

2. Ciclos Frigoríficos

Profa. Dra. Alessandra Lopes de Oliveira



2.4. Ciclos Frigoríficos de Duplo Estágio

- Usado para quando a potência requerida é elevada
- Câmaras de estocagem de produtos congelados (Temperatura de evaporação do refrigerante é muito baixa)

2.4. Ciclos Frigoríficos de Duplo Estágio

- Refrigerantes mais usados em Ciclos de Duplo Estágio
 - R-22: HCFC (Hidrobiclorofluorometano);
 - R-502: Uma mistura azeotrópica;
 - R-717: Amônia.

2.4. Ciclos Frigoríficos de Duplo Estágio

- Estudo dirigido para a Amônia
 - Para produzir 1TR
 - a -10°C necessita-se 4 m^3 de R-717;
 - a -40°C necessita-se 17 m^3 de R-717;
 - Comparando um sistema de simples e duplo estágio para o R-717, quando se diminui a temperatura de -15°C para -32°C a potência necessária é:
 - 85% \Rightarrow simples estágio;
 - 19% \Rightarrow duplo estágio.

2.4. Ciclos Frigoríficos de Duplo Estágio

1 hp = 0,7457 kW
 1 Cv (ou PS) = 0,7355 kW
 1 hp = 1,0138 Cv (ou PS)

- Estudo dirigido para a Amônia

Tabela 1 – Comparação entre o consumo de energia para um sistema de simples e duplo estágio.

| Condições de Operação | | | | BHP/TR | Simples Estágio % | Duplo Estágio % |
|----------------------------|----------------|----------------------------|----------------|--------|-------------------|-----------------|
| Evaporação | | Condensação | | | | |
| Pressão kg/cm ² | Temperatura °C | Pressão kg/cm ² | Temperatura °C | | | |
| 2,4 | -15 | 13,8 | 35 | 1,52 | - | 11,8 |
| 1,9 | -20 | 13,8 | 35 | 1,96 | 29 | 13,8 |
| 1,1 | -32 | 13,8 | 35 | 2,81 | 85 | 19,0 |
| 0,7 | -40 | 13,8 | 35 | 3,76 | 147 | 25,0 |

%, SE – aumento na potência para simples estágio.

%, DE – redução na potência para duplo estágio quando comparado com um estágio.

2.4. Ciclos Frigoríficos de Duplo Estágio

- Estudo dirigido para a Amônia

- Para uma $T_{\text{evap.}} = -40\text{ °C} \Rightarrow p_{\text{evap.}} = 0,73\text{ kgf/cm}^2$ ou $71,66\text{ kPa}$. Nesta condição a $p_{\text{cond.}} = 13,77\text{ kgf/cm}^2$ ou 1.351 kPa para $T = 35\text{ °C}$

- Na compressão $\Rightarrow 71,66\text{ kPa}$ à 1.351 kPa

- Para um sistema de simples estágio a T na saída do compressor seria de $180\text{ °C} \Rightarrow$ impossível operar o compressor a uma T tão elevada (lubrificação e acessórios)

2.4. Ciclos Frigoríficos de Duplo Estágio

346 APÊNDICE A – TABELAS

Tabela A.9a – Propriedades termodinâmicas do refrigerante R-717 (amônia) saturado

