_2 , formando 36 kg de H_2O , liberando 136.400 kcal. Se 4 kg de H_2 liberam 136.400 kcal, 1 kg libera 34.100 kcal.
- c) 32 kg de S reagem com 32 kg de O_2 , formando 64 kg de SO_2 e liberam 70.400 kcal. Se 32 kcal de S liberam 70.400 kcal, 1 kg libera 2.200 kcal.

d) 12 kg de C reagem com 16 kg de O_2 , formando 28 kg de CO e liberando 28.880 kcal. Se 12 kg de C, para formar CO_2 liberam 28.880 kcal, 1 kg libera 2.407 kcal.

e) 28 kg de CO reagem com 16 kg de O_2 formando 44 kg de CO_2 e liberando 68.320 kcal. A quantidade de calor liberado por kg em termos de C é igual a 5.693 kcal.

2.7 Queimadores

São dispositivos destinados a preparar o combustível para a queima, fornecendo-o à fornalha dividido e em íntima mistura com o ar.

O maçarico é o elemento que se destina a receber o óleo, e atomizá-lo para o interior da fornalha.

Há diversos tipos, dos quais, normalmente, são usados, em caldeiras de refinarias:

- maçaricos para óleo combustível (leves e pesados) e óleo diesel;
- maçaricos para gás combustível (gás natural e gás de refinaria).

Como a queima de óleo combustível ou diesel processa-se na fase gasosa, há necessidade que o mesmo seja atomizado, que é a divisão do combustível em gotículas finas (10-50 microns), facilitando, assim, a sua vaporização com o calor da chama e o contato com o ar de combustão. Quanto mais pesado for o combustível, tanto menores deverão ser as gotículas para manter a eficiência do maçarico.

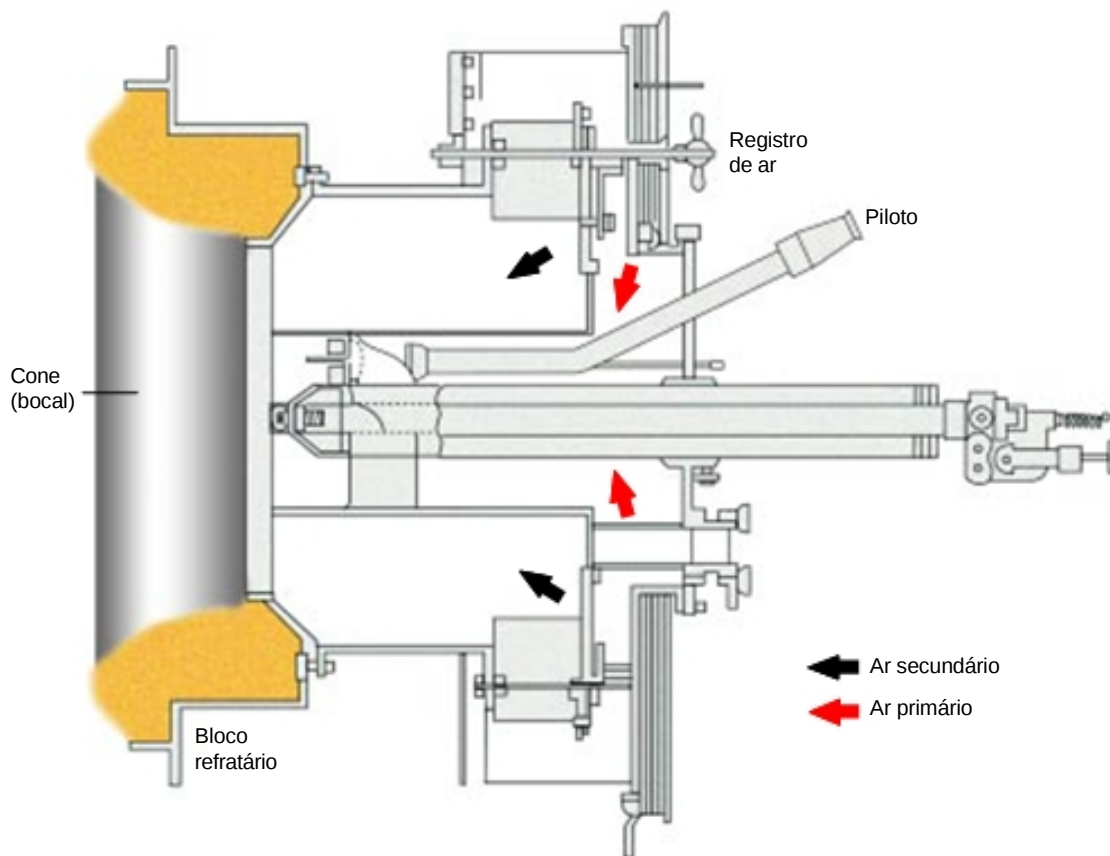
O maçarico a gás é, em geral, um maçarico simples, porque o combustível é introduzido diretamente na fornalha, passando através de uma simples lança, sem qualquer “preparo”, isto é, sem necessidade de ser atomizado como o óleo combustível ou diesel, por encontrar-se no estado gasoso. Estabelece-se, apenas, a proporção entre a mistura do combustível com o ar.

Há dois tipos de maçaricos para combustíveis gasosos, os aspirantes (Premix) e os de queima direta. Nas caldeiras das refinarias, usam-se os de queima direta com ar forçado, baseados na injeção direta de gás na fornalha através de maçaricos com bicos que possuem furos de pequeno diâmetro. São queimadores com baixo nível de ruído. Normalmente, as chamas são longas, requerendo uma atenção maior quanto à sua operação, principalmente no que se refere à incidência de chama.

Os queimadores podem ser do tipo que utilizam somente um único combustível, óleo combustível ou gás combustível, ou do tipo combinado, que pode queimar óleo combustível ou gás combustível ou ambos em conjunto. As caldeiras das refinarias utilizam, normalmente, o tipo combinado.

A Figura a seguir mostra um tipo de queimador de queima combinada.

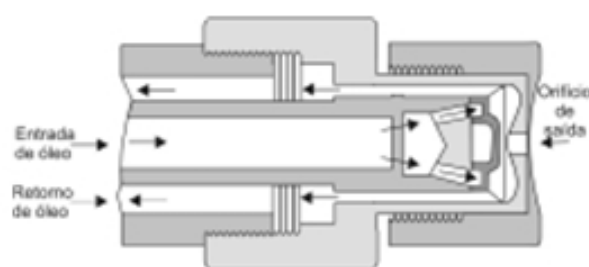
O ar que atravessa o queimador é, geralmente, dividido em duas partes, o chamado “ar primário”, misturado ao combustível no próprio queimador, e o “ar secundário”, que o faz dentro da fornalha. A forma da chama é grandemente afetada, fazendo-se variar a distribuição do ar primário e secundário, aumentando-se o comprimento da chama à medida que aumenta a vazão de ar secundário.



Queimador para queima combinada (gás e óleo).

A pulverização é conseguida com o auxílio de um agente pulverizante, que pode ser ar comprimido, vapor d'água ou mecanismos de pulverização mecânica.

A atomização mecânica é aquela em que a divisão do combustível requer alta pressão ($1,5 \text{ kg/cm}^2$) e baixa viscosidade (em torno de 70 SSU) no bico do maçarico. Há diversas maneiras de atomizar o óleo mecanicamente, dentre as quais, a mais usada é a de atomização com vazão variável de combustível, em que parte do combustível sai pelo orifício do bico atomizador e o excesso pelo tubo de retorno para o sistema de bombeio; há uma válvula de controle na linha de alimentação que controla a vazão de óleo para o maçarico. A Figura ao lado mostra um tipo de bico atomizador com retorno de óleo.



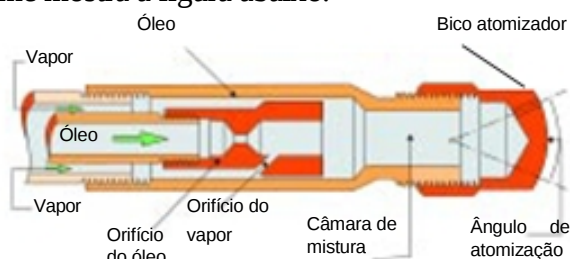
Bico atomizador para atomização mecânica.

Nas refinarias, a atomização mecânica vem sendo reduzida gradativamente, em virtude da queima de óleos cada vez mais pesados (resíduo de vácuo, resíduo asfáltico), o que torna difícil sua utilização neste tipo de processo.

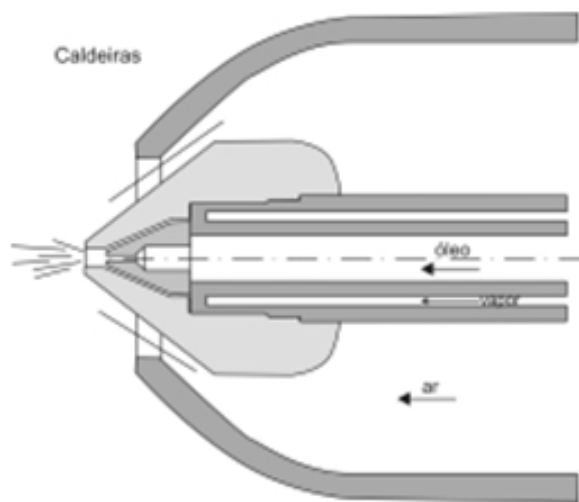
A atomização a vapor é aquela em que a divisão do combustível é feita com vapor que

atua como agente atomizador. A pressão necessária à atomização do combustível é menor (2 kg/cm^2) que a utilizada na atomização mecânica e aceita viscosidades maiores do óleo combustível (até 200 SSU). É necessário que o vapor de atomização seja superaquecido e esteja a uma pressão defasada do óleo, normalmente a uma pressão maior. Nas refinarias, os maçaricos empregados geralmente operam com a pressão do vapor em $1,5 \text{ kg/cm}^2$ acima da pressão do óleo.