| T [°C] | p [kPa] | v _g [m³/kg] | v _f [m³/kg] | h _g [kJ/kg] | h _f [kJ/kg] | h _{fg} [kJ/kg] | s _g [kJ/kg·K] | s _f [kJ/kg·K] | s _{fg} [kJ/kg·K] |
|-----------|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| -40 | 21,68 | 1,440 | 155,4 | 16,17 | 1388,6 | 1402,8 | 0,2877 | 0,2438 | 0,0439 |
| -35 | 27,59 | 1,452 | 147,8 | 23,59 | 1389,8 | 1409,4 | 0,3056 | 0,2422 | 0,0634 |
| -30 | 35,08 | 1,464 | 140,7 | 29,01 | 1393,0 | 1411,0 | 0,3245 | 0,2406 | 0,0811 |
| -25 | 44,96 | 1,477 | 134,0 | 32,44 | 1398,1 | 1412,6 | 0,3432 | 0,2390 | 0,0922 |
| -20 | 57,82 | 1,490 | 127,7 | 36,68 | 1372,2 | 1414,1 | 0,3619 | 0,2376 | 0,1067 |
| -15 | 73,07 | 1,462 | 121,7 | 41,32 | 1374,4 | 1415,7 | 0,3806 | 0,2362 | 0,1198 |
| -10 | 91,92 | 1,465 | 116,1 | 45,77 | 1371,5 | 1412,2 | 0,3992 | 0,2341 | 0,1314 |
| -5 | 113,7 | 1,467 | 110,7 | 50,22 | 1368,6 | 1418,8 | 0,4177 | 0,2316 | 0,1416 |
| 0 | 138,2 | 1,47 | 105,7 | 54,67 | 1365,9 | 1426,3 | 0,4360 | 0,2290 | 0,1500 |
| 5 | 165,3 | 1,473 | 100,9 | 59,14 | 1362,7 | 1421,8 | 0,4547 | 0,2262 | 0,1562 |
| 10 | 194,9 | 1,476 | 96,2 | 63,60 | 1359,7 | 1423,3 | 0,4730 | 0,2232 | 0,1602 |
| 15 | 227,1 | 1,478 | 91,4 | 68,07 | 1356,7 | 1424,8 | 0,4914 | 0,2200 | 0,1622 |
| 20 | 261,8 | 1,481 | 86,7 | 72,55 | 1353,7 | 1426,3 | 0,5098 | 0,2168 | 0,1631 |
| 25 | 300,0 | 1,484 | 82,6 | 77,03 | 1350,7 | 1427,8 | 0,5278 | 0,2133 | 0,1633 |
| 30 | 341,6 | 1,486 | 79,2 | 81,52 | 1347,7 | 1429,3 | 0,5450 | 0,2096 | 0,1622 |
| 35 | 386,7 | 1,489 | 76,4 | 86,01 | 1344,7 | 1430,7 | 0,5614 | 0,2058 | 0,1602 |
| 40 | 435,3 | 1,492 | 73,9 | 90,51 | 1341,8 | 1432,1 | 0,5771 | 0,2019 | 0,1575 |
| 45 | 487,5 | 1,495 | 71,6 | 95,01 | 1338,9 | 1433,5 | 0,5921 | 0,2000 | 0,1539 |
| 50 | 543,3 | 1,498 | 69,4 | 99,52 | 1336,0 | 1434,9 | 0,6063 | 0,1980 | 0,1493 |
| 55 | 602,7 | 1,501 | 67,4 | 104,03 | 1333,1 | 1436,3 | 0,6200 | 0,1959 | 0,1436 |
| 60 | 665,7 | 1,503 | 65,7 | 108,55 | 1330,2 | 1437,7 | 0,6333 | 0,1937 | 0,1369 |
| 65 | 732,3 | 1,506 | 64,2 | 113,07 | 1327,3 | 1439,0 | 0,6462 | 0,1914 | 0,1293 |
| 70 | 802,5 | 1,509 | 62,9 | 117,60 | 1324,4 | 1440,4 | 0,6587 | 0,1890 | 0,1208 |
| 75 | 876,3 | 1,512 | 61,8 | 122,13 | 1321,5 | 1441,7 | 0,6709 | 0,1865 | 0,1115 |
| 80 | 953,7 | 1,515 | 60,9 | 126,67 | 1318,6 | 1443,1 | 0,6828 | 0,1840 | 0,1015 |
| 85 | 1034,7 | 1,518 | 60,2 | 131,22 | 1315,7 | 1444,4 | 0,6944 | 0,1814 | 0,0909 |