Este processo consiste na passagem do vapor através de um orifício de redução para uma câmara de mistura, arrastando consigo o óleo combustível em pequenas gotículas, saindo atomizado pelo bico atomizador. Conforme mostra a figura abaixo.

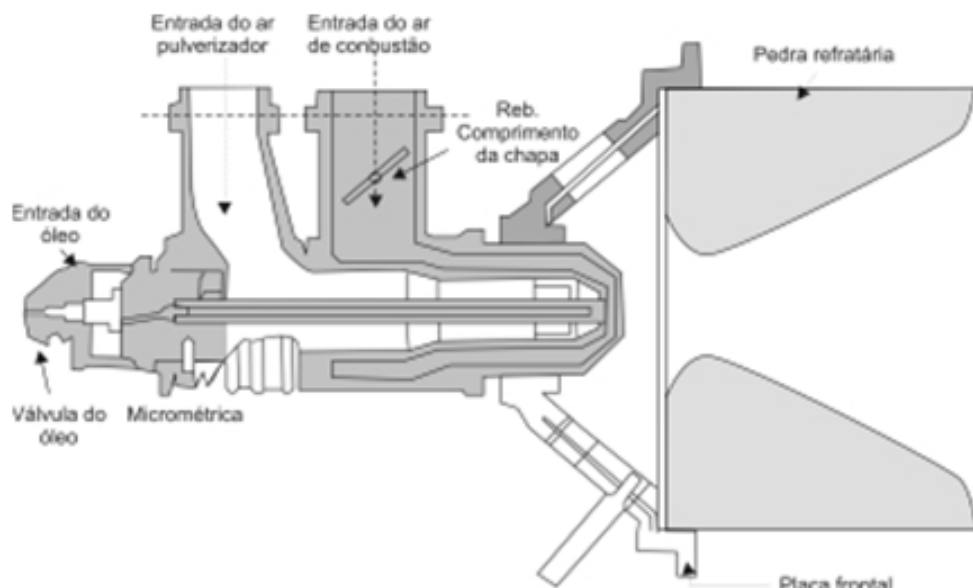


Maçarico a óleo com atomização a vapor.



Maçarico a vapor.

A atomização a ar é um processo semelhante ao descrito acima, operando como agente atomizador do ar comprimido ao invés de vapor. É usado para combustíveis de baixa viscosidade.



Maçarico de baixa pressão, com comando independente de ar (primário e secundário).

Outro item a ser abordado sobre queimadores é o bloco refratário, que é um conjunto de tijolos de forma circular localizado na parte posterior do queimador, exatamente na en-

trada da fornalha onde a chama do maçarico projeta-se.

Os blocos refratários possuem as seguintes finalidades:

- auxiliam a manter mais homogênea a mistura da combustão, uma vez que a sua superfície recebe calor da chama e irradia à mistura ar/combustível, vaporizando-a, para aumentar a velocidade de queima.
- formam o corpo da chama, impedindo que se espalhe de sua base.

A queima de óleo, gás ou carvão pulverizado exige alta turbulência para garantir uma perfeita mistura combustível-ar.

Ressalte-se que a boa operação com pequenos valores de excesso de ar, grande meta no projeto de queimadores, só é conseguida aumentando-se a turbulência, o que traz como consequência a elevação da perda de carga no queimador.

A fim de permitir grandes oscilações na carga da caldeira, os queimadores deverão possuir bom desempenho dentro de uma faixa de operação definida pelo "turn-down ratio" - relação entre a maior e a menor taxa de liberação de calor possível.

O ponto de vazão máxima é aquele no qual o maçarico, operando em sua total capacidade, oferecerá condições para que a velocidade da mistura ar/combustível provoque um possível afastamento da chama do bico do maçarico. Essa condição persistindo, poderá ocorrer a extinção da chama.

No ponto de vazão mínima, poderá ocorrer um retrocesso de chama, pois, como a quantidade de ar de combustão é relativamente pequena, poderá provocar uma insuficiência de ar e o conseqüente retrocesso da chama.

Os maçaricos a óleo possuem, geralmente, uma faixa operacional da ordem de 4:1 ("turn-down ratio"), enquanto que os maçaricos a gás conseguem uma elevada faixa operacional, da ordem de 10:1 sem grandes problemas.

Em suma, as finalidades do queimador são:

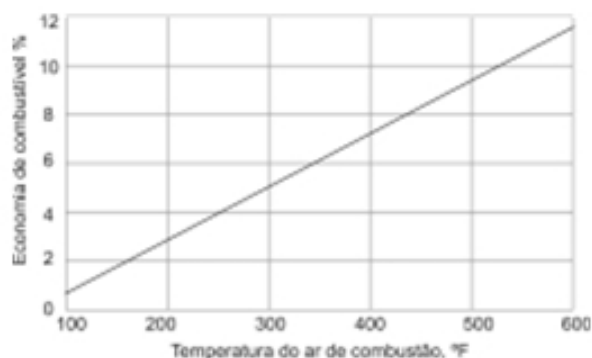
- pulverizar o combustível;
- misturar intimamente o óleo, já em névoa, com o ar;
- manter as proporções entre o ar e o óleo.

2.8 Pré-Aquecedores de Ar

Em geral, os fornos e caldeiras são projetados para terem seus gases de combustão deixando a zona de convecção com temperaturas em torno de 300°C. Isto leva a uma perda de calor de 20% aproximadamente. Para recupe-

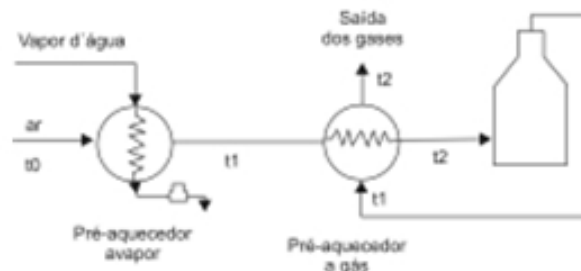
rar parte deste calor, existem equipamentos que transferem o calor dos gases para o ar utilizado na combustão: são os chamados pré-aquecedores de ar. A eficiência da caldeira, como um todo, aumenta em cerca de 2,5% para cada 50°C de queda de temperatura dos gases na saída.

O pré-aquecedor de ar, que aquece o ar para temperaturas acima de 150°C, proporciona uma economia de combustível de 5 a 10%.



O ideal seria recuperar o máximo calor existente nos gases, levando-os à temperatura próxima da ambiente. Porém, isto não é possível, pois geralmente o combustível utilizado contém, compostos de enxofre que na reação de combustão formam o SO₃. Este composto, quando misturado ao vapor d'água e abaixo de um temperatura em torno de 160°C, condensa formando o H₂SO₄ ou ácido sulfúrico, que provoca um violento processo de corrosão no equipamento.

Tal fato leva a que seja incluído no sistema de pré-aquecimento um pré-aquecedor de ar a vapor conforme o esquema.



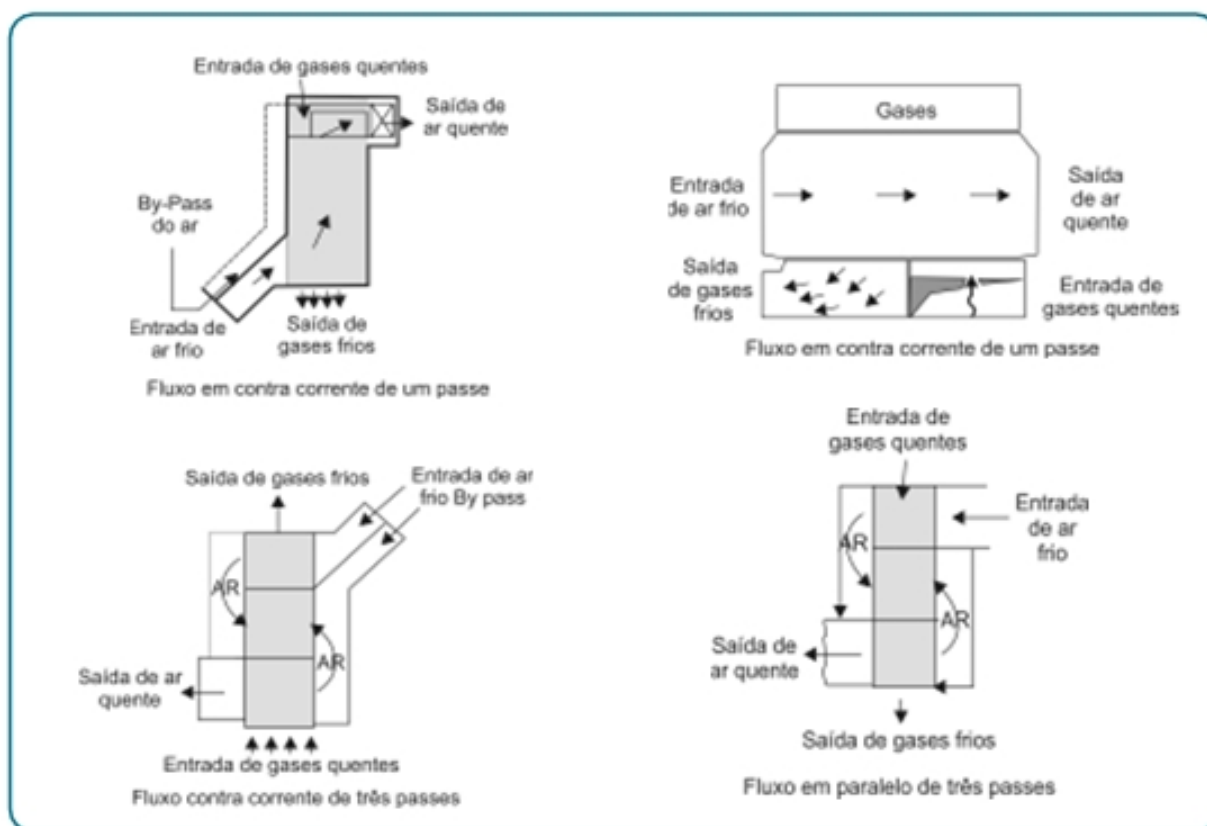
O pré-aquecedor a vapor permite que a temperatura do ar seja elevada da temperatura ambiente t_0 para a temperatura t_1 . Com isto, a diferença média de temperatura entre o fluido quente (gás de combustão) e o fluido frio (ar) no pré-aquecedor a gás é diminuída.

Desta forma, a temperatura de saída dos gases (T_2) pode indiretamente ser controlada pela maior ou menor vazão de vapor no pré-aquecedor a vapor.

Para se recuperar todo o calor possível operando com a máxima eficiência, porém sem corrosão nos equipamentos, deve-se reduzir a temperatura dos gases (T_2), reduzindo vapor no pré-aquecedor a vapor, até um limite que será a temperatura em que começará a haver formação de H_2SO_4 . Esta temperatura é chamada de Ponto de Orvalho (Dew-point) do H_2SO_4 .

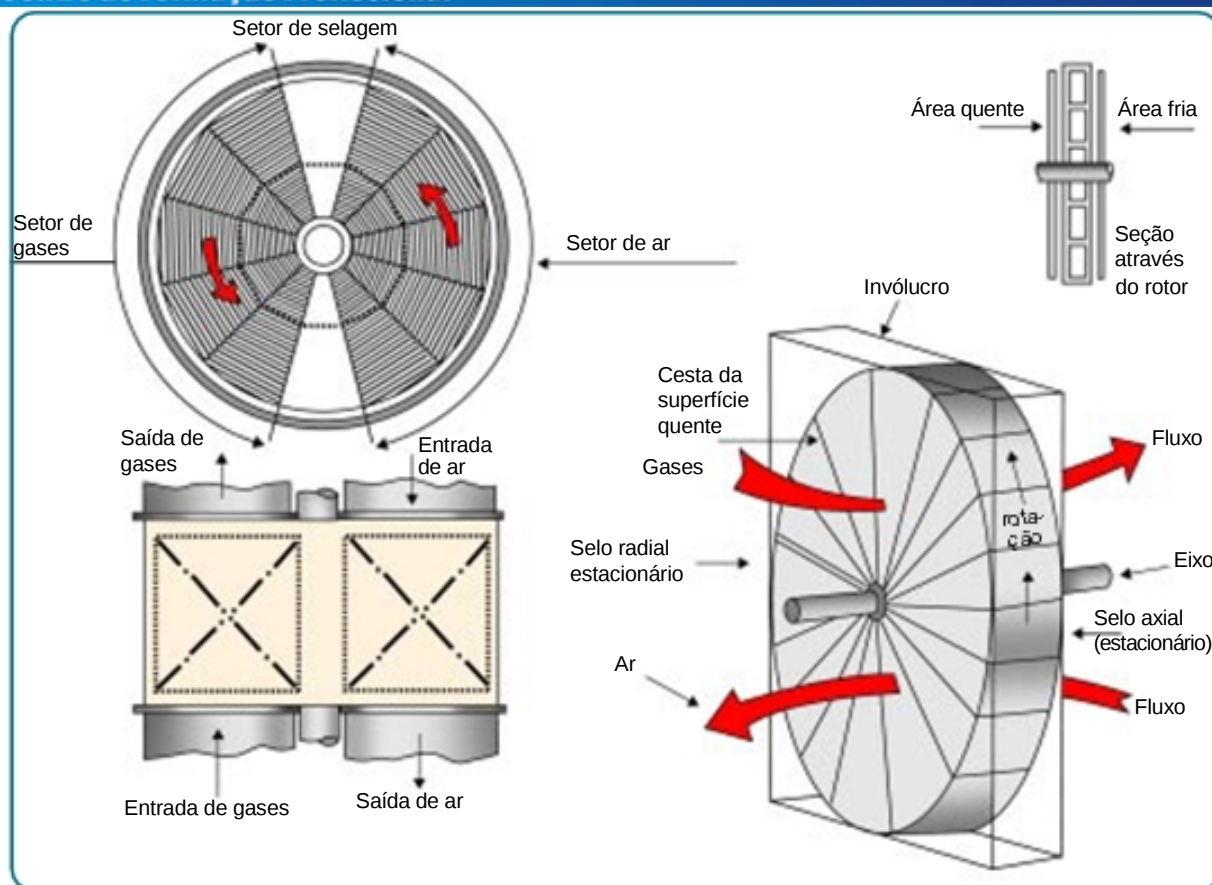
Os pré aquecedores de ar podem ser classificados em “tubulares” e “regenerativos”.

- Pré aquecedores de Ar Tubular - são basicamente constituídos de um feixe tubular, fixado a espelhos, inserido em um envólucro de chapa metálica. Os diversos arranjos encontrados para o fluxo de ar e gases são mostradas na figura que se segue. O arranjo com fluxos em contra-corrente é o mais usual face a maior capacidade que a presença, contudo, o arranjo com fluxos em paralelo é o menos susceptível aos problemas de corrosão pelas maiores temperaturas de superfícies metálicas que neles se verificam.



Pré-Aquecedor de Ar.

Pré aquecedores de Ar Regenerativos - são constituídos de um motor, que gira a baixa velocidade (2 a 3 rpm), contendo um material de enchimento que atua como “transportador” de calor. Os gases de combustão, ao fluírem pelo equipamento, cedem calor ao material do enchimento que, pelo movimento do rotor, ao ocupar o compartimento no qual se tem o fluxo de ar, são resfriados pela absorção de calor pelo ar. A grande vantagem dos pré aquecedores regenerativos sobre os tubulares, consiste na elevada superfície de troca de calor num equipamento altamente compacto, o que é obtido pelo uso de chapas metálicas corrugadas, como material do enchimento.



Pré-aquecedor de ar tipo regenerativo.

O uso do pré-aquecedor de ar não é essencial à operação de um gerador de vapor. Sua instalação dependerá de uma análise de investimento adicional versus economia operacional. Contudo, só será possível a obtenção de altas eficiências através do seu uso, visto que, pelo fator do ar ser o fluido de mais baixa temperatura (temperatura ambiente), será possível obter considerável redução na temperatura dos gases para a chaminé.

Os principais fatores a serem considerados para a instalação desse equipamento são:

- o custo inicial do equipamento;
- as despesas de manutenção;
- os custos de instalação;
- o consumo de combustível;
- o espaço disponível.

As principais desvantagens no uso de pré-aquecedores consistem em:

- problemas de corrosão ácida nas partes frias;
- exigências de grandes superfícies de troca de calor;
- necessidade de grandes espaços para instalação e de grandes pesos a suportar podem trazer inconvenientes de "lay-out";

- aumento na perda de carga nos fluxos de ar e gases implicam em aumento na potência para tiragem;
- existência de vazamento devido à corrosão, que só será detectado, quando a corrosão já estiver em estágio avançado.

2.9 Deterioração em fornos e caldeiras

Os principais agentes responsáveis pela corrosão em equipamentos, operando em temperatura elevadas, como é o caso dos fornos e caldeiras, são:

- oxidação;
- condensação de ácidos;
- cinzas fundidas.

Outras causas de deterioração incluem:

- deposição de coque nos tubos;
- desprendimento de refratários;
- empenamento de tubos por fluência;
- corrosão de suportes de tubos;
- oxidação de maçaricos.

2.9.1 Oxidação

Consiste no desgaste de materiais metálicos pela reação com o oxigênio do ambiente.

O filme de óxido forma-se no mesmo local onde o metal foi atacado, constituindo uma

barreira que diminui a velocidade de ataque: para que mais oxigênio entre em contato com a superfície metálica, é preciso haver difusão através da camada de óxido formado.

A adição de determinados elementos de liga, como Cr, Ni, Mo, Si e Al melhora a resistência à oxidação dos aços.

2.10 Tratamento de Água de Caldeiras

2.10.1 Introdução

Do ponto de vista de tratamento d'água, um sistema gerador de vapor pode ser considerado como contendo uma secção pré-caldeira, uma secção pós-caldeira e a caldeira propriamente dita.