| 90 | 1119,3 | 1,521 | 59,7 | 135,78 | 1312,8 | 1445,7 | 0,7057 | 0,1788 | 0,0798 |
| 95 | 1207,5 | 1,524 | 59,4 | 140,35 | 1310,0 | 1447,0 | 0,7168 | 0,1761 | 0,0682 |
| 100 | 1299,3 | 1,527 | 59,3 | 144,93 | 1307,3 | 1448,2 | 0,7276 | 0,1734 | 0,0562 |
| 105 | 1394,7 | 1,53 | 59,4 | 149,52 | 1304,6 | 1449,5 | 0,7382 | 0,1707 | 0,0439 |
| 110 | 1493,7 | 1,533 | 59,6 | 154,12 | 1302,0 | 1450,8 | 0,7486 | 0,1680 | 0,0314 |
| 115 | 1596,3 | 1,536 | 59,9 | 158,74 | 1300,0 | 1452,1 | 0,7588 | 0,1653 | 0,0188 |
| 120 | 1702,5 | 1,539 | 60,4 | 163,37 | 1298,0 | 1453,4 | 0,7689 | 0,1626 | 0,0062 |
| 125 | 1812,3 | 1,542 | 61,0 | 168,02 | 1296,0 | 1454,7 | 0,7789 | 0,1600 | 0,0000 |
| 130 | 1925,7 | 1,545 | 61,7 | 172,69 | 1294,0 | 1456,0 | 0,7888 | 0,1574 | 0,0000 |
| 135 | 2042,7 | 1,548 | 62,5 | 177,38 | 1292,0 | 1457,3 | 0,7986 | 0,1549 | 0,0000 |
| 140 | 2163,3 | 1,551 | 63,4 | 182,09 | 1290,0 | 1458,6 | 0,8083 | 0,1524 | 0,0000 |
| 145 | 2287,5 | 1,554 | 64,4 | 186,82 | 1288,0 | 1460,0 | 0,8179 | 0,1499 | 0,0000 |
| 150 | 2415,3 | 1,557 | 65,5 | 191,57 | 1286,0 | 1461,3 | 0,8274 | 0,1474 | 0,0000 |
| 155 | 2546,7 | 1,560 | 66,7 | 196,34 | 1284,0 | 1462,7 | 0,8368 | 0,1449 | 0,0000 |
| 160 | 2681,7 | 1,563 | 68,0 | 201,13 | 1282,0 | 1464,0 | 0,8461 | 0,1424 | 0,0000 |
| 165 | 2820,3 | 1,566 | 69,4 | 205,94 | 1280,0 | 1465,3 | 0,8553 | 0,1399 | 0,0000 |
| 170 | 2962,5 | 1,569 | 70,9 | 210,77 | 1278,0 | 1466,6 | 0,8645 | 0,1374 | 0,0000 |
| 175 | 3108,3 | 1,572 | 72,5 | 215,62 | 1276,0 | 1467,9 | 0,8736 | 0,1349 | 0,0000 |
| 180 | 3257,7 | 1,575 | 74,2 | 220,49 | 1274,0 | 1469,2 | 0,8827 | 0,1324 | 0,0000 |
| 185 | 3410,7 | 1,578 | 76,0 | 225,38 | 1272,0 | 1470,5 | 0,8917 | 0,1299 | 0,0000 |
| 190 | 3567,3 | 1,581 | 77,9 | 230,29 | 1270,0 | 1471,8 | 0,9007 | 0,1274 | 0,0000 |
| 195 | 3727,5 | 1,584 | 79,9 | 235,22 | 1268,0 | 1473,1 | 0,9096 | 0,1249 | 0,0000 |
| 200 | 3891,3 | 1,587 | 82,0 | 240,17 | 1266,0 | 1474,4 | 0,9185 | 0,1224 | 0,0000 |
| 205 | 4058,7 | 1,590 | 84,2 | 245,14 | 1264,0 | 1475,7 | 0,9273 | 0,1199 | 0,0000 |
| 210 | 4229,7 | 1,593 | 86,5 | 250,13 | 1262,0 | 1477,0 | 0,9361 | 0,1174 | 0,0000 |
| 215 | 4404,3 | 1,596 | 88,9 | 255,14 | 1260,0 | 1478,3 | 0,9449 | 0,1149 | 0,0000 |
| 220 | 4582,5 | 1,599 | 91,4 | 260,17 | 1258,0 | 1479,6 | 0,9536 | 0,1124 | 0,0000 |
| 225 | 4764,3 | 1,602 | 94,0 | 265,22 | 1256,0 | 1480,9 | 0,9624 | 0,1099 | 0,0000 |
| 230 | 4949,7 | 1,605 | 96,7 | 270,29 | 1254,0 | 1482,2 | 0,9711 | 0,1074 | 0,0000 |