A secção pré-caldeira é constituída de todos os equipamentos e tubulações instaladas antes da caldeira, isto é, equipamentos - primários para tratamento d'água: desaeradores, deionizadores, etc.

A secção pós-caldeira, inclui todos os equipamentos e tubulações instalados após a caldeira, inclusive o superaquecedor.

Para uma melhor compreensão de tratamento de água a ser utilizada na geração de vapor, é importante salientar que existem duas correntes distintas de água:

- água de Alimentação de Caldeira: é a água que vai ser enviada à caldeira (secção pré-caldeira);
- água de Caldeira: é a água que já está circulando no interior da caldeira.

A água de alimentação de caldeira, independentemente do tipo e extensão do tratamento, pode conter contaminantes que eventualmente sejam causa de depósitos, corrosão e arraste.

Os depósitos reduzem diretamente a transferência de calor, causando um maior consumo de combustível, altas temperaturas no metal (tubos da caldeira) e possíveis danos. Apesar de mais sérios na caldeira, também podem causar problemas nos sistemas pré e pós-caldeira.

A corrosão não apenas provoca danos no ponto de ataque, como produz contaminações sérias de óxidos metálicos que, por sua vez, podem causar depósitos em outros locais.

2.10.2 Tratamento de água para caldeiras de alta pressão

Caldeiras que operam em altas pressões devem ser alimentadas com água destilada por evaporadores ou água desmineralizada. As caldeiras que operam a altas pressões são tão sus-

cetíveis a problemas de corrosão e formação de depósitos como as caldeiras que operam em pressões mais baixas. No entanto, a pressões e temperaturas de operação mais elevadas, estes problemas são gradualmente agravados.

O tratamento mais difundido, em função de custos e facilidades operacionais, é o da desmineralização da água.

A desmineralização consiste na remoção dos sais presentes na água. Esta remoção pode ser feita por resinas de troca iônica e/ou membranas de osmose reversa.

2.10.3 Remoção de Gases Dissolvidos

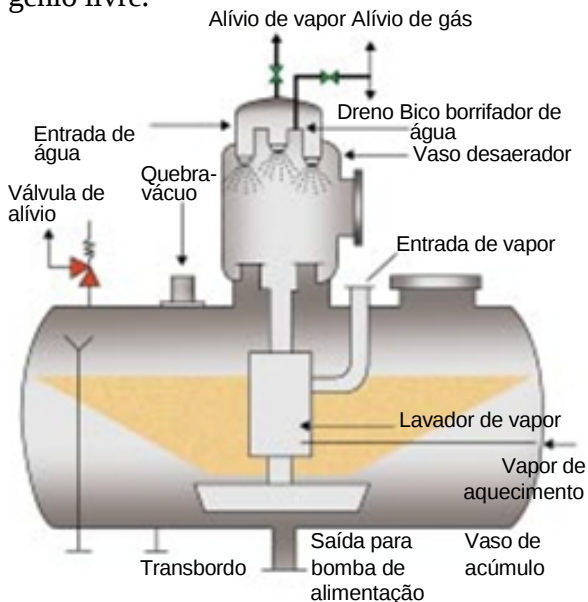
A presença de gases dissolvidos na água, como O_2 , CO_2 , H_2S , etc., é a principal causa de corrosão em caldeiras, independente da pressão de operação (baixa, média ou alta).

Principalmente O_2 e CO_2 são altamente corrosivos ao ferro e ligas de cobre que constituem as tubulações, aquecedores, rotores de bombas, etc.

A prevenção contra corrosão efetua-se por processos mecânicos e químicos de “desaeração” da água.

2.10.4 Desaeração Mecânica da Água

O processo mecânico de desaeração consiste no uso de um equipamento denominado de “desaerador”, para fazer a remoção do oxigênio livre.



Desaerador Mecânico.

O princípio da desaeração mecânica nos desaeradores consiste no seguinte: a água a ser desaerada entra no desaerador pela parte superior e, em forma de gotículas, recebe o vapor em contra corrente, que entra pela parte inferior.

Este vapor em contra corrente com a água e em contato direto, aquece a água e os gases nela contidos. Devido ao aquecimento e ao arraste provocado pela passagem do vapor, os gases que são mais voláteis, tendem a subir para a parte superior do desaerador, escapando para atmosfera através da válvula de “vent” (suspiro).

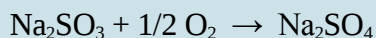
2.10.5 Desaeração Química da Água

O processo químico de desaeração da água, consiste na injeção de um produto químico “seqüestrante” de oxigênio.

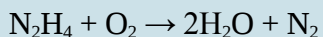
Nas caldeiras que operam em baixas e médias pressões, para eliminação química do CO₂, usa-se principalmente a morfolina (C₄H₉NO).



Para eliminação química do O₂, para caldeiras de baixa e média pressão, usa-se o sulfito de sódio (Na₂SO₃), desde que a pressão de operação da caldeira não ultrapasse 40 kgf/cm², pois, acima é nocivo, uma vez que se decompõe e forma produtos corrosivos como o SO₂ e H₂S.



Portanto, para pressões superiores a 40 kgf/cm², é recomendado o uso de “hidrazina” (N₂H₄), que será abordada a seguir em caldeiras de alta pressão.



Da mesma maneira que para caldeiras de baixa e média pressões, para caldeiras de alta pressão, também é dosado fosfato para eliminação da dureza na água de caldeira.

O fosfato dosado (Na₃PO₄) serve também para elevar o pH da água de caldeira.

O tipo de tratamento mais utilizado, atualmente, em caldeiras de alta pressão é o do controle de pH sem cáusticos livres.

Observação: Os tratamentos de água para caldeiras de baixa, média e alta pressão têm o mesmo objetivo, ou seja, prevenir esses equipamentos e seus auxiliares, contra corrosão, depósitos e arraste.

O que muda, fundamentalmente, o tipo de tratamento são os valores limitantes definidos para cada tipo de caldeira (principalmente função da pressão/temperatura de operação).

Assim, apenas para citar um exemplo, o valor máximo de sílica (sal altamente incrustante) permissível na água de caldeira é inversamente proporcional à pressão de trabalho dessa caldeira.

Em caldeiras que operam numa pressão de 60 kgf/cm², o valor máximo de sílica permissível é de 1,5 ppm, enquanto que, em caldeiras que operam numa pressão de 90 kgf/cm², esse valor cai para 0,15 ppm.

2.10.6 Purga das Caldeiras

Durante a geração de vapor, a caldeira vai acumulando e concentrando os sólidos dissolvidos que ingressam com a água de alimentação, somados com os produtos químicos que são injetados diretamente no tubulão inferior da caldeira.

Para isso, as caldeiras, principalmente as de média e alta pressão, são dotadas de sistemas de “purga” (descargas de água).

É através dessas purgas que se mantêm a concentração de sólidos dentro dos limites permitidos.

A purga pode ser de superfície (extração contínua) e de fundo (extração intermitente).

A de superfície é feita através do tubulão superior e a de fundo pelo tubulão inferior.

Purga Contínua - a purga contínua consiste de uma “sangria constante” de água do tubulão superior, com o intuito de controlar o teor de sólidos dissolvidos, principalmente, sais de sílica que são altamente incrustantes.

A vazão da purga contínua é controlada através de uma válvula existente junto ao tubulão superior.

Purga de Fundo - a purga de fundo consiste de uma “sangria intermitente” de água do tubulão inferior, com o intuito de remover parte dos sólidos, que, ao longo do tempo, depositam-se (precipitam) no fundo do tubulão, em forma de lama.

A vazão da purga de fundo é controlada através de uma válvula existente junto ao tubulão inferior.

2.10.7 Presença de Algumas Substâncias na Água de Caldeiras e Seus Inconvenientes

Sílica (SiO₂)

A Sílica é um dos sais de maior poder de incrustação, além de sair arrastada pelo vapor (“arraste”), vai incrustar em equipamentos que utilizam esse vapor, causando sérios problemas operacionais.

O valor máximo de sílica permissível em águas de alimentação e águas de caldeira é inversamente proporcional à pressão de operação da caldeira. Assim, numa caldeira que opera a uma pressão de 60 kgf/cm², o valor máximo de sílica permissível na água dessa caldeira é de 1,5 ppm, enquanto que, em caldeiras a uma pressão de 90 kgf/cm², esse valor cai para 0,15 ppm.

O controle de sílica na água de caldeira é feito através da vazão de purga contínua.

Cloretos (Cl⁻)

Os cloretos, geralmente, estão presentes nas águas brutas, sob a forma de cloretos de sódio, cálcio e magnésio.

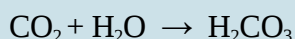
Em concentrações elevadas, podem causar corrosão nos tubos da caldeira.

A concentração permissível de cloretos na água de caldeiras de baixa e média pressões (até 57 kgf/cm²), é na ordem de 200 ppm e, para caldeiras de alta pressão (acima de 57 kgf/cm²) a concentração de cloretos deve ser mantida o mais próximo possível de zero.

O controle de cloretos é feito através de purgas de fundo.