| 235 | 5138,7 | 1,608 | 99,5 | 275,38 | 1252,0 | 1483,5 | 0,9799 | 0,1049 | 0,0000 |
| 240 | 5331,3 | 1,611 | 102,4 | 280,49 | 1250,0 | 1484,8 | 0,9886 | 0,1024 | 0,0000 |
| 245 | 5527,5 | 1,614 | 105,4 | 285,62 | 1248,0 | 1486,1 | 0,9974 | 0,0999 | 0,0000 |
| 250 | 5727,3 | 1,617 | 108,5 | 290,77 | 1246,0 | 1487,4 | 1,0061 | 0,0974 | 0,0000 |
| 255 | 5930,7 | 1,620 | 111,7 | 295,94 | 1244,0 | 1488,7 | 1,0149 | 0,0949 | 0,0000 |
| 260 | 6137,7 | 1,623 | 115,0 | 301,13 | 1242,0 | 1490,0 | 1,0236 | 0,0924 | 0,0000 |
| 265 | 6348,3 | 1,626 | 118,4 | 306,34 | 1240,0 | 1491,3 | 1,0324 | 0,0899 | 0,0000 |
| 270 | 6562,5 | 1,629 | 121,9 | 311,57 | 1238,0 | 1492,6 | 1,0411 | 0,0874 | 0,0000 |
| 275 | 6780,3 | 1,632 | 125,5 | 316,82 | 1236,0 | 1493,9 | 1,0499 | 0,0849 | 0,0000 |
| 280 | 7001,7 | 1,635 | 129,2 | 322,09 | 1234,0 | 1495,2 | 1,0586 | 0,0824 | 0,0000 |
| 285 | 7226,7 | 1,638 | 133,0 | 327,38 | 1232,0 | 1496,5 | 1,0674 | 0,0799 | 0,0000 |
| 290 | 7455,3 | 1,641 | 136,9 | 332,69 | 1230,0 | 1497,8 | 1,0761 | 0,0774 | 0,0000 |
| 295 | 7687,5 | 1,644 | 140,9 | 338,02 | 1228,0 | 1499,1 | 1,0849 | 0,0749 | 0,0000 |
| 300 | 7923,3 | 1,647 | 145,0 | 343,37 | 1226,0 | 1500,4 | 1,0936 | 0,0724 | 0,0000 |
| 305 | 8162,7 | 1,650 | 149,2 | 348,74 | 1224,0 | 1501,7 | 1,1024 | 0,0699 | 0,0000 |
| 310 | 8405,7 | 1,653 | 153,5 | 354,13 | 1222,0 | 1503,0 | 1,1111 | 0,0674 | 0,0000 |
| 315 | 8652,3 | 1,656 | 157,9 | 359,54 | 1220,0 | 1504,3 | 1,1199 | 0,0649 | 0,0000 |
| 320 | 8902,5 | 1,659 | 162,4 | 365,00 | 1218,0 | 1505,6 | 1,1286 | 0,0624 | 0,0000 |
| 325 | 9156,3 | 1,662 | 167,0 | 370,48 | 1216,0 | 1506,9 | 1,1374 | 0,0599 | 0,0000 |
| 330 | 9413,7 | 1,665 | 171,7 | 376,00 | 1214,0 | 1508,2 | 1,1461 | 0,0574 | 0,0000 |
| 335 | 9674,7 | 1,668 | 176,5 | 381,56 | 1212,0 | 1509,5 | 1,1549 | 0,0549 | 0,0000 |
| 340 | 9939,3 | 1,671 | 181,4 | 387,15 | 1210,0 | 1510,8 | 1,1636 | 0,0524 | 0,0000 |
| 345 | 10207,5 | 1,674 | 186,4 | 392,78 | 1208,0 | 1512,1 | 1,1724 | 0,0499 | 0,0000 |
| 350 | 10479,3 | 1,677 | 191,5 | 398,44 | 1206,0 | 1513,4 | 1,1811 | 0,0474 | 0,0000 |
| 355 | 10754,7 | 1,680 | 196,7 | 404,13 | 1204,0 | 1514,7 | 1,1899 | 0,0449 | 0,0000 |
| 360 | 11033,7 | 1,683 | 202,0 | 409,86 | 1202,0 | 1516,0 | 1,1986 | 0,0424 | 0,0000 |
| 365 | 11316,3 | 1,686 | 207,4 | 415,62 | 1200,0 | 1517,3 | 1,2074 | 0,0399 | 0,0000 |