Dióxido de Carbono (CO₂)

O principal efeito nocivo do dióxido de carbono (CO₂), quando presente na água de caldeira, é conferir acidez a esta água, conforme a reação:



A água contendo CO₂ tem caráter corrosivo tanto para metais ferrosos, como para o cobre e suas ligas.

O CO₂ deve ser retirado da água de alimentação, por desaeração mecânica, através de desaeradores e por desaeração química, através da injeção de morfolina.

Oxigênio Dissolvido (O₂)

O oxigênio dissolvido na água está sob a forma de O₂. É altamente corrosivo ao ferro e ligas de cobre em presença de água.

Pode ser removido da água de alimentação por desaeração mecânica ou injeção de produtos químicos sequestrantes de oxigênio.

Normalmente, em caldeiras que operam em médias e altas pressões, usam-se os dois métodos simultaneamente, desaeração e injeção de produtos químicos.

Potencial de Hidrogênio (pH)

O valor do pH de uma água é uma grandeza (número puro), que indica seu caráter ácido, alcalino ou neutro.

Sua escala de medida está compreendida entre os valores de 0 (zero) a 14 (quatorze). Valores abaixo de 7 (sete) indicam acidez crescente, valores superiores a 7 (sete) indicam caráter alcalino, enquanto valor igual a 7 (sete) indica caráter neutro.

Quando o valor do pH está acima do valor limite, diminui-se a injeção de morfolina e/ou dá-se uma purga de fundo.

Quando o valor de pH está abaixo do valor limite, aumenta-se a injeção de morfina.

O pH é um fator muito importante e influi na formação de incrustações ou tendências corrosivas.

Um baixo pH aumentará a corrosão do equipamento com o qual a água entra em contato.

Altos valores de pH poderão causar precipitação do carbonato de cálcio (CaCO₃) provocando incrustações na superfície das tubulações, etc.

Caldeiras de baixa e média pressão operam com um valor de pH na água de caldeira na faixa de 10 a 12, e caldeiras que operam em altas pressões (por exemplo 90 kgf/cm²) têm seu pH na faixa de 9,5 a 10,0.

Dureza

Por ser o principal agente formador de depósitos, a dureza deverá ser mantida o mais baixo possível (praticamente zero).

A eliminação da dureza na água de caldeira é conseguida através da injeção de fosfato. A dureza de cálcio por exemplo, reage com o fosfato formando um precipitado, que, ao longo do tempo, deposita-se no fundo do tubulão inferior, em forma de lama, sendo eliminado por “purga de fundo”.

Independentemente do nível de pressão de operação, a água de caldeira deverá ser mantida com teor zero de dureza.

Alcalinidade

Usualmente, considera-se a alcalinidade como causada pela presença de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos (CO₃⁻, HCO₃⁻, OH⁻) de cálcio, magnésio e soda (Ca, Mg, Na).

Como a determinação da alcalinidade baseia-se no conteúdo de álcalis de uma amostra, por titulação com uma solução ácida, tem-se:

- acalinidade P;
- quando utiliza-se a “fenolftaleína” para titulação da amostra;
- valor “VP” (alcalinidade P), determina a alcalinidade ativa.

Alcalinidade M

Quando utiliza-se o “metil-orange” para titulação da amostra. O valor “VM” (alcalinidade M) determina a alcalinidade total.

O controle da alcalinidade consiste em manter o valor de VM igual a 2 VP.

Sólidos totais dissolvidos

Altas concentrações de sólidos totais dissolvidos podem causar “arraste” e, quando a razão entre alcalinidade e sólidos totais dissolvidos excede a 20%, há formação de espuma e conseqüentemente maior perigo de arraste.

O valor de sólidos totais dissolvidos é estimado pela medida da condutividade elétrica da água.

A relação de medidas é:

$$1 \text{ ppm S.T.D.} = 2 \text{ micromhos/cm}$$

O valor de sólidos totais dissolvidos deve ser mantido dentro dos valores limitantes, através do controle de vazão da purga de superfície. Quando ocorrem valores de sólidos totais dissolvidos acima dos valores limitantes, deve-se proceder à purga de fundo.

Em caldeiras de baixa e média pressão, admitem-se sólidos dissolvidos, na água da caldeira, até 300 ppm e, em caldeiras de alta pressão (90 kgf/cm², por exemplo), o valor limitante é de 100 ppm.

Condutividade

Condutividade ou condutância específica de uma solução a uma dada temperatura é definida como sendo o inverso da resistência oferecida à passagem da corrente elétrica.

A unidade de condutividade é o mmho (micromhos/cm). Sua medida é feita, normalmente, a uma temperatura de 25°C.

A correção dos valores de condutividade, em águas de caldeira, é feita pela purga de fundo.

2.11 Instrumentos e dispositivos de controle de caldeiras

Com a crescente necessidade industrial no uso de vapor d'água, as caldeiras atuais, independentemente do nível de pressão de operação, são

providas de dispositivos de controle cada vez mais confiáveis. Os processos em que o vapor é utilizado são cada vez mais exigentes em termos de pressão, temperatura e teor de pureza desse vapor.

Além dos instrumentos indicadores (PI'S, TI'S, LG's e etc.), para acompanhamento visual, normalmente, caldeiras de média e alta pressão são dotadas de instrumentos de controle automático.

Assim, os principais controles de uma caldeira são:

- controle do nível d'água do tubulão;
- controle de combustão;
- controle de temperatura do vapor.

Evidente que estes controles acima são mais sofisticados à medida que aumenta o regime de trabalho da caldeira, em termos de pressão, temperatura e vazão de vapor.

Assim, caldeiras que operam em baixas pressões, terão controles mais simples que as que operam em médias pressões e estas terão controles menos sofisticados das que operam em altas pressões.

2.11.1 Controle de nível

O controle de nível d'água de uma caldeira tem por finalidade manter esse nível constante, num valor pré-determinado (“set-point”), independente da variação de vazão na produção de vapor.

Esse controle de nível é feito variando-se (para mais ou para menos) a vazão de água de alimentação para a caldeira.

O controle de nível, dependendo do tipo de caldeira (baixa, média ou alta pressão e produção de vapor), pode ser:

Controle de nível a um elemento

Esse tipo de controle visa a ajustar a vazão de água de alimentação baseando-se somente na medição do nível d'água do tubulão superior da caldeira.

É empregado somente para caldeiras pequenas que operam em baixas pressões e vazões.

Controle de nível a dois elementos

Nesse tipo de controle, além da medição do nível d'água da caldeira, é levada também em consideração a medição da vazão de vapor.

Empregado para caldeiras de médio porte, em que as oscilações de pressão e vazão não são prejudiciais aos processos que utilizam esse vapor.

Há uma tendência, cada vez mais presente em termos econômicos e operacionais, de abandonar esse tipo de controle em favor do tipo de três elementos, a seguir abordado.

Controle de nível a três elementos

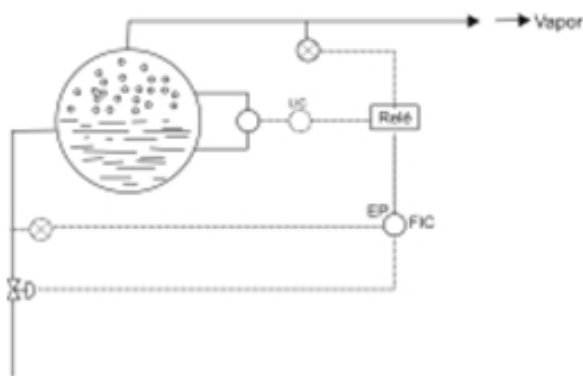
Neste tipo de controle são levadas em consideração três variáveis: nível de água do tubulão da caldeira, vazão de água de alimentação e vazão de vapor produzido.

Esse tipo de controle atua na vazão de água de alimentação de modo a manter, simultaneamente, essa vazão igual à de vapor e o nível d'água do tubulão da caldeira na altura pré-estabelecida ("set-point").

Este sistema tem a vantagem adicional de corrigir a vazão de água de alimentação antes de se verificar alteração no nível do tubulão da caldeira.

O sistema de controle de nível a três elementos, é amplamente usado em caldeiras de grande porte (elevadas pressões, temperaturas e vazões de vapor) e onde há bruscas oscilações na demanda de vapor pelo processo.

Observação: Mesmo com controles de nível sofisticados, é importante o LG (visor de nível) do tubulão superior da caldeira, que deverá ser constantemente observado no sentido de maior segurança para que o nível mantenha-se dentro do valor desejado.



2.11.2 Controle de combustão

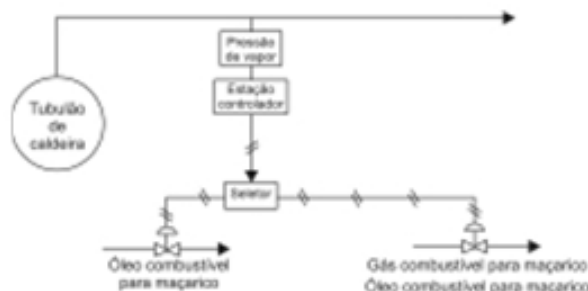
O controle de combustão de caldeiras tem como finalidade variar as vazões de combustível e ar para combustão, em função da pressão do vapor gerado pela caldeira, mantendo esta pressão constante, dentro do valor desejado, em qualquer variação de vazão de vapor, além de proporcionar controle e estabilização na combustão da caldeira.

Os tipos de malhas de combustão variam em função de diversos fatores: regime de trabalho da caldeira (vazão de vapor constante ou não), combustível consumido (óleo, gás ou queima mista, óleo mais gás, e etc).

Para caldeiras mais simples, admitem-se malhas de combustão também simples, como por exemplo, controle a um elemento. Neste tipo de controle, um instrumento controlador de pressão compara a pressão do vapor na saída da caldeira com o valor desejado ("set point") e envia sinal para o instrumento que aumenta ou diminui o combustível, no sentido de manter a produção de vapor exigida pelo processo, dentro da pressão desejada.

A Figura abaixo mostra, esquematicamente, um tipo de controle simples de combustão.

Controle simples de combustão



Em caldeiras sujeitas a grandes variações na geração de vapor, é usual o controle de combustão a dois elementos ou seja, além da pressão é usada também a vazão de vapor. Essas duas variáveis (pressão e vazão de vapor) geram sinais que vão a um controlador e, este emite um único sinal que, da mesma maneira do controle a um elemento, mantém a combustão desejada.

A malha de combustão de caldeiras mais sofisticadas, adota o princípio de controle de "ar rico", ou seja, é dotada de dispositivos (relés) que, em situações de decréscimo de carga da caldeira, primeiro diminuem a vazão de combustível e depois o ar e, durante acréscimo de carga, somente após aumentada a vazão de ar é aumentado o combustível.

Esse procedimento visa a evitar uma combustão incompleta e todos os seus inconvenientes (formação de fumaça na câmara de combustão, formação de fuligem sobre os tubos da caldeira, etc).

2.11.3 Controle de temperatura do vapor

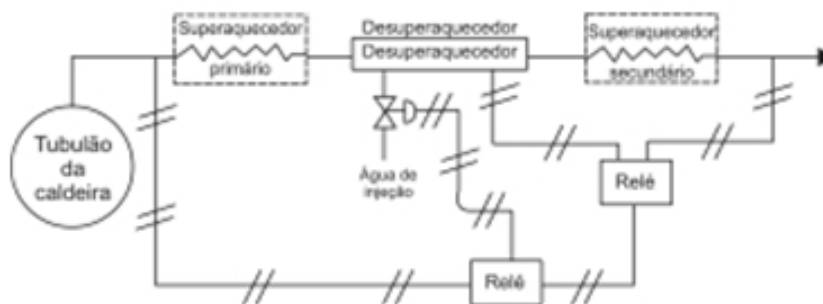
O controle de temperatura do vapor produzido por uma caldeira tem por objetivo obter-se, na saída da mesma, um valor constante de temperatura desejada para esse vapor.

O controle é feito injetando-se água pressurizada (atomizada) em determinado ponto (normalmente no dessuperaquecedor) do coletor de saída de vapor produzido pela caldeira.

Da mesma maneira que os controles de nível e combustão, o controle de temperatura do vapor é mais ou menos complexo dependendo do tipo de caldeira (baixa, média ou alta pressão e produção de vapor).

A Figura abaixo mostra um sistema de controle de temperatura a três elementos:

- temperatura final do vapor;
- carga da caldeira (vazão vapor produzido);
- temperatura do vapor na saída do dessuperaquecedor.



Controle de Temperatura de Vapor a Três Elementos.

Anotações

Distribuição de vapor: Utilização e Características

O sistema de distribuição de vapor é o conjunto de vias de transporte de energia que interliga os pontos de produção e de utilização. É importante lembrar, aqui, que, nesse sistema, a tendência é de haver sempre uma dissipação de parte da energia transportada, de forma irreversível. Para que haja uma movimentação do vapor dentro de uma tubulação, é sempre necessário que exista uma diferença de pressões. Toda vez que houver um fluxo de vapor no interior de um tubo, haverá atrito entre o vapor e as paredes do tubo; então a necessidade de existir uma diferença de pressões. Como consequência desse fato, quando se necessita uma determinada pressão e/ou temperatura no ponto de utilização, deve-se prever o que acontecerá durante o transporte desse vapor desde o ponto de produção. Por exemplo, considere-se uma caldeira produzindo vapor saturado a uma pressão de 8 kgf/cm^2 , o qual será utilizado a 200 m de distância. Dificilmente, pode-se dispor de uma pressão maior que $7,5 \text{ kgf/cm}^2$ no ponto de consumo, devido às perdas por atrito.

A energia tende sempre a deslocar-se dos pontos de temperatura mais alta para os de temperatura mais baixa e, reciprocamente, pode-se dizer que, quando existe uma diferença de temperatura entre dois pontos, haverá fluxo de energia entre eles no sentido da maior para a menor temperatura. Dessa forma, fica patente que uma tubulação instalada no meio ambiente e transportando vapor implica numa transferência de energia do vapor para o meio ambiente (mesmo que o tubo esteja isolado), pois a temperatura no interior do tubo será sempre maior que a externa.

Pode-se concluir que, para um sistema de distribuição de vapor funcionar satisfatoriamente, deve-se procurar minimizar tanto as perdas de pressão (perda de carga) quanto as perdas de calor por transferência. Esse ponto ótimo, com boa performance e perdas mínimas, só é conseguido através de um bom dimensionamento das tubulações. Uma tubulação

subdimensionada trabalhará com velocidades muito altas, ocasionando perdas de carga muito grandes e, nos casos mais críticos, até mesmo falta de vapor no ponto de consumo. É sabido que tubulações trabalhando com velocidades muito altas sofrerão erosão e, conseqüentemente, terão um desgaste prematuro. Uma tubulação superdimensionada solucionará os problemas de perda de carga e sempre entregará para consumo a quantidade necessária de vapor. O inconveniente, nesse caso, é ter-se custos mais altos de tubulação e isolamento térmico. As velocidades internas serão baixas, propiciando perdas por condensação e, em alguns casos, pode até ocorrer martelo hidráulico.

3.1 Redução de pressão

Dispondo de uma caldeira gerando vapor a uma determinada pressão, conforme o grau de superaquecimento, estará sendo atendida uma necessidade de energia do processo naquela temperatura. Considera-se, no entanto, uma possível mudança ou expansão da produção, que passe a demandar outro nível de temperatura para seu funcionamento. Na hipótese desta temperatura ser mais alta que a fornecida pelo gerador de vapor, investimentos em outros gerador ou forma de aquecimento tornam-se inevitáveis. Mas, na hipótese do nível de temperatura ser menor, o uso de vapor à pressão menor que a gerada é, conseqüentemente, mais econômico.

3.2 Níveis de pressão

Ao optar pela existência de outros níveis de pressão, a complexidade do sistema de vapor estará sendo aumentada. Assim, a escolha dos níveis de pressão existentes deve ser feita de acordo com alguns critérios.

Normalmente, numa indústria de porte médio para grande existem, no mínimo, três níveis de pressão de vapor, chamados de vapor de alta, média e baixa ou exausto. O vapor de alta será gerado pelas caldeiras da indústria, e, portanto, o que deverá ter a maior vazão e

atenderá às necessidades mais críticas de pressão e temperatura do processo. O de nível médio será gerado a partir do anterior, por turbinas e válvulas redutoras, atendendo também às necessidades de aquecimento do processo. O vapor de baixa ou exausto é, em geral, produto do uso dos níveis acima para movimentação de máquinas, devendo ser usado em processos de aquecimento, quando possível. Todos os níveis devem ter pressão razoavelmente constante para todos os usuários. Portanto, as turbinas devem descarregar vapor em condições de pressão e temperatura idênticas por toda a indústria. Quando isto não for possível, mais um nível de pressão será introduzido no sistema, com coletores próprios e válvulas redutoras ligando-o aos outros níveis. Sempre que o processo necessitar de níveis de pressão ou temperatura diferentes dos disponíveis, a mesma providência deverá ser tomada.

Quanto aos níveis de vapor, o vapor de alta, como mencionado anteriormente, deverá ser escolhido considerando as necessidades mais críticas de pressão e temperatura do processo. Normalmente, por questões de disponibilidade de mercado quanto a materiais, tecnologia e equipamentos, os níveis de pressão de alta situam-se em torno de 40, 60, 80 ou 120 kgf/cm². É importante lembrar que esta escolha também deverá levar em conta os aspectos de custos operacionais (tratamento d'água, por exemplo) e de investimento inicial, que são invariáveis com a pressão de geração. Como regra geral, deve-se atender às necessidades do processo, com alguma folga, conforme os custos. O vapor de média também deve atender ao processo, mas deverá existir um compromisso maior entre custo e otimização do uso da energia, considerando as possibilidades de uso de turbinas versus válvulas redutoras. É importante lembrar, que, em termos de custos operacionais, é mais proveitoso reduzir pressão de vapor através de uma turbina, do que através de uma válvula. O nível de vapor de baixa será praticamente uma consequência dos equipamentos e níveis usados nas pressões superiores. Porém, quando da escolha das turbinas que irão gerá-lo, devemos evitar o uso de níveis de pressão muito baixos e próximos à região de saturação. Caso o vapor de baixa esteja nestas condições, dificilmente poderá ter utilidade motora (turbinas), ficando restrito a aquecimento, e estando próximo da saturação, formará condensando rapidamente, podendo inundar a linha e sobrecarregando o sistema de vapor.