| 370 | 11602,5 | 1,689 | 212,9 | 421,42 | 1198,0 | 1518,6 | 1,2161 | 0,0374 | 0,0000 |
| 375 | 11892,3 | 1,692 | 218,5 | 427,25 | 1196,0 | 1519,9 | 1,2249 | 0,0349 | 0,0000 |
| 380 | 12185,7 | 1,695 | 224,2 | 433,12 | 1194,0 | 1521,2 | 1,2336 | 0,0324 | 0,0000 |
| 385 | 12482,7 | 1,698 | 230,0 | 439,03 | 1192,0 | 1522,5 | 1,2424 | 0,0299 | 0,0000 |
| 390 | 12783,3 | 1,701 | 235,9 | 445,00 | 1190,0 | 1523,8 | 1,2511 | 0,0274 | 0,0000 |
| 395 | 13087,5 | 1,704 | 241,9 | 451,02 | 1188,0 | 1525,1 | 1,2599 | 0,0249 | 0,0000 |
| 400 | 13395,3 | 1,707 | 248,0 | 457,09 | 1186,0 | 1526,4 | 1,2686 | 0,0224 | 0,0000 |
| 405 | 13706,7 | 1,710 | 254,2 | 463,22 | 1184,0 | 1527,7 | 1,2774 | 0,0199 | 0,0000 |
| 410 | 14021,7 | 1,713 | 260,5 | 469,40 | 1182,0 | 1529,0 | 1,2861 | 0,0174 | 0,0000 |
| 415 | 14340,3 | 1,716 | 266,9 | 475,64 | 1180,0 | 1530,3 | 1,2949 | 0,0149 | 0,0000 |
| 420 | 14662,5 | 1,719 | 273,4 | 481,93 | 1178,0 | 1531,6 | 1,3036 | 0,0124 | 0,0000 |
| 425 | 14988,3 | 1,722 | 280,0 | 488,28 | 1176,0 | 1532,9 | 1,3124 | 0,0099 | 0,0000 |
| 430 | 15317,7 | 1,725 | 286,7 | 494,69 | 1174,0 | 1534,2 | 1,3211 | 0,0074 | 0,0000 |
| 435 | 15650,7 | 1,728 | 293,5 | 501,16 | 1172,0 | 1535,5 | 1,3299 | 0,0049 | 0,0000 |
| 440 | 15987,3 | 1,731 | 300,4 | 507,69 | 1170,0 | 1536,8 | 1,3386 | 0,0024 | 0,0000 |
| 445 | 16327,5 | 1,734 | 307,4 | 514,28 | 1168,0 | 1538,1 | 1,3474 | 0,0000 | 0,0000 |
| 450 | 16671,3 | 1,737 | 314,5 | 520,93 | 1166,0 | 1539,4 | 1,3561 | 0,0000 | 0,0000 |
| 455 | 17018,7 | 1,740 | 321,7 | 527,64 | 1164,0 | 1540,7 | 1,3649 | 0,0000 | 0,0000 |
| 460 | 17369,7 | 1,743 | 329,0 | 534,41 | 1162,0 | 1542,0 | 1,3736 | 0,0000 | 0,0000 |
| 465 | 17724,3 | 1,746 | 336,4 | 541,24 | 1160,0 | 1543,3 | 1,3824 | 0,0000 | 0,0000 |
| 470 | 18082,5 | 1,749 | 343,9 | 548,13 | 1158,0 | 1544,6 | 1,3911 | 0,0000 | 0,0000 |
| 475 | 18444,3 | 1,752 | 351,5 | 555,08 | 1156,0 | 1545,9 | 1,4000 | 0,0000 | 0,0000 |
| 480 | 18809,7 | 1,755 | 359,2 | 562,09 | 1154,0 | 1547,2 | 1,4088 | 0,0000 | 0,0000 |
| 485 | 19178,7 | 1,758 | 367,0 | 569,16 | 1152,0 | 1548,5 | 1,4176 | 0,0000 | 0,0000 |
| 490 | 19551,3 | 1,761 | 374,9 | 576,29 | 1150,0 | 1549,8 | 1,4264 | 0,0000 | 0,0000 |
| 495 | 19927,5 | 1,764 | 382,9 | 583,48 | 1148,0 | 1551,1 | 1,4352 | 0,0000 | 0,0000 |
| 500 | 20307,3 | 1,767 | 391,0 | 590,73 | 1146,0 | 1552,4 | 1,4440 | 0,0000 | 0,0000 |
| 505 | 20690,7 | 1,770 | 399,2 | 598,04 | 1144,0 | 1553,7 | 1,4528 | 0,0000 | 0,00 |