3.3 Controle de pressão

Para se obter vapor em pressão menor que a gerada usam-se válvulas redutoras. Estas válvulas controlam o coletor de menor pressão, permitindo a passagem do vapor de alta pela válvula, e, conseqüente, redução, conforme houver necessidade no nível mais baixo. Ao passar pela válvula o vapor mantém seu conteúdo energético, e com a redução da pressão, a temperatura do vapor praticamente não decresce (decréscimo insignificante) ficando seu valor além do desejado para o processo. Para reduzir esta temperatura, é comum que, após as válvulas redutoras, haja uma injeção de água, chamada borrifo, da mesma qualidade da água de alimentação da caldeira. Outro modo de gerar vapor de menor pressão é usando uma das próprias necessidades do processo industrial, a de acionadores para as máquinas. Lançando mão de uma turbina de contra-pressão, aproveita-se a diferença de energia do vapor entre uma pressão e outra para gerar trabalho. Neste caso, devido à energia cedida à turbina, o vapor de saída, também chamado exausto, estará enquadrado tanto em pressão quanto em temperatura, não havendo, na maioria das vezes necessidade de borrifo.

O uso de níveis de vapor diferentes implicará na existência de equipamentos e coletores projetados para suportar diferentes pressões. Desse modo, não deve ser permitido de forma nenhuma que a pressão reinante num determinado nível ultrapasse o limite máximo de resistência do material de construção. Para garantir esta situação, todos os níveis de pressão devem dispor de válvulas de segurança, que expulsam vapor para a atmosfera, quando estes limites estiverem para ser ultrapassados.

Alívio de pressão - além do simples controle de segurança da pressão, também existe a preocupação quanto ao fechamento do balanço material de vapor. O vapor oriundo das caldeiras, passará por turbinas e válvulas perdendo pressão, aquecendo o processo, etc. Este vapor que entra deverá sair do sistema sob forma de condensado e retornar a caldeira, para aproveitamento energético. Caso haja o desbalanceamento das necessidades de vapor de um nível frente a outro mais baixo (por exemplo, muitas turbinas consumindo vapor de média pressão e poucos consumidores para o vapor de baixa gerado), haverá uma sobra de vapor no nível mais baixo. Este excesso irá provocar um aumento de pressão neste nível.

Anotações

Como o sistema estará funcionando, não há possibilidade de controle de pressão pela abertura “pop” de uma válvula de segurança, que é momentânea. Assim surge a necessidade de outra válvula para controle de pressão nos níveis de vapor menores, a válvula de alívio de pressão para a atmosfera. Esta válvula será ajustada para a pressão máxima de operação do nível, atuando de maneira contínua, descartando a quantidade de vapor necessária à manutenção do equilíbrio naquele nível.

Vazamentos - a partir do momento em que se produz e distribui vapor surgem preocupações quanto à eficiência térmica e otimização deste sistema, porque lida com um insumo valioso, que é a energia. Um dos maiores problemas dos sistemas de vapor são as perdas de vapor. Alguns são oriundos de necessidades do próprio sistema, como o descarte para a atmosfera pelas válvulas de alívio e outros, por desgaste e deficiência de materiais e instalação, os conhecidos vazamentos de vapor.

Além da perda de vapor, e conseqüentemente de óleo, e o aumento de custo operacional inerente, os vazamentos de vapor também implicam em:

- nível de ruído excessivo na área industrial, gerando problemas de condições de trabalho e higiene industrial. A maioria dos vazamentos de vapor tem nível de ruído que os situa numa faixa sonora próxima às turbinas de aviação.
- perda de água tratada, aumentando os custos de operação da caldeira, pelo aumento da reposição (e produtos químicos).

No caso de alívio de pressão, o problema deve ser solucionado pelo gerenciamento do consumo de vapor nos vários níveis de pressão, evitando a geração excessiva em um nível, sem necessidade de consumo. Este gerenciamento deve ser realizado pela disponibilidade e operação de acionadores de máquinas elétricas e a vapor.

No caso dos vazamentos, um programa de manutenção constante deve ser executado, varrendo regularmente a área industrial, constando não apenas de reparo, mas também de um acompanhamento técnico, propondo soluções e melhorias de modo a contornar os pontos de vazamento crônico.

Condensado

4.1 Problemas devidos ao condensado

A presença do condensado nas tubulações e equipamentos de vapor pode trazer grandes prejuízos à operação e aos componentes do sistema. O condensado não tem ação motora, nem ação aquecedora eficiente. A entrada ou a permanência do condensado nos aparelhos de aquecimento diminui grandemente sua eficiência. Pode provocar vibrações e “golpes de aríete” nas tubulações, quando empurrado pelo vapor em alta velocidade. Esses golpes ocorrem, principalmente, nas mudanças de direção, extremos e acidentes da tubulação. Isto porque as velocidades usuais de projeto de linhas de vapor são muito maiores (20 a 100 vezes) do que as usadas para água e o condensado é incompreensível.

Pode causar a erosão rápida das palhetas turbinas, que seria causada pelo impacto das gotas de condensado, que por ventura, fosse carregado pelo vapor para dentro das turbinas.

O condensado também pode gerar corrosão ao absorver o CO_2 , ao misturar-se com o ar presente nos ambientes por onde passa, formando o ácido carbônico, de alta ação corrosiva. Esta mistura com o ar e gases ambientes também provoca queda de sua temperatura e eventual resfriamento do vapor.

Sua simples presença nas tubulações de vapor, independente de outros efeitos, pode prejudicar o fornecimento de vapor na vazão necessária aos consumidores, porque provoca a redução da seção transversal útil de escoamento do vapor, ao acumular-se no fundo.

4.2 Formação do condensado

O condensado é formado nas tubulações de vapor e equipamentos que consomem vapor, por vários motivos. Em tubulações de vapor úmido, o condensado forma-se por precipitações da própria umidade, e em tubulações de vapor saturado, aparece em consequência das perdas de calor por irradiação ao longo da linha. Também pode aparecer, em consequência

do arraste de água, proveniente da caldeira. Sua formação ocorre em maior escala no momento da entrada em operação, quando todo o sistema está frio (“warm-up”) ou quando o sistema é tirado de operação e o vapor condensado aos poucos no interior dos tubos.

O condensado forma-se, também, em todos os aparelhos onde o vapor é usado como meio aquecimento (serpentinhas, refulveradores, aquecedores a vapor, autoclaves, estufas etc.), como consequência do consumo da energia contida nele pelo processo.

4.3 Purgadores

Os purgadores de vapor (“steam-traps”) são dispositivos automáticos e eliminam o condensado formado nas tubulações de vapor e nos aparelhos de aquecimento, teoricamente sem deixar escapar o vapor. Por essa razão, esses aparelhos deveriam ser chamados, com mais propriedade, de “purgadores de condensado”. A maioria dos purgadores, além de removerem o condensado, eliminam também o ar e outros gases incondensáveis (CO_2 , por exemplo) que possam estar presentes, sendo os dispositivos de separação mais importantes e de empregos mais comum em tubulações industriais de vapor. São empregados em dois casos típicos:

1. para eliminação do condensado formado nas tubulações de vapor em geral (drenagem de tubulações de vapor);
2. para reter o vapor nos aparelhos de aquecimento a vapor (aquecedores a vapor, serpentinhas de aquecimento, autoclaves, estufas etc.), deixando sair apenas o condensado.

Devem ser colocados, obrigatoriamente, purgadores para drenagem de condensado nos seguintes pontos de todas as tubulações de vapor:

- todos os pontos baixos e de aumento de elevação (colocados, nesses casos, na elevação mais baixa). Denomina-se ponto baixo em todos os trechos de

tubulação, qualquer que seja o seu comprimento, em elevação inferior aos trechos adjacentes.

- nos trechos de tubulação em nível, deve ser colocado um purgador em cada 100 m a 250 m; quanto mais baixa for a pressão do vapor mais numerosos deverão ser os purgadores.
- todos os pontos extremos (no sentido do fluxo) fechados com tampões, flanges cegos, bujões etc.
- imediatamente antes de todas as válvulas de bloqueio, válvulas de retenção, válvulas de controle e válvulas redutoras de pressão. Os purgadores destinam-se, nesse caso, a eliminar o condensado que se forma quando a válvula estiver fechada.
- próximo à entrada de qualquer máquina a vapor, para evitar a penetração de condensado na máquina.

Os purgadores, instalados com a finalidade de reter o vapor em um aparelho de aquecimento, devem ser intercalados na própria tubulação de vapor e colocados o mais próximo possível da saída do aparelho.

A finalidade desses purgadores é aumentar, ao máximo, o tempo de permanência do vapor dentro do aparelho, para que possa ceder todo o seu calor latente, até sair do equipamento como condensado. Se não houvesse o purgador, o vapor circularia continuamente à alta velocidade, e para que a troca de calor fosse eficiente, o comprimento da trajetória do vapor dentro do aparelho (serpentina, feixe tubular etc.) teria de ser enorme. Não havendo o purgador, tem-se, assim, um consumo exagerado com desperdício de vapor e, conseqüentemente, um baixo rendimento global do sistema de aquecimento. A instalação do purgador representa sempre considerável economia de vapor e, portanto, de combustível e de dinheiro, desde que sua seleção, projeto de instalação e acompanhamento de vida útil operacional sejam adequados. Por todas essas razões, é obrigatória a colocação de purgadores de vapor na saída de qualquer aparelho de aquecimento a vapor.