2.4. Ciclos Frigoríficos de Duplo Estágio

- Sistema de duplo estágio
- Há um resfriador intermediário (RI) entre dois compressores que diminui a T

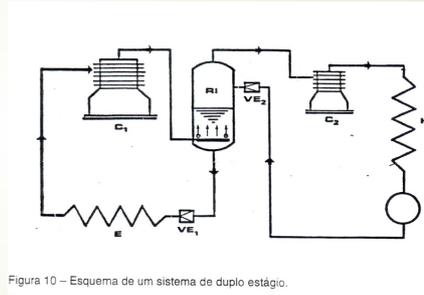


Figura 10 – Esquema de um sistema de duplo estágio.

2.4. Ciclos Frigoríficos de Duplo Estágio

- C1 Compressor de baixa p, aspira vapor do evaporador E e descarrega em
- RI resfriador intermediário (p entre a p do evaporador e do condensador)
- C2 Compressor de alta p, aspira o vapor em RI e descarrega em
- K Condensador, onde o vapor condensa
- VE 2 Válvula de expansão do segundo estágio ⇒ líquido-vapor frio para o RI
- Líquido do RI ⇒ VE1 Válvula de Expansão do primeiro estágio
- E evaporador
- C1 Compressor de baixa p

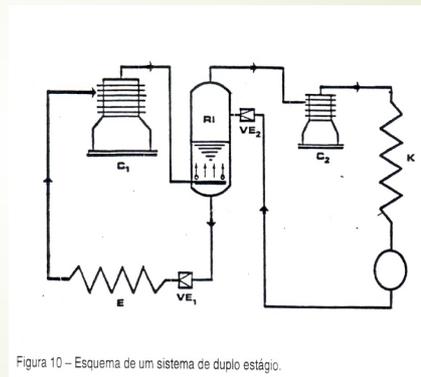


Figura 10 – Esquema de um sistema de duplo estágio.

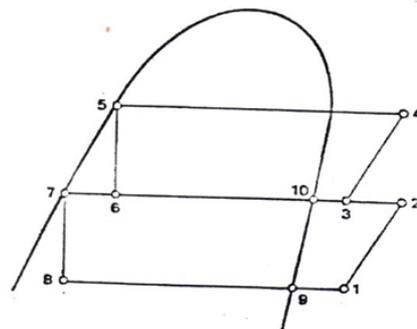
2.4. Ciclos Frigoríficos de Duplo Estágio

■ Sistema de duplo estágio

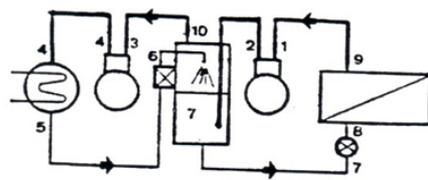
■ Pressão intermediária (pressão no RI)