4.4 Coletores de condensado

A capacidade de tubulações de condensado, como quaisquer outras de transporte de fluidos, depende do diferencial de pressão aplicado nos pontos extremos. Não é correto tratar linhas de condensado como se estas fossem

apenas “água quente”, uma vez que há gases presentes (ar, CO₂, etc) e pode ocorrer a reevaporação do condensado “flash”, com a queda de pressão ao longo da linha. Também não é recomendado dimensioná-la como se fosse uma linha de vapor de menor pressão, é anti-econômico. O diâmetro da tubulação de condensado deve se situar entre o valor da tubulação de vapor de baixa pressão e a de água líquida nas mesmas condições. Estes parâmetros devem servir apenas como balizamento para verificação do cálculo.

Um cálculo rigoroso de dimensionamento de tubulações de condensado deveria levar em consideração a possibilidade de formação de escoamento bifásico (líquido + vapor). No entanto, como um coletor de condensado pode receber diversas contribuições, muitas vezes com características diversas de pressão e vazões certamente variáveis, não é possível a determinação rigorosa do perfil de pressões ao longo desta linha.

De qualquer forma, é preciso dimensionar linhas de condensado. Existem vários métodos conhecidos em artigos e na literatura, por exemplo, um que conta com vários anos de uso prático, e tem valores razoáveis. Este método leva em conta a perda de carga ao longo da tubulação e o caimento (mm de diferença de altura/ m de tubulação).

As tubulações de condensado devem ser projetadas para a vazão normal do sistema em operação. O projeto, a partir de dados máximos (parada e partida), pode levar a um superdimensionamento desnecessário e não justificável em nível econômico.

4.5 Reutilização de condensado

A recuperação do condensado, nos sistemas de vapor, é realizada por motivos de ordem econômica. O condensado é o próprio vapor gerado na caldeira, após ter sido exaurido da maior parte de seu conteúdo energético. Para gerar este vapor, foi necessário gastar além do combustível, uma série de produtos químicos para garantir qualidade ao vapor e proteção contra a corrosão da caldeira. Caso este condensado fosse descartado, toda a água que entrasse na caldeira com estes produtos químicos deveria ser tratada, numa taxa tão grande quanto a produção de vapor. Além disso, mais combustível seria gasto para aquecer a água à temperatura do vapor.

Ao recuperar o condensado, reduzem-se os gastos de combustível, devido à energia

contida no condensado, que irá pré-aquecer a água de alimentação e reduzir a quantidade de produtos químicos necessários.

Conforme os níveis de pressão existentes na indústria, antes de retornar o condensado para a caldeira pode-se aproveitá-lo para gerar vapor, usando o efeito de reevaporação. Dispondo de condensado a uma determinada pressão e levando-o a um ambiente de pressão menor, parte dele irá tornar-se vapor, porque desloca-se o ponto de equilíbrio líquido-vapor para uma região em que a quantidade de energia presente permitirá a vaporização. Caso a pressão de reevaporação seja uma das disponíveis no sistema, mais vapor será gerado para este nível. Um sistema de reevaporação consiste em um vaso, onde ocorre a reevaporação “flash” do condensado, que é alinhado pelo topo à tubulação do nível de pressão desejado, tubulações para os condensados (alta e baixa pressão) e bombas para recuperação de condensado de baixa pressão. Este vaso, normalmente, é um vaso vertical com dispositivos internos para minimizar o arraste de condensado pelo vapor formado. Existem chaves de nível que acionam as bombas, para recolhimento do condensado que se acumula no fundo. O funcionamento dos sensores de nível é fundamental para o bom funcionamento deste sistema, caso contrário será introduzido líquido em outra tubulação de vapor, com os mesmos efeitos negativos já descritos. A reevaporação deve ser restrita a correntes de condensado limpo, isto é, que não tenham possibilidade de contaminação durante sua formação, por exemplo condensação de linha de vapor.

No entanto, os sistemas de retorno de condensado podem apresentar contaminação de varias fontes como, por exemplo:

- resíduos metálicos;
- contaminações gasosas como CO_2 e O_2 ; - óleo, graxas, etc.

Os metais envolvidos nesses problemas são, principalmente, o ferro das tubulações e carcaças de trocadores de calor, cobre e ligas cuproníquel de tubos de condensadores. Os gases são oriundos do ar atmosférico, presente nas tubulações e equipamentos. Os óleos, graxas e outros, dos processos por onde o vapor passou durante o aquecimento, por vazamentos.

Este condensado, antes de retornar à caldeira, deve ser tratado, visando à eliminação destes elementos, pelos mesmos motivos do

tratamento da água de alimentação, e também pelo risco operacional. O óleo presente nos tubos de uma caldeira pode carbonizar na superfície do metal, levando a condições de superaquecimento e escoamento com rompimento.

4.6 Tratamento de condensado

Os dispositivos usados para remoção de contaminantes são as unidades polidoras de condensado. Estas unidades são compostas de filtros mecânicos e desmineralizadores.

Os filtros mecânicos removem óxidos de ferro, cobre, óleos, graxas, e matérias em suspensão no condensado.

Um método usual de filtração mecânica do condensado é a utilização de velas de diatomita revestidas de celulose. A diatomita é um material poroso que retém os resíduos e a celulose, por ser lipofílica, retém pequenas contaminações de matéria orgânica. A camada de celulose satura periodicamente, devido ao acúmulo de matéria em sua superfície. Esta celulose é retirada por um sistema de retro-lavagem e formada através de uma suspensão de celulose e água, no sentido normal do fluxo. Após este filtro, deve ser instalado um filtro de carvão ativo, para reter as substâncias que passarem pelo primeiro, como compostos orgânicos dissolvidos, e propiciar uma proteção extra, dando mais tempo, no caso de passagem de óleo em quantidade, no filtro de celulose. Este sistema apresenta uma boa eficiência na retenção de pequenas contaminações e resíduos. Os principais fatores que devem ser acompanhados na operação são o diferencial de pressão no filtro e a presença de óleo no condensado. Este parâmetro pode ser obtido por análise de laboratório ou, de preferência, por analisadores em linhas.

Os filtros desmineralizados constam de um leito misto de resinas catiônicas e aniônicas que removem as impurezas que se solubilizam no condensado.

Além das unidades polidoras que removem os contaminantes indesejáveis para as caldeiras, há necessidade de se proteger as próprias linhas de condensado de ataques corrosivos com injeção de aminas, que irão reduzir, substancialmente, a formação de óxidos de ferro. As aminas voláteis, como a morfolina e a cicloexilamina, que corrigem o valor pH e combatem o CO_2 , são efetivamente usadas quando há pouco oxigênio dissolvido no condensado. Nos sistemas em que há substancial infiltração de oxigênio e grande quantidade de

Sistema de Ar Comprimido

O ar comprimido é, provavelmente, uma das mais antigas formas de transmissão de energia que o homem conhece, empregada e aproveitada para ampliar sua capacidade física.

O reconhecimento da existência física do ar, bem como a sua utilização (mais ou menos) consciente para o trabalho, são comprovados há milhares de anos.

Dos antigos gregos provém a expressão “pneuma”, que significa fôlego, vento e filosoficamente alma.

Derivando da palavra pneuma, surgiu entre outros, o conceito de pneumática, que quer dizer: - ciência que estuda o movimento e fenômeno dos gases.

Embora a base da pneumática seja um dos mais antigos conhecimentos do homem, há mais de 2000 anos, somente após o ano de 1950 ela realmente foi introduzida na produção industrial.

Hoje, o ar comprimido tornou-se indispensável nos mais diferentes processos industriais, pois nenhum outro auxiliar pôde ser empregado tão simples e rentavelmente para solucionar problemas de automação.

O ar comprimido é um dos elementos de vital importância na operação de uma refinaria. Um Sistema de ar comprimido é composto, basicamente, por compressores de ar, um vaso pulmão de ar de instrumentos, um vaso pulmão de ar de serviço e um secador de ar. Tendo em vista sua aplicação, pode ser classificado em Ar Comprimido para Instrumento e Ar Comprimido de Serviço. Tipicamente, a pressão do ar comprimido (de serviço e de instrumentos) é controlada em $7,0 \text{ kgf/cm}^2$.

5.1 Ar Comprimido para Instrumentos

É o ar necessário para utilização na operação da instrumentação pneumática, comando de válvulas, posicionadores de campo, etc.

A fim de não prejudicar a ação dos instrumentos, este ar precisa ser de alta pureza (isento de partículas sólidas, óleo, etc) e deve ser completamente seco (isento de umidade).

Para isso, a instalação possui certos equipamentos especiais como: compressores com cilindros não lubrificados, secador de ar com leito de alumina ou sílica gel e filtros. Toda tubulação de distribuição é de aço galvanizado (coletores gerais ou secundários) enquanto as linhas de controle são de cobre.

5.2 Ar comprimido de Serviço

É o ar comprimido para uso geral, utilizado no acionamento de ferramentas pneumáticas, na agitação de produtos em tanques, como fluido de arraste em ejetores, ou ainda, na utilização em oficinas de manutenção, etc.

A Figura a seguir, mostra um diagrama de bloco da Central de ar comprimido.



Diagrama de bloco do sistema de ar comprimido.

Anotações

[illegible]