$$pI = \sqrt{P_{\text{cond}} \times P_{\text{evap}}}$$

2.4. Ciclos Frigoríficos de Duplo Estágio

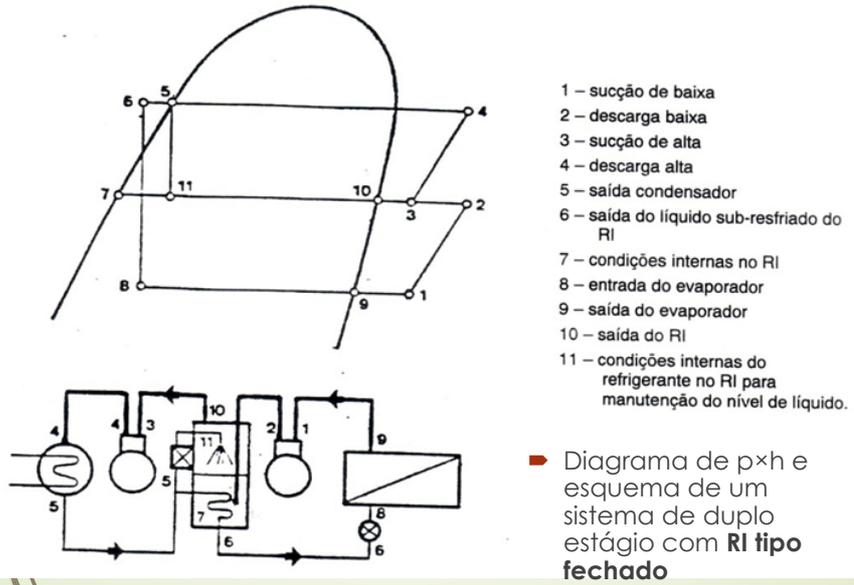


- 1 – sucção baixa
- 2 – descarga baixa
- 3 – sucção alta
- 4 – descarga alta
- 5 – saída condensador
- 6 – saída VE do intermediário
- 7 – alimentação da VE do evaporador
- 8 – entrada evaporador
- 9 – saída evaporador
- 10 – saída do resfriador intermediário.

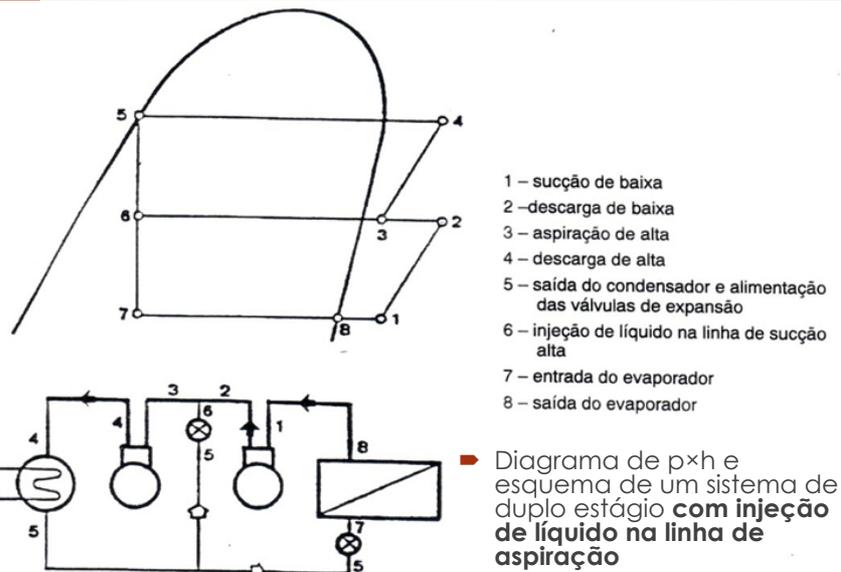


■ Diagrama de $p \times h$ e esquema de um sistema de duplo estágio com RI tipo aberto

2.4. Ciclos Frigoríficos de Duplo Estágio



2.4. Ciclos Frigoríficos de Duplo Estágio





2.4. Ciclos Frigoríficos de Duplo Estágio

■ Exercício

- Uma instalação frigorífica de amônia produz 210kW de refrigeração operando entre as temperaturas de evaporação e condensação de -24 e 30 °C respectivamente. Quais devem ser as potências de compressão para as seguintes condições:
 - A) O sistema opera segundo um ciclo padrão de simples estágio;
 - B) O sistema opera segundo um ciclo com resfriamento intermediário com injeção de líquido na linha de aspiração.